

## **INFLUÊNCIA DOS TRATAMENTOS TÉRMICOS DE SOLUBILIZAÇÃO E PRECIPITAÇÃO ARTIFICIAL NA RESISTÊNCIA AO DESGASTE MICROABRASIVO DE LIGAS DE ALUMÍNIO 6201**

Clayton Rovigatti Leiva, crleiva@hotmail.com<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade de Brasília - UnB

**Resumo:** A partir de um vergalhão composto por liga de alumínio AA6201, utilizado como insumo na fabricação de fios para produção de cabos condutores CAL900, foram retiradas amostras para realização dos presentes ensaios. Um conjunto de amostras foi solubilizado a 520°C por 2 horas e o outro conjunto de amostras foi solubilizado a 520°C por 2 horas e envelhecido artificialmente a 170°C por 36 horas. Como medida de caracterização preliminar, foi realizado o ensaio de Microdureza Vickers, sendo que a amostra envelhecida apresentou microdureza 66% superior. Foram então realizados ensaios de desgaste microabrasivo utilizando-se um tribômetro de esfera livre, com esfera de aço 100 Cr6 e velocidade de cerca de 103 rpm ou 0,137 m/s. As calotas de desgaste foram medidas e os coeficientes de desgaste calculados a partir de fórmula de Archard, sendo que a amostra envelhecida apresentou a média do coeficiente de desgaste 13% menor. A morfologia das calotas foi avaliada sob microscopia ótica digital e microscopia eletrônica de varredura. Algumas das amostras envelhecidas apresentaram exclusivamente desgaste abrasivo por rolamento. Em todos os demais ensaios, foi identificada a ocorrência de áreas da calota acometidas por desgaste abrasivo por rolamento, de grau moderado, em conjunto com áreas de desgaste severo, sendo que as proporções de cada mecanismo tiveram grande variação, não necessariamente vinculando-se ao tempo de ensaio e distância de deslizamento. A região de desgaste severo apresentou-se com incidência de deformação plástica e regiões em cava de formato irregular, com superfícies internas de aspecto granular. A composição química no interior das cavas foi avaliada com a utilização do EDS, e mostrou-se rica em ferro e cromo, diferentemente da região de fora da cava, na qual a análise elementar aponta apenas a ocorrência de alumínio e oxigênio. Embora o mecanismo envolvido na produção das cavas na região de desgaste severo não tenha ficado completamente esclarecido, acredita-se que o acúmulo do material mais duro, composto por ferro e cromo, provavelmente proveniente da degradação da esfera, tenha intensificado a deformação plástica nessas regiões.

**Palavras-chave:** Al6201, tratamento térmico, desgaste microabrasivo, coeficiente de desgaste

### **1. INTRODUÇÃO**

As ligas de alumínio fornecem boa relação entre resistência mecânica, resistência à corrosão, processos de conformação, leveza e custo, e encontram inúmeras aplicações em áreas como transporte, construção, arquitetura, embalagens e na indústria elétrica e eletrônica, particularmente em cabos elétricos de alta tensão.

Os cabos condutores de energia consistem em conjuntos de fios metálicos individuais torcidos, gerando uma estrutura complexa que combina resistência axial e rigidez com flexibilidade. Estes cabos podem apresentar danos que reduzem de forma acentuada a sua vida em serviço, causados principalmente por vibrações eólicas. O vórtice promovido pelo vento produz oscilações verticais em alta faixa de frequência, podendo atingir a frequência de ressonância do cabo condutor (AGGARWAL et al., 2000). Este fenômeno causa tensões de flexão alternadas nos fios que compõem os cabos, o que pode gerar fadiga e desgaste, promovendo falhas parciais ou completas nas linhas de transmissão, principalmente nos pontos de restrição ao movimento, tais como grampos de suspensão, espaçadores e outros dispositivos de fixação (ZHOU, et al., 1996).

Os tratamentos térmicos expandem o uso desses materiais e apresentam-se como método eficaz para melhoria da resistência ao desgaste.

As ligas de alumínio são divididas em duas grandes categorias: fundidas e conformadas. Outra importante classificação diz respeito a composição química das ligas, que as subdivide em famílias (Metals Handbook v.2, 1992). Algumas ligas, geralmente das famílias 2xxx, 6xxx e 7xxx, são tratáveis termicamente por solução. Elas também podem ser reforçadas por deformação controlada a frio a temperatura ambiente (Diniz, 2018).

A família 6000 contém magnésio e silício como seus principais elementos de liga. A combinação desses elementos de liga resulta no elemento intermetálico Mg<sub>2</sub>Si, que é responsável pelo endurecimento, antes de atingir o equilíbrio no

envelhecimento. Quando os tratamentos desta liga são feitos de maneira adequada, a presença do  $Mg_2Si$  favorece a formação de finos precipitados homogeneamente distribuídos no material, o que resulta em aumento substancial da dureza (Kalombo *et al.*, 2015).

O tratamento térmico de solubilização da liga Al6201 consiste em elevar a temperatura acima da linha *solvus* do diagrama pseudo-binário Al- $Mg_2Si$  e deixá-lo pelo tempo necessário para que as fases do  $Mg_2Si$  presentes na liga sejam solubilizadas na matriz do alumínio, resfriando-a abruptamente para que não haja tempo para a formação da fase  $Mg_2Si$ , que permanece em solução (Quadro *et al.*, 2012).

Para retornar ao estado de menor energia, o material tenderá a iniciar um processo de precipitação. O processo de envelhecimento pode ser definido como sendo aquele no qual os elementos de soluto precipitam na matriz, devido a temperatura e tempo.

