



21-25
AGOSTO DE 2016
FORTALEZA - CEARÁ

AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO AO DESGASTE DE LIGAS DE ALUMÍNIO SUBMETIDAS AO TRATAMENTO TÉRMICO DE SOLUBILIZAÇÃO E ENVELHECIMENTO

Kassim S. Al-Rubaie, kassim.alrubaie@sociesc.org.br¹
Márcio Antônio Paulo, marciotkf@ig.com.br¹

¹UNISOCIESC, Rua Albano Schimidt nº333 Boavista – Joinville-SC CEP 89206-001

Resumo: Este trabalho apresenta uma metodologia experimental para avaliar a resistência ao desgaste em ligas de alumínio submetidas ao tratamento térmico de solubilização e envelhecimento e tem como objetivo analisar as propriedades mecânicas e estabelecer a severidade do desgaste de três ligas de AlSiCu. As técnicas de ensaios utilizados foram: espectrometria, metalografia, ensaios mecânicos, medição de dureza (HB), análise de superfície (rugosidade), desgaste pino sobre disco (ASTM-G99-05) e roda de borracha (ASTM-G65-04). Os corpos de prova foram confeccionados a partir de blocos Y vazados em processo de fundição moldagem cold Box. O tratamento térmico de solubilização foi realizado em temperatura de 500°C e o envelhecimento na temperatura de 180°C com tempos de 1, 10, 25 e 50h, o que propicia alterações de microestruturas que são importantes para desenvolvimento de propriedades mecânicas tais como aumento de dureza, resistência mecânica, usinabilidade e estabilidade dimensional com certa redução de tensões residuais. Para este estudo foram escolhidas 3 ligas, sendo AlSi₆Cu_{3,5}, AlSi₈Cu_{3,0} e AlSi₁₀Cu_{1,0}. As análises de composição química foram realizadas somente na condição bruta de fundição, já os ensaios mecânicos, microestruturais (Microscopia Ótica e Microscopia Eletrônica de Varredura) desgaste pino sobre disco, desgaste roda de borracha e superfície (rugosidade) foram realizados na condição bruta de fundição e após tratamento térmico. Os resultados de composição química mostraram que os elementos químicos estão dentro da faixa de especificação e em relação a dureza, a liga AlSi₈Cu_{3,0} apresentou melhores resultados na condição bruta de fundição e a liga AlSi₆Cu_{3,5} após tratamento térmico nos tempos de 10, 25 e 50h, sendo equivalente a liga AlSi₈Cu_{3,0} apenas no tempo de 1h. Os melhores resultados de perda de volume foram obtidos pela liga AlSi₈Cu_{3,0} na condição bruta de fundição e após tratamento térmico nos tempos de 1, 10 e 25h, sendo que no tempo de 50h a liga AlSi₆Cu_{3,5} apresentou melhores resultados.

Palavras-chave: AlSiCu, Tratamento térmico T6, Solubilização, Envelhecimento, Desgaste Pino sobre Disco e Roda de Borracha

1. INTRODUÇÃO

Alumínio fundidos necessitam de controles e cuidados durante a sua produção, devido a problemas comuns do tipo: oxidação, inclusão de escória, bolhas de gás entre outros. Este processo é bastante utilizado para fabricação de

ferramentais de fundição em diferentes geometrias e complexidades, visando à utilização em processos de moldagem para fabricação de peças fundidas.

A baixa qualidade, durabilidade e o alto custo dos ferramentais de fundição em alumínio fundido para fabricação de peças em processo cold Box, principalmente ferros fundidos cinzentos e nodulares, tem despertado o interesse no estudo de ligas capazes de melhorar este desempenho, principalmente em se tratando de resistência ao desgaste, portanto, avaliar as condições de processamento de ligas de alumínio podem melhorar a qualidade e aumentar a durabilidade dos ferramentais. Pelo processo de fusão do alumínio, é possível controlar a temperatura e o tempo de tratamento visando retirar os corpos de prova para avaliação metalúrgica.

Através da variação da composição química das ligas e os tempos de tratamento, pretende-se verificar a intensidade de formação de inclusões de óxidos, escórias e bolhas nos corpos de prova fundidos em alumínio.

Para tempos de tratamentos maiores, espera-se obter uma menor quantidade de hidrogênio dissolvido no banho metálico, o que reduz a probabilidade de aparecimento de defeitos, principalmente de bolhas de gás. Em relação à composição química, o aumento do teor de cobre promove um aumento na resistência ao desgaste e o silício forma alguns compostos intermetálicos durante a reação líquido-eutético e em algumas ligas aumenta a fluidez no momento de seu vazamento nos moldes ou em lingoteiras.

Sendo assim, o propósito deste trabalho é avaliar em corpos de prova a resistência ao desgaste em ligas de alumínio com diferentes composições químicas e tempos de envelhecimento no tratamento térmico com obtenção de boas propriedades mecânicas e microestruturais, visando futura aplicação em ferramentais de fundição.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Fusão e Vazamento

Os corpos de provas para as análises química, metalográfica, dureza, ensaio de tração, desgaste por roda de borracha e pino sobre disco, foram obtidos pelo processo de usinagem a partir de blocos do tipo Y, massa aproximada de 2300g, conforme apresenta a figura 1. O processo de obtenção foi a partir de vazamento de alumínio fundido em moldes de areia pelo processo de moldagem cold box (caixa fria), que possui rápido ciclo de cura, boa resistência mecânica à frio, necessária para o manuseio dos moldes, boa resistência mecânica à quente o que evita o desmoronamento durante a etapa de vazamento e com excelente colapsibilidade, ou seja, capacidade da peça se desmoldar após vazamento.

