

INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS TÉRMICOS DE SOLIDIFICAÇÃO NA RESISTÊNCIA AO DESGASTE ABRASIVO DA LIGA Al-7%Si-0,3%Mg PARA APLICAÇÕES TRIBOLÓGICAS

Tamires Isabela Mesquita Botelho

¹Instituto Federal do Pará – IFPA, Faculdade de Engenharia de Materiais. Av. Alm. Barroso, 1155 - Marco, Belém - PA, 66093-020
tamiresisabela@yahoo.com.br¹ – autor para correspondência

Hugo André Magalhães de Azevedo

¹Instituto Federal do Pará – IFPA, Faculdade de Engenharia de Materiais. Av. Alm. Barroso, 1155 - Marco, Belém - PA, 66093-020
hugo_azevedo@hotmail.com

Maria Adrina Paixão de Souza da Silva,

²Universidade Federal do Pará – UFPA, Faculdade de Engenharia de Mecânica. Av. R. Augusto Corrêa, 1 - Guamá, Belém - PA, 66075-110
mariaestillac@gmail.com²

Thiago Antônio Paixão de Sousa Costa

¹Instituto Federal do Pará – IFPA, Faculdade de Engenharia de Materiais. Av. Alm. Barroso, 1155 - Marco, Belém - PA, 66093-020
thiago.costa@fem.unicamp.br

Otávio Fernandes Lima da Rocha

¹Instituto Federal do Pará – IFPA, Faculdade de Engenharia de Materiais. Av. Alm. Barroso, 1155 - Marco, Belém - PA, 66093-020
otavio.rocha@ifpa.edu.br

Resumo. As ligas à base de alumínio podem apresentar atraentes características tribológicas, tais como baixo peso específico e autolubrificação. A adição de elementos de liga capazes de formar fases endurecedoras tem por objetivo aumentar a resistência mecânica do material, permitindo o seu emprego sob condições mais severas de carregamento. As características microestruturais, isto é, morfologia, distribuição e dimensão das fases estão intimamente relacionadas aos parâmetros térmicos de solidificação, os quais possuem efeito direto sobre o comportamento tribológico dos materiais. O estudo do comportamento ao desgaste dos materiais é extremamente relevante dado o custo de manutenção e risco de acidentes provocados por falhas originadas a partir do colapso de componentes mecânicos, sobretudo os metálicos, quando estão em atrito. O presente trabalho tem como objetivo avaliar a influência da velocidade de avanço da isoterma liquidus (V_L) e da taxa de resfriamento (T_R) sobre a resistência ao desgaste micro-abrasivo da liga Al-7%Si-0,3%Mg, solidificada sob condições unidirecionais e transientes de extração de calor, em dispositivo horizontal refrigerado à água. Foram propostas equações correlacionando os resultados de volume desgastado com os parâmetros térmicos de solidificação (V_L e T_R). Observou-se que maiores volumes e taxas de desgaste foram obtidos para menores valores V_L e T_R .

Palavras chave: Ligas Ternárias. Desgaste Micro-Abrasivo. Resistência ao Desgaste.

1. INTRODUÇÃO

Em processos industriais, níveis acentuados de desgaste em componentes mecânicos afetam diretamente a capacidade produtiva de uma planta fabril, seja pela necessidade de redução de carga de trabalho de um dado equipamento, ou mesmo pela obrigatoriedade de parada para manutenção corretiva devido o desgaste (Cozza, 2011). Assim é de suma importância entender os mecanismos e a vida útil do componente para determinadas condições operacionais.

As ligas de alumínio-silício-magnésio são ligas de fundição da série A356, tratada termicamente por endurecimento por precipitação para aumento de resistência e podem ser utilizada como elemento estrutural na indústria automobilística e aeronáutica. As ligas Al-Si são utilizadas na forma de componentes fundidos principalmente em peças essenciais de sistemas automotivos, como pistões, válvulas, blocos de motores, etc. Estas aplicações demandam estudos criteriosos no sentido de melhorar as características da resistência ao desgaste desta classe de ligas. Tanto ligas Al-Si hipoeutéticas quanto hipereutéticas têm sido estudadas e aplicadas a componentes tribológicos. Entretanto, são muito poucos os estudos dirigidos especificamente à análise da influência de aspectos microestruturais sobre a resistência ao desgaste. (Prasada, 2004).