No envelhecimento artificial, após a solubilização e têmpera, a amostra é colocada no forno, com temperatura e tempos controlados (170°C aproximadamente) para que os precipitados apareçam de forma mais rápida (Diniz, 2018). Para as ligas de alumínio tratáveis termicamente, o endurecimento por precipitação é um dos principais meios para alcançar a resistência máxima (Souza, 2006).

Os efeitos do envelhecimento nas ligas de alumínio da família 6xxx são alcançadas quando as discordâncias são privadas, ou dificultadas, de movimento dentro da rede atômica. As partículas formadas durante processo de envelhecimento artificial podem agir como barreiras, endurecendo a liga (Reinke, 2021).

Além da dureza, os tratamentos térmicos podem induzir alterações significativas nas propriedades mecânicas das ligas, como a resistência ao desgaste.

## 2. DESGASTE

O desgaste é definido como a perda de material, muitas vezes expressa em termos de perda de massa por unidade de distância percorrida (Stachowiak, 2005). No que concerne aos mecanismos de desgaste, tradicionalmente classificam-se em desgaste adesivo, desgaste por fadiga, desgaste corrosivo e desgaste abrasivo (Fig.1), sendo que o último ainda pode ser subdividido segundo as configurações de contato, quais sejam, desgaste abrasivo por dois corpos e desgaste abrasivo por três corpos. Trata-se de uma classificação não exaustiva, sendo que esses mecanismos podem atuar em conjunto, havendo preponderância de uns sobre os outros, conforme o caso.

Desgaste adesivo é devido à ligação localizada entre superfícies sólidas em contato, levando à transferência de material entre as duas superfícies ou perda de qualquer uma das superfícies (ASTM G40 – 21). Ocorre quando a pressão de contato é suficiente para causar deformação plástica local e adesão. O desgaste é causado pela união pontual entre as superfícies sólidas em contato, gerando material de transferência entre as superfícies ou perda de material em uma das superfícies (Gobbi, 2018).

A fadiga da superfície é causada pelo deslizamento ou rolamento repetidos sobre uma trilha. Os repetidos ciclos de carga e descarga experimentados pelo material podem induzir as fissuras superficiais ou subsuperficiais que eventualmente resultará na ruptura da superfície com a formação de grandes fragmentos e deixando grandes buracos (Dwivedi, 2010).

Desgaste corrosivo é aquele em que a reação química ou eletroquímica com o ambiente é significativa (ASTM G40 – 21). É a degradação do material em que tanto desgaste e mecanismos de corrosão estão presentes (Souza, 2006).

Desgaste abrasivo é devido a partículas duras ou protuberâncias duras forçadas contra e se movendo ao longo de uma superfície sólida (ASTM G40 – 21). Caracteriza-se pelo deslocamento de material, causado pela presença de partículas duras, livres ou incrustadas em uma ou nas duas superfícies em movimento relativo ou pela presença de protuberâncias em uma ou nas duas superfícies em interação (Zum Gahr, 1987).

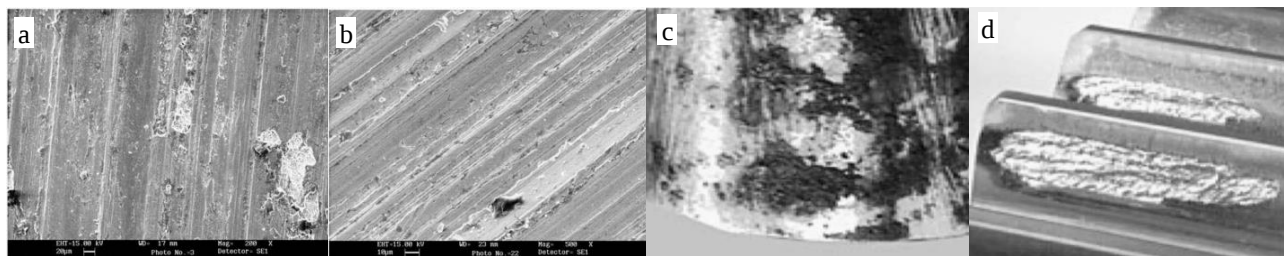


Figura 1. Micrografia dos diferentes tipos de desgaste: (a) desgaste adesivo, (b) desgaste abrasivo, (c) desgaste por corrosão, (d) desgaste por fadiga superficial. (Dwivedi, 2010, adaptado).

Mecanismos básicos para diferentes modos característicos de desgaste são: desgaste leve: delaminação e oxidação; grave: adesivo, difuso e abrasivo; scuffing: adesivo e difusivo; pontilhado: abrasivo; pitting: fadiga e ataque externo (Dwivedi, 2010).

O termo desgaste microabrasivo, também muito comum na literatura, não possui definição específica, uma vez que se enquadra no conceito de desgaste abrasivo. Entretanto alguns parâmetros podem ser utilizados para diferenciá-los. Enquanto no desgaste microabrasivo o coeficiente de desgaste varia entre  $1,0 \cdot 10^{-15}$  e  $2,5 \cdot 10^{-12} \text{ m}^3(\text{Nm})^{-1}$ , no desgaste abrasivo o coeficiente de desgaste varia entre  $1,0 \cdot 10^{-11}$  e  $1,2 \cdot 10^{-10} \text{ m}^3(\text{Nm})^{-1}$  (Dias, 2014).

O desgaste microabrasivo pode ser classificado em dois modos: desgaste microabrasivo por riscamento e desgaste microabrasivo por rolamento. Para ocorrência do desgaste abrasivo por rolamento, deve haver partículas livres ou soltas entre as duas superfícies (contra corpo e amostra), de forma que as partículas livres possam rolar entre elas (Hutchings, 1992).