As figuras 2a e 2b apresentam respectivamente o ferramental de fundição em madeira (a) utilizado para a fabricação dos moldes e o molde pronto para vazamento (b) obtido a partir deste ferramental. A tabela 1 apresenta a especificação de composição química para as três ligas em estudo e a tabela 2 apresenta a especificação de propriedades de areia para o processo de moldagem cold box.

A figura 1 ilustra o bloco tipo "Y" e o posicionamento utilizado para obtenção dos corpos de prova a serem ensaiados.

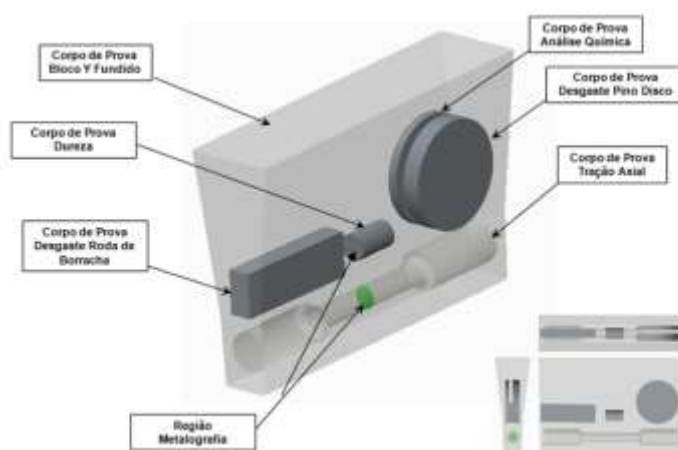


Figura 1. Corpo de prova modelo "Y".

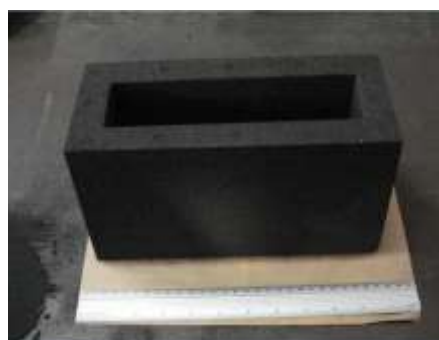
Tabela 1. Especificação de composição química das ligas de AlSiCu.

Liga	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ni	Zn	Ti	Sn	Pb	Outros
AlSi ₆ Cu _{3,5}	5,50/ 7,50	1,20 máx.	3,00/ 4,00	0,50 máx.	0,50 máx.	0,25 máx.	1,80 máx.	0,20 máx.	0,25 máx.	0,30 máx.	0,50
AlSi ₈ Cu _{3,0}	7,00/ 9,00	1,20 máx.	2,50/ 4,50	0,50 máx.	0,50 máx.	0,30 máx.	2,00 máx.	-----	0,25 máx.	0,30 máx.	0,50
AlSi ₁₀ Cu _{1,0}	10,50/ 11,50	0,65/ 1,00	0,50/ 1,50	0,50 máx.	0,20 máx.	0,50 máx.	0,60 máx.	0,20 máx.	0,20 máx.	0,20 máx.	0,50

A figura 2a apresenta o ferramental em madeira e a figura 2b os moldes em areia obtidos em processo de fundição cold box. A tabela 2 especifica as propriedades de areia utilizada neste processo.



(a)



(b)

Figura 2. Ferramental em madeira (a) e molde em areia para vazamento (b)

Tabela 2. Especificação de propriedades de areia para processo cold box

RT (N/mm ²)	Granulometria	% Resina	Perda ao Fogo	Temperatura
80-120	50-65AFS*(0,0530-0,210mm)	0,55	2% Máx.	40°C Máx.

* AFS= Unidade do Módulo de Finura da Areia

O metal líquido foi obtido em forno tipo Jung, cadinho de grafite e capacidade de 130kg, temperatura de 700°C, processo de desgaseificação realizado com material a base de cloretos de sódio e potássio e posteriormente vazados com auxílio de uma concha metálica em moldes de areia, conforme apresenta a figura 3. A desmoldagem dos blocos tipo Y ocorreu 1 hora após o seu vazamento. Para análise de composição química, foram retirados 3 amostras sendo uma no início, meio e final de vazamento em cada tipo de composição química, ou seja, totalizando 9 amostras.



Figura 3. Vazamento do alumínio fundido nos moldes de areia

A tabela 3 apresenta a quantidade de corpos de prova confeccionados para análises nas condições bruta de fundição (BF) e tratamentos térmicos (TT), sendo nesta última condição 5 corpos de prova para cada tempo de tratamento.

Tabela 3. Quantidade de corpos de prova para ensaios.

Tipo de Ensaio	Liga AlSi ₆ Cu _{3,5}		Liga AlSi ₈ Cu _{3,0}		Liga AlSi ₁₀ Cu _{1,0}	
	BF	TT	BF	TT	BF	TT
Análise Química	3	---	3	---	3	---
Tração	5	20	5	20	5	20
Dureza/Microscopia ótica	5	20	5	20	5	20
Desgaste Pino sobre Disco/MEV	5	20	5	20	5	20
Desgaste Roda de Borracha/MEV	5	20	5	20	5	20

2.2 Tratamentos Térmicos

Foram realizados tratamentos térmicos de solubilização na temperatura de 500°C e envelhecimento na temperatura de 180°C em forno Jung nos tempos de 1, 10, 25 e 50h (5 corpos de prova em cada tempo de tratamento). As figuras 4(a), 4(b) e 4(c) ilustram respectivamente a amarração dos corpos de provas para garantia de rastreabilidade, o posicionamento dentro do forno e o sensor de temperatura no momento da solubilização.