O presente trabalho tem como objetivo geral desenvolver correlações entre os parâmetros térmicos de solidificação direcional horizontal em regime transiente em relação ao desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa fixa de ligas do sistema ternário Al-7%Si-0,3%Mg.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

2.1. Solidificação da Liga

A liga analisada foi solidificada em um dispositivo de solidificação direcional horizontal, cuja representação esquemática é mostrada na Figura 1, o alojamento de uma lingoteira fabricada a partir de chapa de aço inoxidável com geometria retangular nas dimensões de aproximadamente 60 x 60 x 160 mm e 3 mm espessura, projetado de tal maneira que o calor do metal líquido fosse extraído somente através de um sistema refrigerado a água com vazão de 19 L/min. Para obtenção das temperaturas *liquidus* (615°C) e *solidus* (557°C), foram inseridos no interior da lingoteira 8 termopares tipo K posicionados a 2,10,15,20,30 e 50 mm de distância em relação à câmara de refrigeração. A temperatura de vazamento ocorreu em temperatura ambiente a 27°C. A obtenção das curvas de resfriamento foi por meio do registrador de temperaturas FieldLogger, configurado para registrar um ponto a cada dois décimos de segundo.

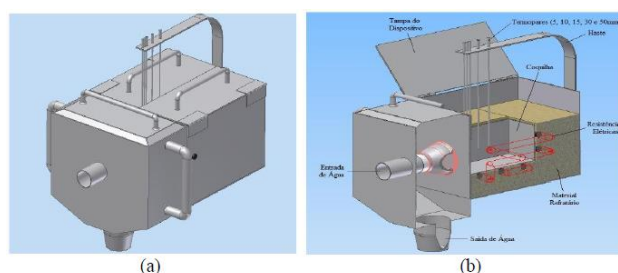


Figura 1. Dispositivo de solidificação (a) e vista interna (b) (Acervo do GPMET/IFPA e GPSOL/UFGA).

2.2. Ensaio de Desgaste por Esfera Rotativa Fixa

Amostras foram extraídas do lingote solidificado com secção de 15 x 20mm, conforme esquema apresentado na Figura 2. Para a realização dos ensaios de desgaste, estas foram submetidas ao processo de lixamento com as lixas 800 e 1200 *mesh* e polidas com pasta de diamante de 3 e 1µm, onde se obteve o acabamento superficial final. Após isso o ensaio de desgaste micro-abrasivo que foi realizado sob deslizamento a seco e sem a adição de solução abrasiva para evitar a presença de qualquer elemento interfacial externo à liga. As esferas usadas nos testes foram de aço AISI 52100 (usado em rolamentos) com microdureza de 850 HV, diâmetro de 1". A velocidade de deslizamento empregada (*W*) foi de $W = 370$ RPM e a carga de contato normal aplicada à peça ensaiada foi de 0,5 N. As distâncias deslizantes (*SD*), que tem sido, calculado segunda equação 1 para os quatro tempos (7, 14, 21, e 28 minutos) de teste assumidos foram: 207m, 413m, 620m e 827m. Para cada tempo foi feito duplicatas do ensaio no mesmo corpo de prova, afim de aumentar a confiabilidade dos resultados.

$$SD = W \cdot t \cdot 2\pi \cdot R \quad (1)$$

Onde:

D é o diâmetro da calota desgastada; e *R* é o raio da esfera.

A Figura 3(a) ilustra a realização do ensaio e a Figura 3(b) mostra o arranjo do equipamento utilizado para os ensaios.

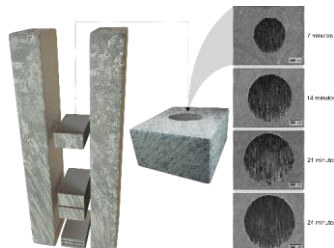


Figura 2. Esquema ilustrativo do lingote solidificado após os cortes feitos para obtenção das amostras para o ensaio de desgaste.

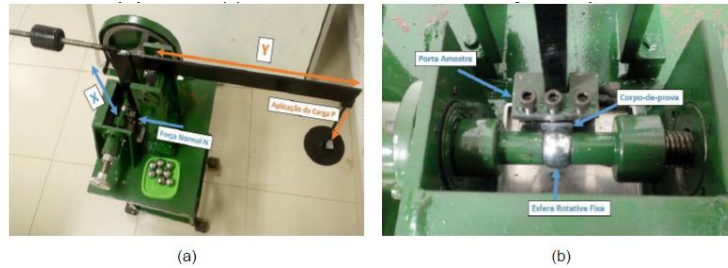


Figura 3. Equipamento utilizado na avaliação da resistência ao desgaste (a) Estrutura física do equipamento e (b) Detalhe da amostra durante realização do experimento (Monteiro Junior, 2017).