Cozza et al. (2009; 2011) relatam a ocorrência de desgaste abrasivo por rolamento em adição ao desgaste abrasivo por riscamento, ou seja, ocorrência de desgaste abrasivo por rolamento ao longo dos riscos, denominando de desgaste abrasivo por microrrolamento.

Ligas de alumínio comumente exibem dois tipos de desgaste por deslizamento, que podem ser classificados como moderado e severo. Desgaste severo envolve dano massivo na superfície com larga escala de transferência de materiais. No desgaste moderado, os danos superficiais são menos extensivos (Zhang et al., 1996).

Recentemente, o ensaio de desgaste microabrasivo tem sido reproduzido em vários materiais por um método popular desenvolvido por Rutherford e Hutchings (1996), que foi inicialmente idealizado para medir a espessura do revestimento de superfícies recobertas, mas é também um método simples e eficaz de avaliar a resistência ao desgaste de superfícies não recobertas (Anicézio, 2015). Este tipo de ensaio tem sido utilizado em universidades e centros de pesquisa de primeira linha por muitos pesquisadores (Cozza et al., 2015) e possui a vantagem de ser um método de baixo custo para avaliação da resistência ao desgaste dos materiais (Anicézio, 2015).

No ensaio microabrasivo por esfera rotativa, a técnica consiste na rotação de uma esfera de raio conhecido, a qual é forçada sobre a superfície de uma amostra com a ação de uma força normal. Durante o teste, uma suspensão abrasiva é gotejada entre a esfera e a amostra (Gobbi, 2018).

Os sistemas normalmente utilizados podem ser por esfera livre ou por esfera fixa, ambos são comumente encontrados na literatura (Fig.2). Na configuração de esfera livre, a força normal aplicada pela amostra se dá pela reação ao peso da esfera, considerando as inclinações entre a esfera e a amostra e entre a esfera e o eixo motriz. Na configuração de esfera fixa, a rotação da esfera é solidária à rotação do eixo do motor e a força normal aplicada é decorrente da ação do peso morto. A amostra é fixada ao suporte que transfere a ação do peso morto e do contrapeso, provocando o contato entre a amostra e a esfera, produzindo a força normal. A função do contrapeso é fornecer equilíbrio ao sistema, para que na ausência do peso morto, se obtenha força normal igual a zero.

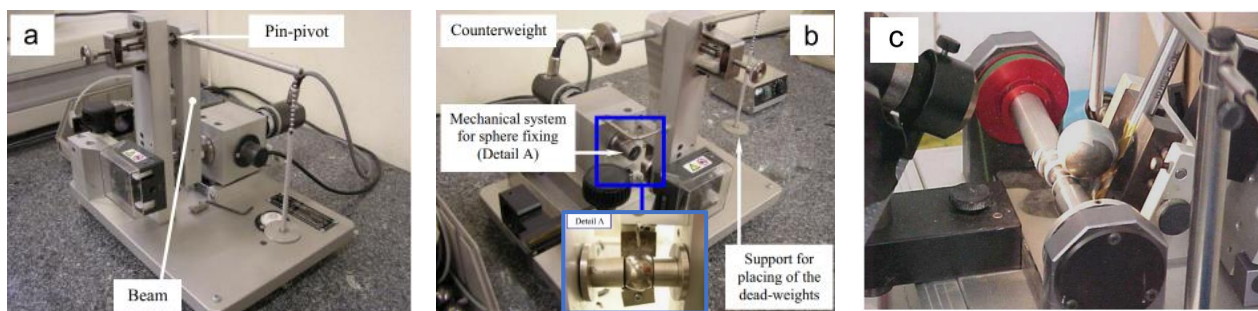


Figura 2. Sistemas de ensaio microabrasivo por esfera rotativa: (a) e (b) configuração mecânica esfera fixa, (c) configuração mecânica esfera livre. (Cozza et al., 2015, adaptado)

O ensaio resulta na criação de calotas ou crateras de desgaste na amostra, com dimensões e morfologia que permitem avaliar a resistência do substrato ao desgaste abrasivo, bem como os mecanismos de desgaste envolvidos no processo.

Por intermédio da expressão proposta por Archard em 1953, o volume de material removido pelo processo de desgaste adesivo pode ser estimado (Stolarski, 1990).

$$V = k (w/H) L \quad (1)$$

onde  $k$  é o coeficiente de desgaste,  $w$  é a carga aplicada,  $L$  é a distância de deslizamento, e  $H$  corresponde a dureza à penetração do material mais dúctil entre os dois.

O volume de desgaste  $V$  pode estar relacionado com a distância de deslizamento  $S$  e a carga normal no contato  $N$  por um modelo simples para desgaste abrasivo, que é equivalente à equação de Archard para desgaste deslizante (Gobbi, 2018):

$$S \cdot N = V \cdot k \quad (2)$$

### 3. MATERIAIS, EQUIPAMENTO E METODOLOGIA

#### 3.1. Materiais

As amostras foram extraídas de um vergalhão composto por liga de alumínio AA6201, de diâmetro aproximado de 10 milímetros, utilizado como insumo na fabricação de fios para produção de cabos condutores CAL900. Foram cortadas com aproximadamente 10 mm de altura, com a utilização da serra rotativa *cutoff*, refrigerada a água e óleo.

Em seguida foram gradualmente submetidas a lixas de 80, 120, 220, 400, 600, 800, 1000, 1200, 2000 e 2500, e finalmente polidas com alumina de granulometria 0,05  $\mu\text{m}$ , sempre com a utilização de água como fluido refrigerante.