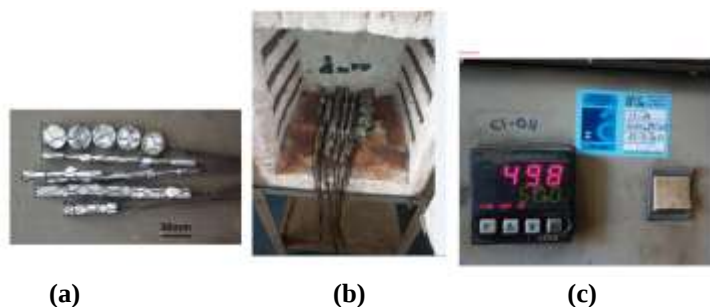


Figura 4. Amarração dos corpos de prova (a), posicionamento dentro do forno (b) e identificador de temperatura no momento da solubilização (c)

2.3 Ensaios Mecânicos

O ensaio de dureza Brinell foi realizado conforme a norma ASTM-E10 no equipamento Durômetro Georg Reicherter, modelo BRIBO VA 1975 tipo VAI, utilizando esfera de 2,5mm com carga de 187,5kgf. Para cada amostra foram realizadas medições em 3 pontos, os valores da média de dureza de cada amostra/liga estão descritos no item resultados e o ensaio de tração foi realizado conforme a norma ASTM-E8M na máquina Universal de tração marca Kratos modelo IKCL3USB 30kN.

2.4 Ensaios de Desgaste

Os ensaios de desgaste foram realizados em um abrasômetro do tipo roda de borracha, conforme norma ASTM-G65 procedimento D (figura 5a) e tribômetro tipo pino sobre disco, conforme norma ASTM-G99 (figura 5b).

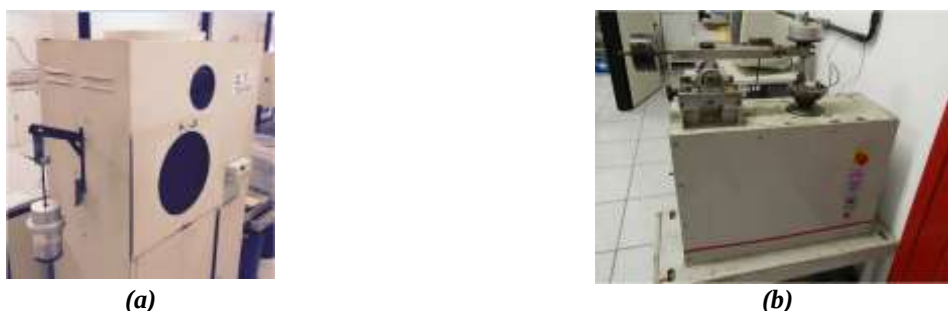


Figura 5. Abrasômetro tipo roda de borracha (a) e tribômetro pino sobre disco (b).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Composição Química

A tabela 4 apresenta os resultados de composição química obtidos na média de 3 análises retiradas em amostras de bloco Y, sendo no início, meio e final de vazamento de cada liga e que se encontram dentro do especificado para os experimentos, exceto o valor de ferro da liga $\text{AlSi}_{10}\text{Cu}_{1,0}$ que se encontra 0,03 acima da faixa especificada.

Tabela 4. Especificação de composição química das ligas de AlSiCu

Ligas	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ni	Zn	Ti	Sn	Pb	Outros
$\text{AlSi}_6\text{Cu}_{3,5}$	6,50	1,08	3,20	0,151	0,182	0,069	0,494	0,022	0,059	0,189	0,311
$\text{AlSi}_8\text{Cu}_{3,0}$	8,89	0,73	2,76	0,221	0,079	0,105	0,848	0,020	0,032	0,137	0,274
$\text{AlSi}_{10}\text{Cu}_{1,0}$	10,72	1,03	1,03	0,204	0,060	0,059	0,444	0,022	0,010	0,105	0,274

3.2 Microscopia Óptica

As figuras 6(a), 6(b) e 6(c) apresentam as microestruturas das ligas na condição bruta de fundição, realizadas nas mesmas amostras onde foram medidas as durezas apresentado na figura 1.