O volume desgastado é uma importante grandeza a ser analisada para a caracterização da resistência ao desgaste de determinado material, e pode ser obtida a partir da análise geométrica da impressão da esfera sobre o corpo de prova que tem o formato de uma calota esférica (Figura 2).

Considerando $R \gg h$, o cálculo do volume desgastado pode ser obtido pela Eq. (2) (Freitas, 2013):

$$V_D = \pi \frac{d^4}{64R} \quad (2)$$

3. RESULTADOS

Os dados térmicos da liga solidificada em condição transiente de extração de calor, gravados através de 8 termopares posicionados ao longo do comprimento do lingote durante o processo de solidificação, estando estas na Figura 4(a), onde se destaca, também, a temperatura liquidus (T_L) da liga analisada, indicada pela linha horizontal. Estes perfis térmicos, então, possibilitaram a observação da cinética de solidificação [$P = f(t)$] e a determinação dos parâmetros térmicos, tais como a Taxa de Resfriamento (T_R) e Velocidade de deslocamento da Isoterma Liquidus (V_L), ou velocidade de solidificação. Informações adicionais referentes à caracterização macro e microestrutural da liga estudada, bem como análises preliminares de microsegregação via resultados de EDS podem ser visualizadas na literatura por Barbosa, *et al.*, 2019. De posse dos dados de parâmetros térmicos, foi possível expressar a correlação entre a posição da isoterma liquidus em relação à base refrigerada (P), e o tempo de ensaio até aquele ponto (t), o que foi feito por meio de uma expressão matemática do tipo potência, dada por $P = 6 (t)^{0,8}$, como mostra a Figura 4(b). Em seguida, foi determinada a derivada da posição de modo a se obter a relação entre a velocidade de avanço da isoterma liquidus, isto é, $d[6 (t)^{0,8}]/dt$ resultou nos valores de V_L para os já determinados valores de t , o que pôde ser, então, traduzido para $V_L = f(P)$. Ambos V_L e T_R como $f(P)$ estão expressos na Figura 4(c).

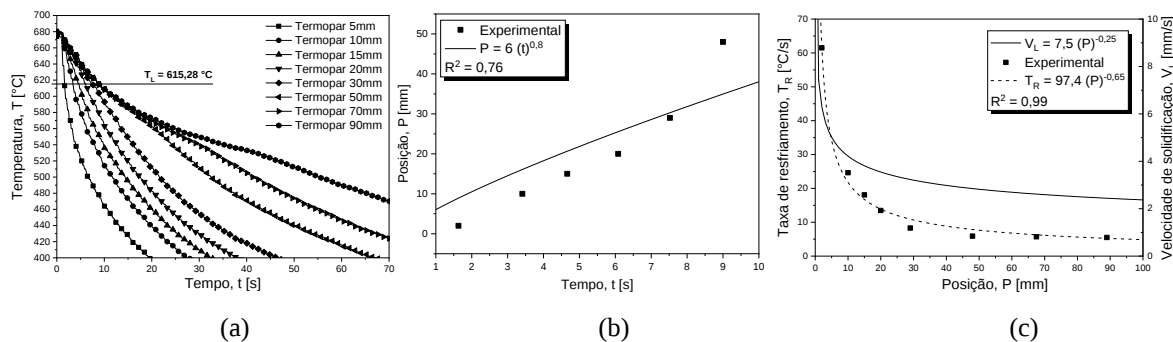


Figura 4. Resultados da análise térmica da solidificação da liga - (a) Perfis térmicos experimentais; (b) cinética de solidificação, $P = f(t)$; e (c) Taxa de resfriamento e velocidade de deslocamento da isoterma liquidus, $T_R = f(P)$ e $V_L = f(P)$.

A Figura 5 apresenta, para cada amostra ensaiada, os resultados do volume de desgaste em função da distância total percorrida (D_p) observa-se pela Figura 6(a) um aumento crescente de V_D com o a distância percorrida da esfera (ou deslizada). Evidencia-se somente para o maior tempo de ensaio ($t = 28 \text{ min}$) maiores valores de V_D para a posição mais afastada da base refrigerada ($P = 80 \text{ mm}$). A Figura 6(b), mostra para duas amostras ensaiadas, as crateras (ou calotas) resultantes do ensaio micro-abrasivo nos tempos assumidos. Obviamente, se tem maiores diâmetros de calotas para os maiores tempos de ensaio e distâncias percorridas.