Todo o processo de preparação das amostras foi realizado antes da submissão aos tratamentos térmicos, de forma a deixá-las prontas para os ensaios, a fim de evitar qualquer variação no efeito do tratamento térmico no material.

Para realização dos tratamentos térmicos nas amostras foi utilizado o forno Nabertherm com controlador P310. Para a solubilização, foi programada rampa de aquecimento de 30 minutos até 520°C, permanecendo nesta temperatura por 2 horas e posteriormente resfriadas abruptamente em água a temperatura ambiente. O tempo de permanência de 2 horas foi utilizado com o intuito de promover a total solubilização dos elementos de liga na matriz. Para o envelhecimento foi programada rampa de aquecimento de 15 minutos até 170°C, permanecendo nesta temperatura por 36 horas.

As amostras foram identificadas da seguinte forma:

- S: amostra solubilizada a 520° C por 2 horas;
- SE36: amostra solubilizada a 520° C por 2 horas e posteriormente envelhecida a 170° C por 36 horas.

Como forma de caracterização preliminar das amostras, foram realizadas medições da Microdureza Vickers (HV), utilizando-se o equipamento Microhardness Emco Test DuraScan. As amostras foram submetidas à carga de 200 gramas aplicada durante 10 segundos, e efetuadas 30 medições de microdureza em cada uma das amostras, apresentadas no gráfico a seguir (Fig.3).



Figura 3. Gráfico apresentando a Microdureza Vickers das amostras. Os círculos representam cada uma das medições e o traço representa a média das medições.

Após a submissão do material aos ensaios de desgaste, as amostras foram imersas por 24 horas em álcool isopropílico e limpas em equipamento de ultrassom por 1 hora em água destilada.

#### 3.2. Ensaio de Desgaste Microabrasivo

O equipamento empregado para os ensaios foi um tribômetro de esfera livre, da marca CSM, modelo Calowear, com esfera de aço 100 Cr6, de diâmetro de 25,4 mm, massa de 66 g e dureza nominal entre 60 e 66 HRC (700 a 860 HV) (Fig.4). Foram ajustados 27° de inclinação entre a esfera e o eixo do motor e 60° de inclinação entre a esfera e a amostra, de forma que a reação normal estática da amostra ao peso da esfera permanecesse em torno de 0,3 N. O equipamento utilizado não possuía célula de carga em operação, de forma que as forças decorrentes do atrito entre a amostra, esfera e eixo do motor foram desconsideradas. A velocidade do eixo do motor foi ajustada para 200 rpm, que resultou em cerca de 103 rpm para a esfera, ou 0,137 m/s.

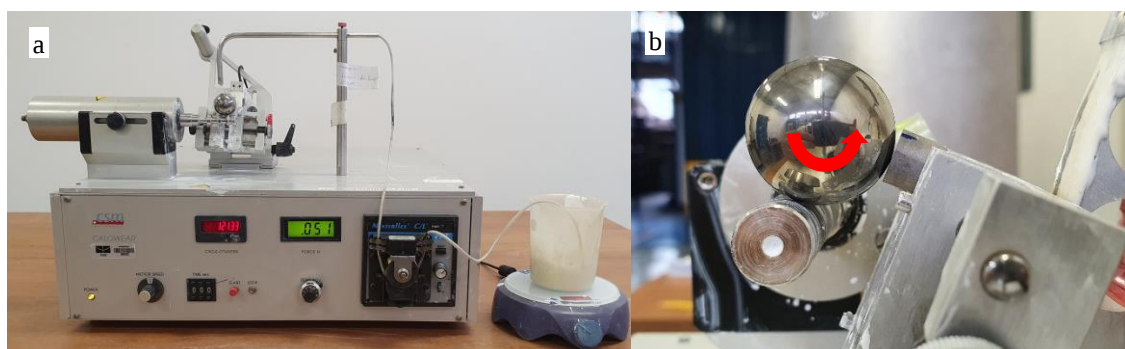


Figura 4. Tribômetro de esfera livre, da marca CSM, modelo Calowear. (a) equipamento, (b) configuração eixo/esfera/amostra – a seta indica o sentido de rotação da esfera.

Foi utilizada na interface esfera-amostra lama abrasiva, composta por uma suspensão de partículas abrasivas de alumina ( $Al_2O_3$ ) com tamanho médio de  $1\ \mu m$  em água destilada. A concentração da lama abrasiva foi de  $0,40g$  de abrasivo por  $cm^3$  de água. A suspensão abrasiva foi agitada continuamente durante todo o teste por meio de agitador magnético acoplado ao aparelho de microabrasão, a fim de evitar a decantação das partículas. O material abrasivo foi bombeado até a interface esfera-amostra por uma bomba peristáltica acoplada ao equipamento Calowear, usando a vazão fixada a 1 gota a cada 6 segundos.

Para o cálculo do coeficiente de desgaste das amostras foi utilizada a equação de Archard, expressa pela seguinte expressão:

$$k = \frac{\pi \cdot b^4}{32 \cdot \emptyset \cdot L \cdot N} \quad (4)$$

onde:  $k$  é o coeficiente de desgaste,  $b$  é o diâmetro da calota de desgaste,  $L$  é a distância de deslizamento,  $\emptyset$  é o diâmetro da esfera de ensaio,  $N$  é a força normal aplicada à amostra.

Sendo  $L$  calculado pela expressão:

$$L = \frac{19,95 \cdot n \emptyset}{\sqrt{\frac{\emptyset^2}{4} - 9}} \quad (5)$$

onde  $n$  é o número de rotações do eixo do motor.