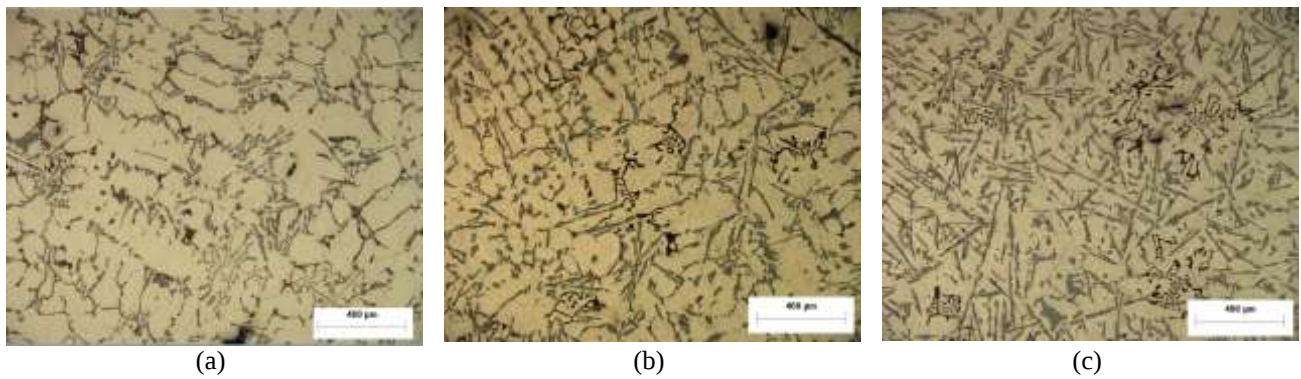


Figura 6. Microestrutura das ligas $\text{AlSi}_6\text{Cu}_{3,5}$ (a), $\text{AlSi}_8\text{Cu}_{3,0}$ (b) e $\text{AlSi}_{10}\text{Cu}_{1,0}$ (c) condição bruta de fundição, ataque HF 0,5%.

As figuras 7(a), 7(b) e 7(c) apresentam as microestruturas das ligas na condição após tratamento térmico de solubilização e envelhecimento. É possível observar a matriz de alumínio, regiões com a mistura eutética de fases alumínio- α , silício e precipitados de cobre, devido a presença deste elemento em sua composição química.

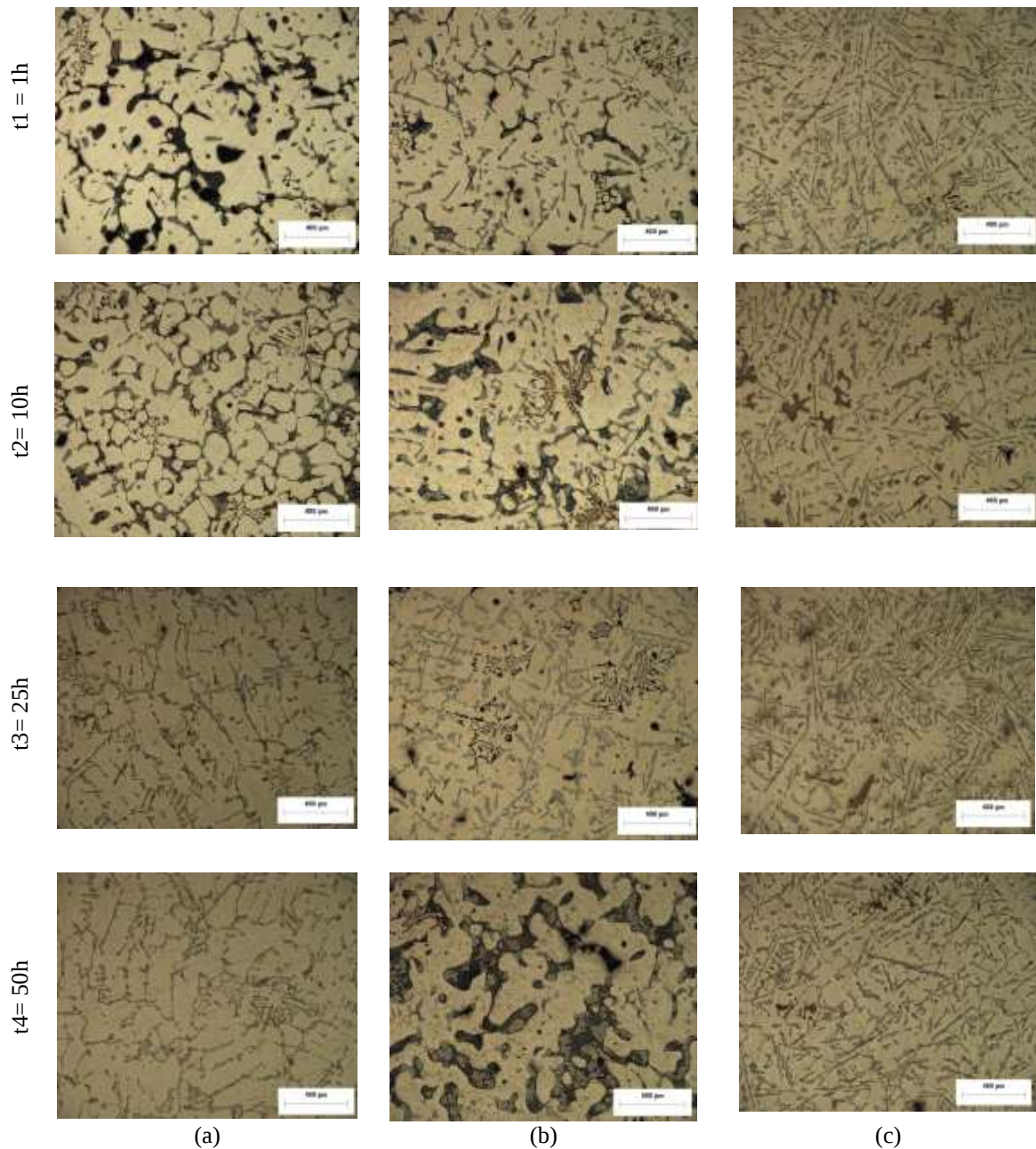


Figura 7. Microestrutura da liga $\text{AlSi}_6\text{Cu}_{3,5}$ (a), $\text{AlSi}_8\text{Cu}_{3,0}$ (b) e $\text{AlSi}_{10}\text{Cu}_{1,0}$ (c) condição após tratamento térmico, ataque HF 0,5%.