A Figura 6(a) e (b) apresentam a dependência de V_D e T_D como uma função de V_L e T_R . Observa-se maiores valores de V_D e T_D para menores valores de V_L e T_R , isto é, para posições mais afastadas da interface refrigerada. Observa-se que a dependência de V_D e T_D sobre V_L e T_R pôde ser caracterizada por expressões matemáticas experimentais na forma $V_D = 0,006 t \times (V_L, T_R)^{cte}$ e leis individuais para os casos de $T_D = f(V_L, T_R)$.

Em trabalhos posteriores, estudos de correlação de volume de desgaste e distância total percorrida com parâmetros microestruturais podem ser realizados, bem como da influência dos compostos intermetálicos e segregações nos resultados de desgaste observados, porém, a análise dos resultados com os parâmetros térmicos já proporciona um bom espectro de análises, visto que a cinética do processo afeta significativamente tanto a macro/microestrutura da liga quanto à existência de segundas fases e segregações.

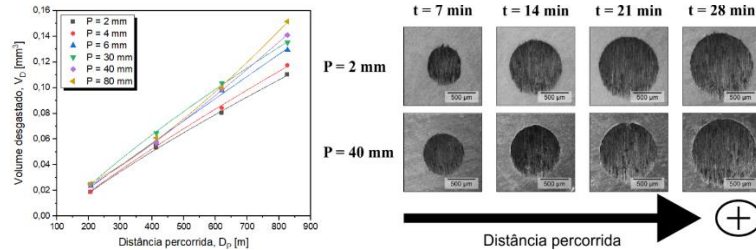


Figura 5. Resultado dos ensaios de desgaste da liga analisada, em termos de $V_D = f(D_P)$. Exemplos de calotas resultantes dos ensaios são dados para posições específicas do lingote.

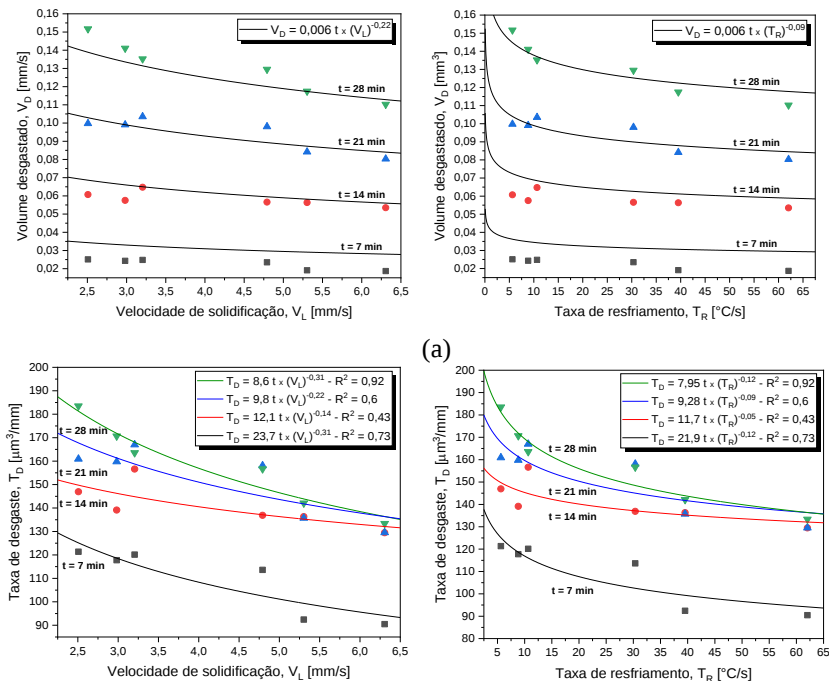


Figura 6. Correlação entre a resistência ao desgaste e parâmetros térmicos de solidificação da liga – (a) $V_D = f(V_L, T_R)$; e (b) $T_D = f(V_L, T_R)$.

4. CONCLUSÕES

1. Maiores volumes e taxas de desgastes foram obtidos para menores valores de V_L e T_R .
2. A dependência dos volumes e taxas de desgaste sobre os valores de V_L e T_R pôde ser caracterizada por meio de equações matemáticas experimentais dadas por: $V_D = 0,006 t \times (V_L)^{-0,22}$; $V_D = 0,006 t \times (T_R)^{-0,09}$ e leis individuais também do tipo potencia para $T_D = f(V_L, T_R)$ na forma de $T_D = a t \times (V_L, T_R)^b$ onde $T_D = f(V_L)$ – 7 min: $a = 23,7$ e $b = -0,31$; 14 min: $a = 12,1$ e $b = -0,14$; 21 min: $a = 9,8$ e $b = -0,22$; e 28 min: $a = 8,6$ e $b = -0,31$. $T_D = f(T_R)$ – 7 min: $a = 21,9$ e $b = -0,12$; 14 min: $a = 11,7$ e $b = -0,05$; 21 min: $a = 9,28$ e $b = -0,09$; e 28 min: $a = 7,95$ e $b = -0,12$.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores reconhecem o apoio financeiro disponibilizado pelo IFPA – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará, a UFPA – Universidade Federal do Pará, o CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (Processos: 302846/2017-4 e 400634/2016- 3), e a CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior.