Os tempos de ensaio foram fixados em 20, 30, 40, 50 e 60 minutos. Cada amostra foi submetida três vezes a cada tempo de ensaio, ou seja, foram obtidas três calotas para cada tempo estabelecido, resultando, respectivamente, em aproximadamente 2000, 3000, 4000, 5000 e 6000 rotações da esfera.

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os diâmetros de cada calota foram medidos em quatro diferentes direções, espaçadas regularmente entre si (Fig. 5). Para tanto foi utilizado um microscópio óptico digital Leica DVM6. Assim, os diâmetros médios foram medidos e as distâncias de deslizamento e coeficientes de desgaste foram calculados por meio das equações 4 e 5, e apresentados na Tabela 1. Além das medições dos diâmetros, a análise ao microscópio óptico permitiu uma avaliação preliminar da morfologia das crateras, que serão tratadas a seguir.

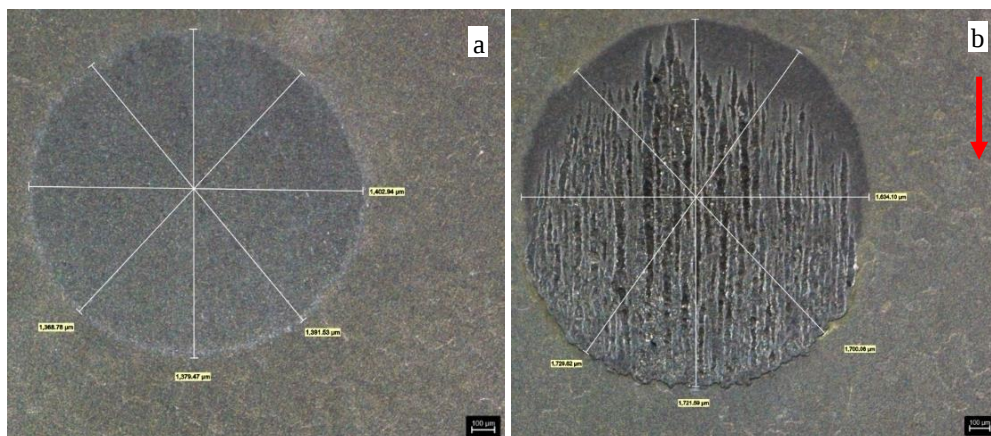


Figura 5. Exemplos de medições do diâmetro das crateras e diferentes tipos de morfologia obtidos nos ensaios. A seta indica o sentido de deslizamento da esfera.

Tabela 1. Resultados obtidos nos ensaios de desgaste.

| Amostra | Diâmetro médio da calota ( $\mu\text{m}$ ) | Distância de deslizamento (m) | Coefficiente de desgaste ( $\text{m}^3/\text{Nm}$ ) |
|---------|--------------------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------------------------|
| S-20    | $1.378,17 \pm 45$                          | 164                           | $2,830\text{E}-13$                                  |
| S-30    | $1.529,85 \pm 98$                          | 246                           | $2,864\text{E}-13$                                  |
| S-40    | $1.689,45 \pm 59$                          | 328                           | $3,195\text{E}-13$                                  |
| S-50    | $1.693,60 \pm 76$                          | 411                           | $2,581\text{E}-13$                                  |
| S-60    | $1.775,05 \pm 49$                          | 493                           | $2,596\text{E}-13$                                  |
| SE36-20 | $1.345,77 \pm 62$                          | 164                           | $2,573\text{E}-13$                                  |
| SE36-30 | $1.462,11 \pm 50$                          | 246                           | $2,390\text{E}-13$                                  |
| SE36-40 | $1.611,95 \pm 63$                          | 328                           | $2,648\text{E}-13$                                  |
| SE36-50 | $1.646,20 \pm 109$                         | 411                           | $2,304\text{E}-13$                                  |
| SE36-60 | $1.737,87 \pm 63$                          | 493                           | $2,385\text{E}-13$                                  |

\*O número apostado após o traço na primeira coluna indica o tempo ao qual a amostra foi submetida ao ensaio de desgaste. Por exemplo, SE36-40 indica a amostra solubilizada e envelhecida submetida a 40 minutos de ensaio de desgaste.

A morfologia do desgaste foi investigada com a utilização de um Microscópio Eletrônico de Varredura - MEV Phenom Pro-X, Thermo Scientific. Em dois dos ensaios realizados na amostra SE36-20, um dos ensaios realizados na amostra SE36-30 e um dos ensaios realizados na amostra SE36-40, as imagens apresentam exclusivamente aspecto pontilhado, típicas do desgaste abrasivo por rolamento, cujas marcas características são apresentadas nas Figuras 5a, 6a e 7.

Em todos os demais ensaios foi identificada a ocorrência de áreas da calota acometidas por desgaste abrasivo por rolamento, de grau moderado, em conjunto com áreas de desgaste severo (Figs. 6b e 6c), sendo que as proporções de cada mecanismo tiveram grande variação, não necessariamente vinculando-se ao tempo de ensaio e distância de deslizamento. Nestes casos, o desgaste abrasivo por rolamento surgiu sempre a partir do começo da calota de desgaste (considerando o sentido de deslizamento), mas não se estendeu até o fim. Já a região de desgaste severo iniciou-se sempre após a área de desgaste por rolamento, seguindo até o fim da calota de desgaste, em proporções variáveis de cada mecanismo, conforme supramencionado.

Além do aspecto pontilhado, espera-se que a superfície de desgaste mostre uma trilha de desgaste típica, seja por riscamento, seja por microrrolamento, condição em que o abrasivo rola no interior dos riscos.

Em materiais dúcteis sabe-se que as camadas superficiais sofrem deformação. No presente experimento, tal fato fica facilmente evidenciado pela fluência do material para o final da calota de desgaste (Fig. 8a).