3.3 Propriedades Mecânicas

A figura 8(a) apresenta os resultados de dureza e alongamento e a figura 8(b) os resultados de resistência a tração na condição bruta de fundição. A figura 9(a) apresenta os resultados de dureza e a figura 9(b) os resultados de resistência a tração na condição após tratamento térmico incluindo-se a média dos valores obtidos na condição bruta de fundição (BF). De acordo com os resultados na condição bruta de fundição, é possível verificar que a liga $\text{AlSi}_8\text{Cu}_{3,0}$ apresentou os maiores valores de dureza sendo apenas 2,5% maior que a $\text{AlSi}_6\text{Cu}_{3,5}$ e 12% maior que a liga $\text{AlSi}_{10}\text{Cu}_{1,0}$. Por outro lado, a liga $\text{AlSi}_{10}\text{Cu}_{1,0}$ apresentou o maior valor de alongamento. Para os valores de resistência à tração e limite de escoamento, as ligas se mantiveram na mesma ordem obtidas com a dureza, apenas com seus respectivos valores.

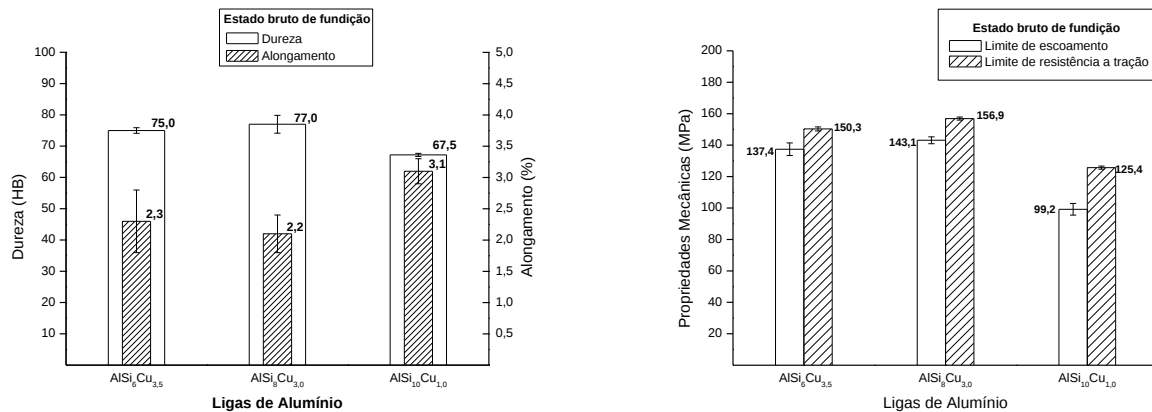


Figura 8. Dureza e alongamento (a) e resistência a tração e limite de escoamento (b) na condição de bruto de fundição.

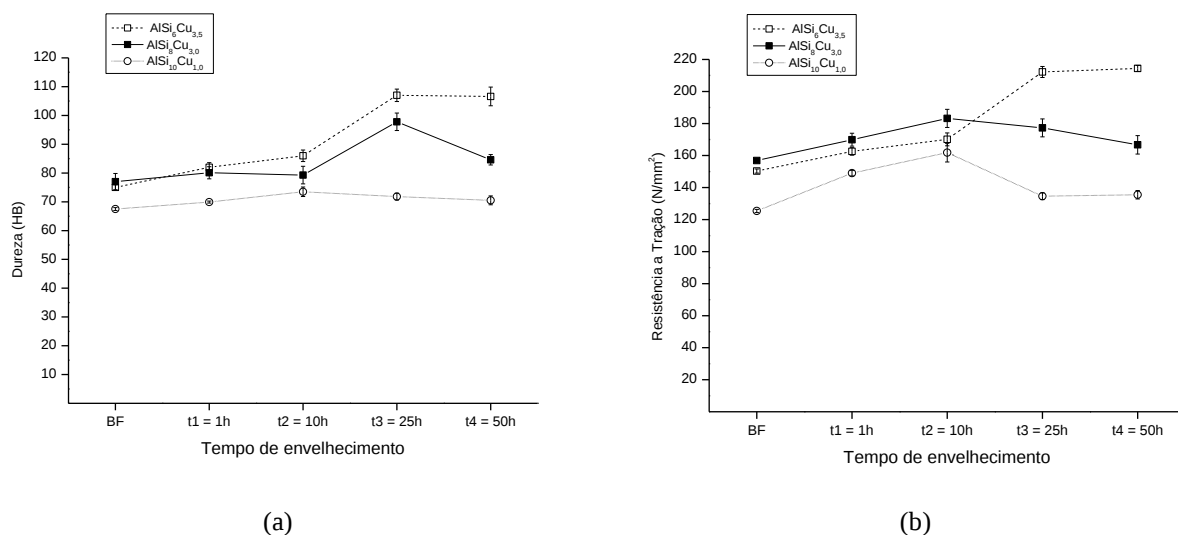


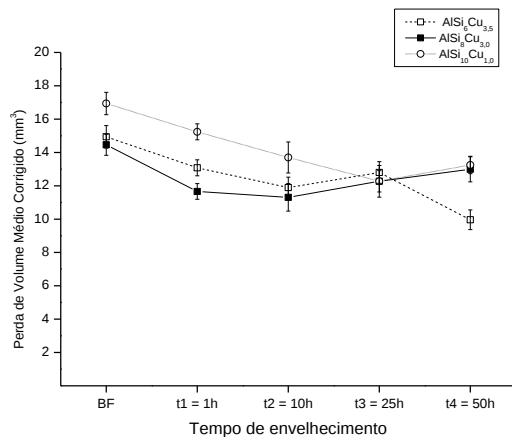
Figura 9. Dureza (a) e Resistência a tração (b) na condição após tratamento térmico.