6. REFERÊNCIAS

- Barbosa, C.R, Lima, J.O, Machado, G.M.H, Azevedo, H.A, Rocha, F.S, Barros, A.S, Rocha, O.F.L. 2019. "Relationship Between Aluminum-Rich/Intermetallic Phases and Microhardness of a Horizontally Solidified AlSiMgFe Alloy" In *Materials Research*.
- Cozza, R.C., 2011. *Estudo do desgaste e atrito em ensaios micro-abrasivos por esfera rotativa fixa em condições de força normal constante e pressão constante*. Tese de doutorado, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Freitas, E. S. F. 2013. *Desenvolvimento de Correlações entre Microestruturas de Solidificação e Resistências ao Desgaste e à Corrosão*. Tese de doutorado. Universidade Estadual de Campinas.
- L.I. Rurxia, L.I. Rong-de, Z. Yu-hua, L.I. Cherrxi, S. Xiao-feng, G. Heng-rong, H. Zhuang-qi, Trans. 2004. Nonferrous Met. Soc. China 14 (3) 496–505.
- MONTEIRO JUNIOR, P.L. 2017. *Construção e aferição de um equipamento de ensaio de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa fixa*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Pará. Faculdade de Engenharia mecânica.
- A.K. Prasada, K. Das, B.S. Murty, M. Chakraborty, 2004. Effect of grain refinement on wear properties of Al and Al-7Si alloy. *Wear*, v. 257, pp. 148-153.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.

INFLUENCE OF THE SOLIDIFICATION THERMAL PARAMETERS ON THE ABRASIVE WEAR RESISTANCE OF THE Al-7%Si-0,3%Mg ALLOY FOR TRIBOLOGIC APPLICATIONS

Tamires Isabela Mesquita Botelho

¹Federal Institute of Pará – IFPA, Faculty of Materials Engineering, 1155 Almirante Barroso Ave. - Marco, Belém - PA, 66093-020
tamiresisabela@yahoo.com.br¹ – corresponding author

Hugo André Magalhães de Azevedo

¹Federal Institute of Pará – IFPA, Faculty of Materials Engineering, 1155 Almirante Barroso Ave. - Marco, Belém - PA, 66093-020
hugo_azevedo@hotmail.com

Maria Adrina Paixão de Souza da Silva,

²Federal University of Pará – UFPA, Faculty of Mechanical Engineering, 1 Augusto Corrêa St. - Guamá, Belém - PA, 66075-110
mariaestillac@gmail.com²

Thiago Antônio Paixão de Sousa Costa

¹Federal Institute of Pará – IFPA, Faculty of Materials Engineering, 1155 Almirante Barroso Ave. - Marco, Belém - PA, 66093-020
thiago.costa@fem.unicamp.br

Otávio Fernandes Lima da Rocha

¹Federal Institute of Pará – IFPA, Faculty of Materials Engineering, 1155 Almirante Barroso Ave. - Marco, Belém - PA, 66093-020
otavio.rocha@ifpa.edu.br

Abstract. Aluminum-based alloys may have attractive tribological characteristics, such as low specific weight and self-lubrication. The addition of alloying elements capable of forming hardening phases aims to increase the mechanical strength of the material, allowing its use under severe loading conditions. The microstructure characteristics, i.e., morphology, distribution and phase dimensions are closely related to the solidification thermal parameters, which have a direct effect on the tribological behavior of the materials. The study of wear behavior of materials is extremely relevant given the maintenance cost and risk of accidents caused by the failures provided by the collapse of mechanical components, especially metallic ones, when in friction. The aim of this study is to evaluate the influence of the tip growth rate (V_L) and the cooling rate (T_R) on the micro-abrasive wear resistance of the Al-7% Si-0.3% Mg alloy, solidified under unidirectional and transient heat extraction conditions in a horizontal water cooled device. Equations were proposed by correlating the results of worn volume against the solidification thermal parameters (V_L and T_R). It was observed that increasing wear volumes and wear rates were obtained for lower V_L and T_R values.

Keywords: Ternary alloys. Micro-Abrasive Wear. Wear Resistance.

RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are the only ones responsible for the printed material included in this paper.