Ademais, a região de desgaste severo apresenta-se com incidência de deformação plástica e regiões em cava de formato irregular, com superfícies internas de aspecto granular. A composição química no interior das cavas foi avaliada com a utilização do EDS, e mostrou-se rica em ferro (cerca de 60% em massa) e cromo (cerca de 8% em massa), além do alumínio e oxigênio, diferentemente da região de fora da cava, na qual a análise elementar aponta apenas a ocorrência de alumínio e oxigênio (Fig.9). Cabe salientar que na composição nominal da liga 6201 o percentual em massa do ferro é de, no máximo, 0,5% e do cromo é de 0,03%, do que se infere que o material acumulado no interior das cavas é proveniente da esfera.



Figura 6. Morfologia do desgaste. (a) desgaste moderado, (b e c) desgaste severo. As setas indicam o sentido de deslizamento da esfera.

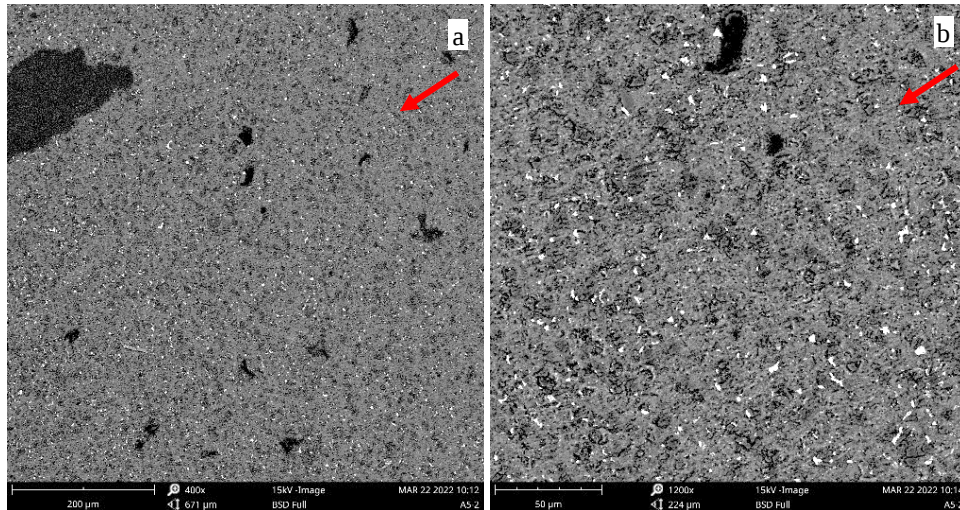


Figura 7. Micrografias (MEV) típicas do desgaste por rolamento: (a) ampliação de 400x e (b) ampliação de 1200x. As setas indicam o sentido de deslizamento da esfera.

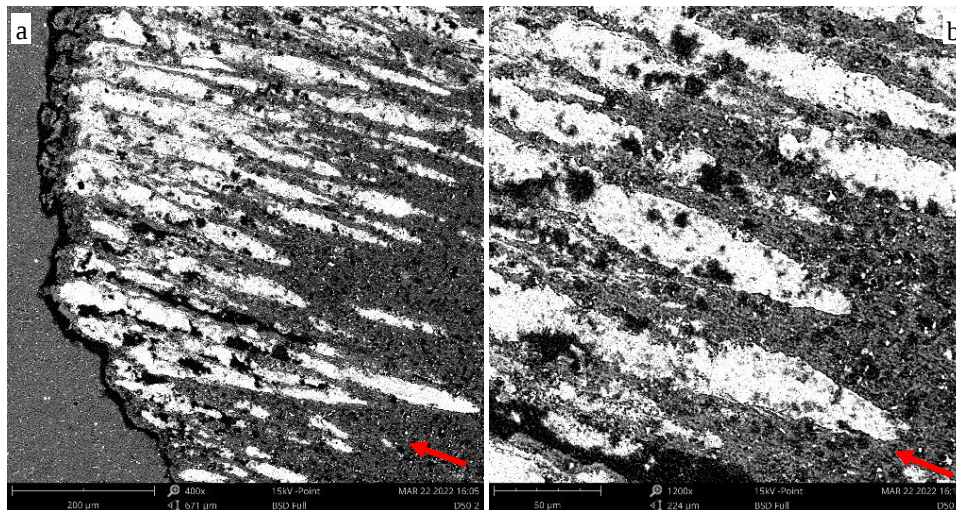


Figura 8. Micrografias (MEV) da região de desgaste severo: (a) ampliação de 400x e (b) ampliação de 1200x. As setas indicam o sentido de deslizamento da esfera.