Na condição após tratamento térmico, observa-se que a liga $\text{AlSi}_6\text{Cu}_{3,5}$ nos tempos de 10, 25 e 50h apresentaram os maiores resultados de dureza e a liga $\text{AlSi}_{10}\text{Cu}_{1,0}$ em todos os tempos de tratamentos obteve os menores resultados. Em relação a liga $\text{AlSi}_8\text{Cu}_{3,0}$ houve uma equiparação com a liga $\text{AlSi}_6\text{Cu}_{3,5}$ no tempo de 1h e uma redução significativa no tempo de 50h, provavelmente atribuída a um crescimento excessivo dos precipitados.

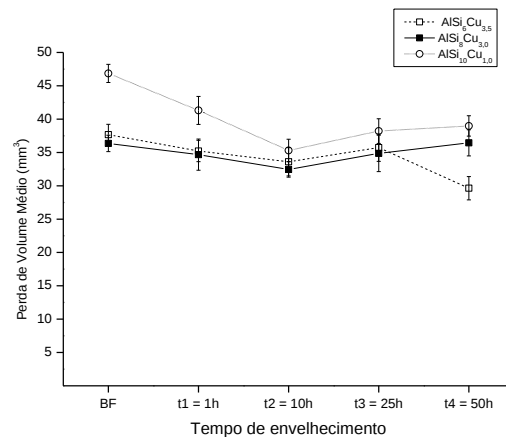
Em relação a resistência a tração e fazendo uma correlação com os valores de dureza, observa-se uma semelhança na condição bruta de fundição e uma discrepância na condição após tratamento térmico, sendo que no tempo de 1 e 10h a liga $\text{AlSi}_8\text{Cu}_{3,0}$ apresentou valores superiores a liga $\text{AlSi}_6\text{Cu}_{3,5}$. Já a liga $\text{AlSi}_{10}\text{Cu}_{1,0}$, apresentou os menores valores de resistência à tração em todos os tempos de tratamento, provavelmente em função do menor teor de cobre e morfologia do silício.

3.4 Desgaste Tipo Roda de Borracha e Pino sobre Disco

As figuras 10(a) e 10(b) apresentam respectivamente os resultados de perda de volume após ensaio de desgaste tipo roda de borracha e pino sobre disco na condição bruta de fundição e após tratamento térmico. Observa-se que há uma correlação com os resultados de dureza, tendo apresentado a maior perda de volume em ambos os ensaios a liga $\text{AlSi}_{10}\text{Cu}_{1,0}$. A liga $\text{AlSi}_8\text{Cu}_{3,0}$ apresentou os menores valores nos tempos de 1, 10 e 25h e a liga $\text{AlSi}_6\text{Cu}_{3,5}$ no tempo de 50h. O aumento de perda de volume ocasionado na liga $\text{AlSi}_8\text{Cu}_{3,0}$ no tempo de 50h pode estar associado a presença de porosidades.



(a)

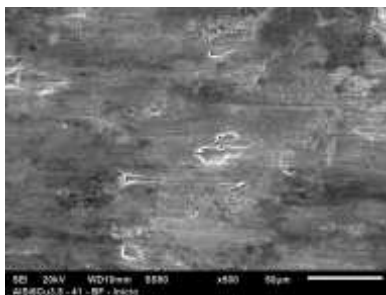


(b)

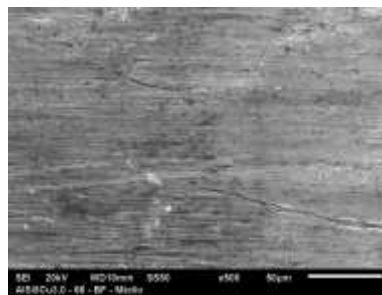
Figura 10. Perda de volume de desgaste roda de borracha (a) e pino sobre disco (b).

3.7 Microscopia Eletrônica de Varredura

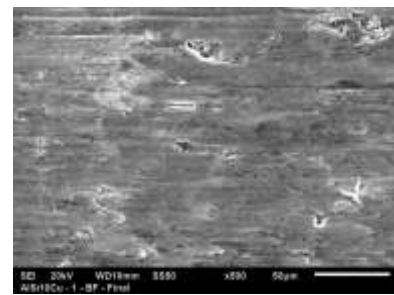
As figuras 11(a), 11(b) e 11(c) apresentam as pistas de desgastes na condição bruta de fundição após ensaio do tipo roda de borracha.



(a)



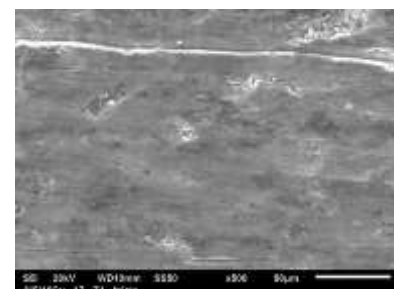
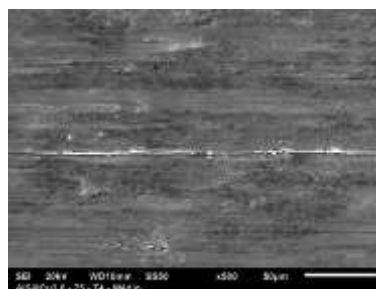
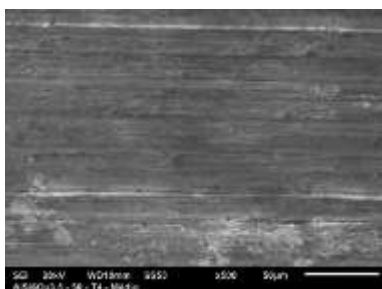
(b)



(c)

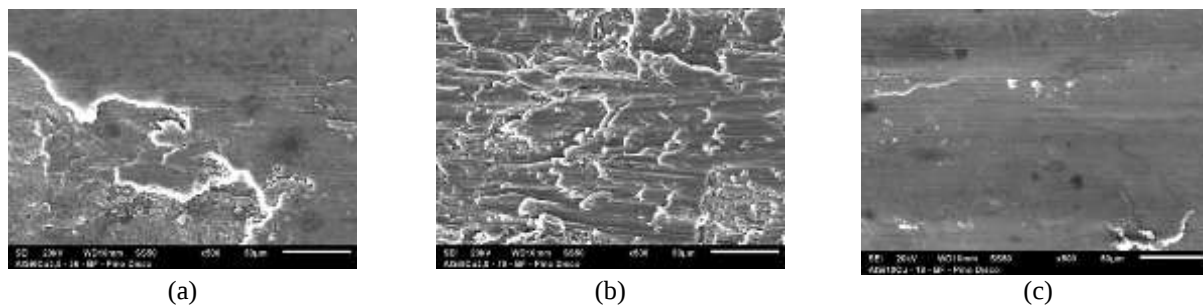
Figura 11. Pista de desgaste das ligas $\text{AlSi}_6\text{Cu}_{3,5}$ (a), $\text{AlSi}_8\text{Cu}_{3,0}$ (b) e $\text{AlSi}_{10}\text{Cu}_{1,0}$ (c) na condição bruta de fundição após ensaio de desgaste roda de borracha.

As figuras 12(a), 12(b) e 12(c) apresentam as pistas de desgastes na condição após tratamento térmico e ensaios do tipo roda de borracha.



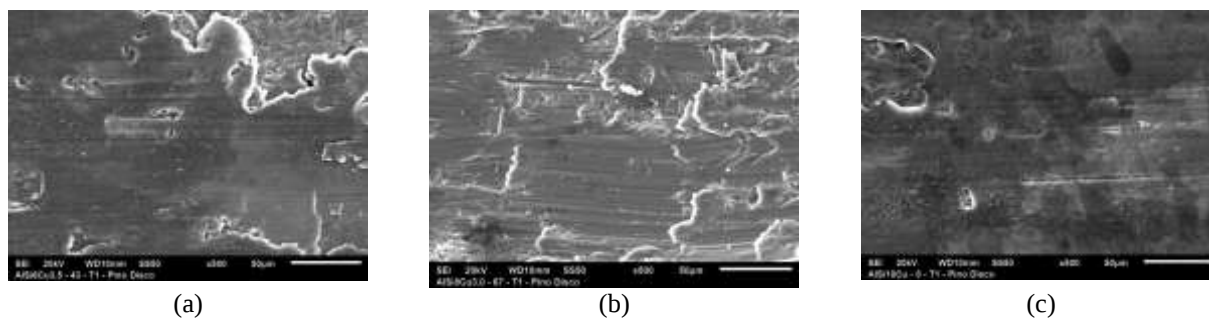
(a) (b) (c)
Figura 12. Pista de desgaste das ligas $\text{AlSi}_6\text{Cu}_{3,5}$ (a), $\text{AlSi}_8\text{Cu}_{3,0}$ (b) e $\text{AlSi}_{10}\text{Cu}_{1,0}$ (c) na condição bruto de fundição após ensaio de desgaste roda de borracha, tempo 50h.

As figuras 13(a), 13(b) e 13(c) apresentam as pistas de desgastes na condição bruta de fundição, após ensaios do tipo pino sobre disco.



(a) (b) (c)
Figura 13. Pista de desgaste das ligas $\text{AlSi}_6\text{Cu}_{3,5}$ (a), $\text{AlSi}_8\text{Cu}_{3,0}$ (b) e $\text{AlSi}_{10}\text{Cu}_{1,0}$ (c) na condição bruto de fundição após ensaio de desgaste pino sobre disco.

As figuras 14a, 14b e 14c apresentam as pistas de desgastes das ligas de alumínio na condição na condição após tratamento térmico após ensaio pino sobre disco.



(a) (b) (c)
Figura 14. Pista de desgaste das ligas $\text{AlSi}_6\text{Cu}_{3,5}$ (a), $\text{AlSi}_8\text{Cu}_{3,0}$ (b) e $\text{AlSi}_{10}\text{Cu}_{1,0}$ (c) na condição bruto de fundição após ensaio de desgaste pino sobre disco, tempo 50h.