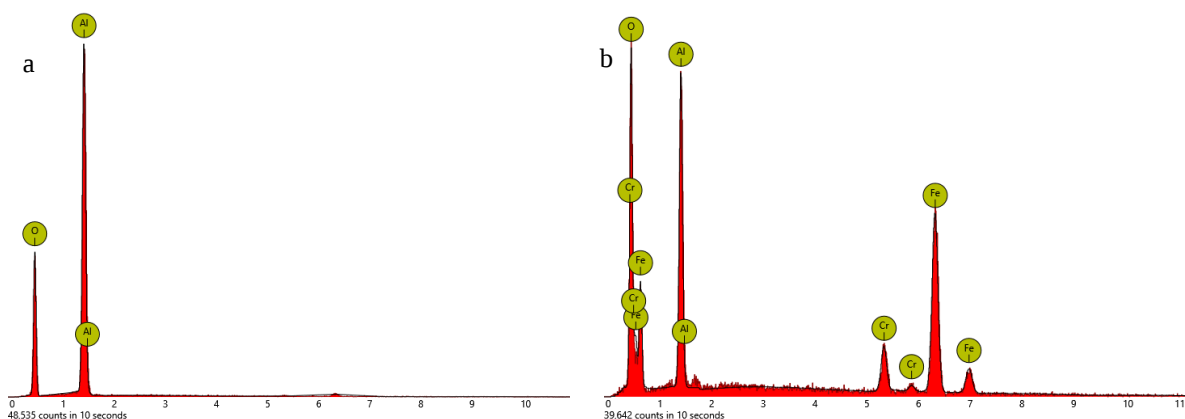


Figura 9. Espectro EDS: (a) região externa à cava, (b) região interna à cava

Embora o mecanismo envolvido na produção das cavas na região de desgaste severo não tenha ficado completamente esclarecido, acredita-se que o acúmulo do material mais duro, composto por ferro e cromo, provavelmente proveniente da degradação da esfera, tenha intensificado a deformação plástica nessas regiões.

Pretende-se, em seguida, empreender um estudo sobre a esfera de ensaios, a fim de compreender se de fato houve a degradação da superfície e suas causas.

## 5. CONCLUSÃO

A partir de um vergalhão composto por liga de alumínio AA6201, utilizado como insumo na fabricação de fios para produção de cabos condutores CAL900, foram retiradas amostras para realização dos presentes ensaios. Um conjunto de amostras foi solubilizado a 520°C por 2 horas e o outro conjunto de amostras foi solubilizado a 520°C por 2 horas e envelhecido artificialmente a 170°C por 36 horas. Foram então realizados ensaios de Microdureza Vickers e de desgaste microabrasivo utilizando-se um tribômetro de esfera livre, com esfera de aço 100 Cr6 e velocidade de cerca de 103 rpm ou 0,137 m/s. A morfologia das calotas foi avaliada sob microscopia ótica digital e microscopia eletrônica de varredura, a partir de que se chegou às seguintes conclusões:

- a) A amostra envelhecida apresentou a média da microdureza 66% superior;
- b) A amostra envelhecida, a partir de fórmula de Archard, apresentou a média do coeficiente de desgaste 13% menor.
- c) Algumas das amostras envelhecidas apresentaram exclusivamente desgaste abrasivo por rolamento, evidenciado pelo aspecto pontilhado;
- d) Em todos os demais ensaios foi identificada a ocorrência de áreas da calota acometidas por desgaste abrasivo por rolamento, de grau moderado, em conjunto com áreas de desgaste severo;
- e) As proporções de cada mecanismo de desgaste tiveram grande variação, não necessariamente vinculando-se ao tempo de ensaio e distância de deslizamento;
- f) A região de desgaste severo apresentou-se com incidência de deformação plástica e regiões em cava de formato irregular, com superfícies internas de aspecto granular;
- g) A composição química no interior das cavas mostrou-se rica em ferro e cromo;
- h) A composição química no exterior das cavas aponta apenas a ocorrência de alumínio e oxigênio;

Embora o mecanismo envolvido na produção das cavas na região de desgaste severo não tenha ficado completamente esclarecido, acredita-se que o acúmulo do material mais duro, composto por ferro e cromo, provavelmente proveniente da degradação da esfera, tenha intensificado a deformação plástica nas regiões em que se aglomerou.

Pretende-se, em seguida, estabelecer um estudo sobre a esfera de ensaios, a fim de compreender se de fato houve a degradação da superfície e suas causas, bem como correlacioná-las às evidências encontradas nas amostras.

## 6. REFERÊNCIAS

- Aggarwal, R.K., Johns A.T., JASBEWSU, J.; “An Overview of the Condition Monitoring of Overhead Lines,” *Electric Power Systems Research* 2000; 53:15-22
- Anicézio, taise maria fração de. (2015). Avaliação da Resistência ao Desgaste Microabrasivo da Liga Ti-12Cr Revestida por Filmes Finos de TiN e CrN. (Distrito Federal) 2015. xviii, 81p., 210x297 mm (ENM/FT/UnB, Mestre, Ciências Mecânicas, 2015) Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia Departamento de Engenharia Mecânica.
- ASM International Metals handbook. Vol. 2: Prepared under the direction of the ASM International Handbook Committee. Includes bibliographies and indexes. Contents: v. 2. Properties and selection--nonferrous alloys and special-purpose materials. 1. Metals--Handbooks, manuals, etc. I. ASM International. Handbook Committee. TA459.M43 1990 620.1'6 90-115 ISBN 0-87170-378-5 (v. 2) SAN 204-7586.
- ASTM G40-21 (2021) Standard Terminology Relating to Wear and Erosion. DOI: 10.1520/G0040-21
- Câmara Cozza, R., Rodrigues, L. C., & Geraldo Schön, C. (2015). Analysis of the micro-abrasive wear behavior of an iron aluminide alloy under ambient and high-temperature conditions. *Wear*, 330–331, 250–260. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2015.02.021>.
- Cozza, R.C., Rodrigues, L.C., Cláudio, G.S. (2015), Analysis of the micro-abrasive wear behavior of an iron aluminide alloy under ambient and high-temperature conditions. doi 10.1016/j.wear.2015.02.021
- 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 (PhD thesis), Mechanical Engineering of Design and Manufacture. Universidade de São Paulo - Escola politécnica (2011).
- Cozza, R.C., Tanaka, D.K., Souza, R.M. (2006) Micro-abrasive wear of DC and pulsed DC titanium nitride thin films with different levels of film residual stresses. doi 10.1016/j.surfcoat.2006.08.044.
- Dias, F. C. (2014) . Influência da deposição de filmes finos de TiN e ZrN multicamadas na resistência ao desgaste microabrasivo da liga Ti-40Zr obtida por metalurgia do pó (ENM/FT/UnB, Doutor, Engenharia Mecânica, 2014) Tese de Doutorado - Universidade de Brasília Faculdade de Tecnologia - Departamento de Engenharia Mecânica.
- Diniz, Layse Mendes. (2018). Influência do tratamento térmico na vida em fadiga de fios de alumínio. (ENM/FT/UnB, Mestre, Engenharia Mecânica, 2018) Dissertação de Mestrado - Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia - Departamento de Engenharia Mecânica.
- Dwivedi, D. K. (2010). Adhesive wear behaviour of cast aluminium-silicon alloys: Overview. *Materials and Design*, 31(5), 2517–2531. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.11.038>
- Gobbi, Silvio José, (2018), Avaliação da resistência ao desgaste microabrasivo das ligas de titânio Ti-12Cr e Ti-22Nb-6Zr obtidas por metalurgia do pó e recobertas com revestimento de diamante DLC, 241p., 201x297 mm (ENM/FT/UnB, Doutor, Ciências Mecânicas, 2018) Tese de Doutorado - Universidade de Brasília Faculdade de Tecnologia - Departamento de Engenharia Mecânica.

- Hutchings, I.M. Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials. Metallurgy & Materials Science Series, 1992.
- Kalombo, R. B., Martínez, J. M. G., Ferreira, J. L. A., Da Silva, C. R. M., & Araújo, J. A. (2015). *Comparative Fatigue Resistance of Overhead Conductors Made of Aluminium and Aluminium Alloy: Tests and Analysis*. In *Procedia Engineering* (Vol. 133, pp. 223–232). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.12.662>.
- Quadro, A.L.; Hallak, S.G.; Trindade, S.F.; Parreiras, L.G.S.; Sabariz, A.L.R. Efeito da temperatura de solubilização nas propriedades mecânicas da liga 6201. In: V Congresso Internacional do Alumínio, 2012, São Paulo.
- Reinke, G. (2021). Influência de tratamentos térmicos na vida em fadiga e na superfície de fratura de fios de liga de alumínio 6201, (ENM/FT/UnB, Doutor, Engenharia Mecânica, 2021) Tese de Doutorado - Universidade de Brasília Faculdade de Tecnologia - Departamento de Engenharia Mecânica.
- Souza, H. P. de, (2006). Efeito da temperatura de solubilização no envelhecimento da liga de alumínio 6061. Projeto de Graduação – Universidade Federal do Espírito Santo.
- Stachowiak, G. W. (2005) Wear – materials, mechanisms and practice. ISBN-13: 978-0-470-01628-2, ISBN-10: 0-470-01628-0 TA418.4.W415 2005 620.1'1292—dc22.
- Stolarski, T. A. Tribology in Machine Design. Butterworth Heinemann, 1990.
- Zhang, J., Alpas, A. T., (1996). Transition between mild and severe wear in aluminium alloys. Department of Mechanical & Materials Engineering, University of Windsor. Windsor, Ontario, Canada N9B 3P4
- Zhou, Z.R., Cardout, A., Goudreau, S., Fiset, M., “Tribology International,” Vol.29, n° 3, pp.221-232, 1996.
- Zum Gahr K. H. Microstructure and wear of materials. Elsevier, 1987.

## 7. RESPONSABILIDADE AUTORAL

O autor é o único responsável pelo conteúdo deste trabalho.

# INFLUENCE OF HEAT TREATMENTS OF SOLUBILIZATION AND ARTIFICIAL PRECIPITATION ON THE RESISTANCE TO MICROABRASIVE WEAR OF ALUMINUM ALLOYS 6201

Clayton Rovigatti Leiva, [crleiva@hotmail.com](mailto:crleiva@hotmail.com)<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade de Brasília - UnB

**Abstract.** From a rebar composed of aluminum alloy AA6201, used as an input in the manufacture of wires to produce CAL900 conductor cables, samples were taken to carry out the present tests. One set of samples was solubilized at 520°C for 2 hours and the other set of samples was solubilized at 520°C for 2 hours and artificially aged at 170°C for 36 hours. As a preliminary characterization measure, the Vickers Microhardness test was performed, and the aged sample presented 66% higher microhardness. Microabrasive wear tests were then carried out using a free sphere tribometer, with a 100 Cr6 steel sphere and a speed of about 103 rpm or 0.137 m/s. The wear caps were measured and the wear coefficients were calculated using Archard's formula, with the aged sample showing a wear coefficient 13% lower. The morphology of the caps was evaluated under optical digital microscopy and scanning electron microscopy. Some of the aged samples showed exclusively abrasive bearing wear. In all other tests, it was identified the occurrence of areas of the cap affected by abrasive wear by rolling, of moderate degree, together with areas of severe wear, and the proportions of each mechanism had great variation, not necessarily linked to the test time and slip distance. The severe wear region presented an incidence of plastic deformation and irregularly shaped groove regions, with granular internal surfaces. The chemical composition inside the grooves was evaluated with the use of EDS, and it was shown to be rich in iron and chromium, unlike the region outside the grooves, in which the elemental analysis shows only the occurrence of aluminum and oxygen. Although the mechanism involved in the production of grooves in the region of severe wear has not been completely clarified, it is believed that the accumulation of the harder material, composed of iron and chromium, probably resulting from the degradation of the sphere, has intensified the plastic deformation in these regions.

**Keywords:** Al6201, heat treatment, microabrasive wear, wear coefficient