Em relação ao ensaio de desgaste na condição bruta de fundição e após tratamento térmico, para o tipo roda de borracha, o mecanismo de desgaste predominante se dá pelo riscamento devido ao rolamento das partículas abrasivas sobre a superfície da amostra e não há ocorrência severa de deformação plástica. Em regiões pontuais há o arrancamento do material, provavelmente pela indentação de partículas abrasivas o que ocasiona a sua remoção. Em algumas amostras aparece o sulcamento provavelmente devido ao engastamento de partículas abrasivas à borracha da roda que ao deslizar sobre a superfície provoca o riscamento da mesma. Em relação ao ensaio de desgaste pino sobre disco, é possível verificar formação de tribofilmes devido a aglomeração de partículas, severa deformação plástica, trincas transversais ao sentido do deslizamento, ranhuras paralelas e possível formação de óxidos.

4 CONCLUSÃO

Baseado nos resultados obtidos através dos valores de dureza, resistência a tração, alongamento e perda de volume nos experimentos das ligas de alumínio, as seguintes conclusões foram obtidas:

- a liga $\text{AlSi}_{10}\text{Cu}_{1,0}$ apresentou os menores resultados de dureza, resistência a tração e consequentemente de perda de volume nos ensaios de desgaste, devido ao menor teor de cobre em sua composição química e quantidade de precipitados formados;
- a liga $\text{AlSi}_6\text{Cu}_{3,5}$ apresentou praticamente os melhores resultados de dureza em todos os tempos de tratamento de envelhecimento e resistência a tração apenas nos tempos de 25 e 50h, sendo mais eficiente na perda de volume apenas no tempo de envelhecimento de 50h;
- o tratamento de solubilização e envelhecimento se mostrou eficiente principalmente nos tempos de 1, 10 e 25h para a liga $\text{AlSi}_8\text{Cu}_{3,0}$ onde foram encontrados os menores resultados de perda de volume; e
- vários mecanismos de desgaste ocorreram podendo notar principalmente a fragilidade da superfície desgastada na presença de trincas, porosidades e de indentação de materiais removidos.

5 AGRADECIMENTOS

- Agradecemos a UNISOCIESC, CETEF/MG e UNESCO pela realização dos ensaios em seus Laboratórios e a Metalúrgica MDS pelo suporte financeiro.

6 REFERÊNCIAS

- 1 Corradi, E. O. Modelos matemáticos para relação entre composição química, microestrutura e propriedades mecânicas de ligas de alumínio fundidas hipoeutéticas e eutéticas, CEFET-MG, 2006.
- 2 Kori, S.A.; Prabhudev, M.S. Sliding wear characteristics of Al-7Si-0,3Mg alloy with minor additions of copper at elevated temperature, 2010.
- 3 Abouei, V. ; Shabestan, S.G.; Saghafian, H. Dry sliding behaviour of hypereutectic Al-Si piston alloys containing iron-rich intermetallics, 2010.
- 4 Chandrashekharaia, T.M.; Kori, S.A. Effect of grain refinement and modification on the dry sliding wear behaviour of eutectic Al-Si alloys, 2008.
- 5 Brankovic, M. Wear mechanisms. In: Laboratoire de Tribologie et Dynamique des Systèmes, Ecole Centrale de Lyon, France, 1998.
- 6 Duarte, I.R., Oliveira, C.A.S. Processamento de ligas de alumínio-silício fundidas, 2009.
- 7 ASM Handbook. Casting, vol. 15, 1998.

7 DIREITOS AUTORAIS

- Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no trabalho.

WEAR STRENGTH BEHAVIOR EVALUATE OF ALUMINUM ALLOY SUBMITTED TO SOLUTIONIZING AND AGING HEAT TREATED

Márcio Antônio Paulo, marciotkf@ig.com.br¹

Kassim S. Al-Rubaie, kassim.alrubaie@sociesc.org.br¹

¹UNISOCIESC. Albano Schimidt street nº333 Boavista – Joinville-SC Zip Code 89206-001

Abstract. This work presents a experimental methodology to evaluate the mechanical properties and wear strength in AlSiCu alloy submitted to the solution-treated, quenched and artificial aged in order to establish the wear severity of the material. The characterization techniques used were spectroscopy, metallography, mechanical testing, hardness (HB), wear strength, superficial analysis (ground surface finish), pin-on-disc wear (ASTM-G99-05) and rubber wheel wear (ASTM-G65-04). For studies of heat treatment, samples were solution-treated to 500°C for 5 hours, quenched and artificial aged temperature of 180°C with periods of 1, 10, 25 and 50 hours, that provides changes in microstructures that are important for mechanical properties development as increase in hardness, mechanical strength, machinability and dimensional stability, and reduces residual stresses. For this study were chosen 3 alloys, like AlSi₆Cu_{3,5}, AlSi₈Cu_{3,0} and AlSi₁₀Cu. The chemical composition were carried out just on casting samples, so the mechanical testing, microstructures (optical and scan), pin-on-disc and wheel rubber wear, ground surface finish were carried out in two conditions: casting and after treatment. The chemical elements are within the specification and the alloy AlSi₈Cu_{3,0} obtained the best measurements results of hardness in casting condition and the alloy AlSi₆Cu_{3,5} after heat treatment with period of 10, 25 e 50h hours being equivalent just in the 1 hour of treatment. As the pin-on-disc and wheel rubber wear results, presented smaller weight loss in casting the AlSi₈Cu_{3,0} and in the periods of 1, 10 and 25h of heat treatment and just in the 50 hours, the AlSi₆Cu_{3,5} present the best results than AlSi₈Cu_{3,0}.

Keywords: AlSiCu, Heat treatment T6, Solution heat treatment, Aging, Precipitations