



## CARACTERIZAÇÃO TRIBOLÓGICA DE ALUMÍNIO ANODIZADO. PARTE1: ENSAIOS DE DESLIZAMENTO

### **Tarsis Prado Barbosa**

Laboratório de Tribologia e Materiais, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia  
Bloco 1R, Av. João Naves de Ávila 2160, 38400-902, Uberlândia MG, Brasil  
tircispb@yahoo.com.br

### **Roberto Lopes Salvador**

ro\_salvador@hotmail.com

### **Henara Lillian Costa**

ltm-henara@mecanica.ufu.br

### **José Daniel Biasoli de Mello**

ltm-demello@ufu.br

**Resumo:** *O alumínio e suas ligas podem ser bons materiais para aplicações em contatos deslizantes não-lubrificadas, em especial quando possuem algum tipo de tratamento superficial. Neste trabalho, foram avaliadas as características tribológicas do Alumínio sujeito a dois processos de anodização e a um processo para alargamento de poros, por meio de dois tipos de avaliação: através de ensaios de deslizamento (parte1) e através de ensaios de micro abrasão (parte 2).*

*A caracterização tribológica foi realizada ao ar, sem lubrificação por meio de um ensaio de deslizamento (pino alternado) realizado em um tribômetro da marca Plint and Partners, com a aplicação de uma carga normal de 0,5 kg. Os dados adquiridos foram o coeficiente de atrito e o potencial de contato. O contra corpo utilizado foi uma esfera de aço AISI 52100 de diâmetro 0,010 m. A amostra foi presa a uma mesa que se movimenta alternadamente em uma frequência de 2 Hz, descrevendo uma amplitude de deslocamento de 0,004 m. Foram utilizadas quatro amostras, sendo realizados quatro ensaios por amostra.*

*A taxa de desgaste das amostras após os ensaios foi medida por interferometria laser e um software específico. O desgaste do contra corpo foi medido por meio de um microscópio óptico equipado com um analisador de imagem. Foram calculados os parâmetros de rugosidade, sendo analisadas três famílias de parâmetros: uma representativa da altura das irregularidades ( $S_q$  – ou rugosidade quadrática média); dois representativos da forma da distribuição estatística característica da superfície (Coeficiente de achatamento –  $S_{ku}$  e o coeficiente de simetria -  $S_{sk}$ ) e um derivado da curva de Abbott-Firestone e característica da capacidade de suporte de carga da superfície ( $tp$ ).*

*Ao analisar os ensaios realizados, constatou-se que o processo de anodização proporcionou um grande benefício tribológico, aumentando significativamente a durabilidade do material.*

**Palavras-chave:** *alumínio anodizado, tribologia, desgaste por deslizamento, topografia de superfícies.*

## 1. INTRODUÇÃO

O desgaste e o atrito são dependentes das propriedades mecânicas das superfícies em contato. Apesar de a literatura ser abundante em exemplos de resultados experimentais que indiquem o contrário (Costa et al. 1996; Milan et al. 2005), em geral, admite-se que superfícies mais duras sejam mais resistentes ao desgaste (Hutchings 1992). Porém, em algumas aplicações específicas, como é o caso de contatos deslizantes não lubrificadas, é necessário o emprego de materiais macios e não-metálicos. Isto ocorre porque partículas duras provenientes do desgaste entre superfícies poderiam agir como abrasivo, aumentando o desgaste. Partículas duras podem particularmente ocorrer quando um óxido duro recobre a superfície, ou quando partículas metálicas de desgaste são oxidadas devido às altas temperaturas desenvolvidas nos contatos deslizantes. Desta forma, uma superfície menos resistente pode promover uma redução da taxa de desgaste e do coeficiente de atrito, em oposição a uma mais dura (Milan et al. 2005).

Em aplicações onde materiais macios e não-magnéticos devam ser usados, o alumínio e suas ligas são candidatos naturais, devido à sua excelente resistência à corrosão, boa condutividade térmica, baixa densidade e custo moderado. Porém, o alumínio e suas ligas são normalmente menos resistentes que os materiais usuais de engenharia (De Mello and Binder 2006).

Uma alternativa que cada vez mais tem sido empregada é a engenharia de superfícies para a produção de materiais resistentes ao desgaste, com o objetivo de produzir materiais conjugados, nos quais substrato e revestimento e ou modificação de superfícies proporcionem desempenho superior ao que poderia ser obtido por quaisquer das partes individualmente, maximizando a relação custo benefício (Rickerby and Matthews 1991).

A anodização é um processo eletroquímico aplicado ao alumínio e suas ligas, apesar de menos comumente também poder ser usado em titânio, magnésio e suas ligas. A superfície a ser anodizada é usada como o anodo em uma célula eletrolítica. Quando uma diferença de potencial é aplicada à célula, o anodo oxida-se. O revestimento formado é duro, resistente à corrosão e supostamente resistente ao desgaste. (Budinsky 1988).

O presente trabalho tem por objetivo avaliar as características tribológicas do Alumínio sujeito a diferentes procedimentos de anodização. Para tanto, foram realizados ensaios de desgaste por deslizamento (pino alternado) monitorando-se o coeficiente de atrito e o potencial de contato. Após os ensaios realizados, calculou-se os parâmetros de rugosidade característicos das superfícies desgastadas, que foram comparados com os parâmetros topográficos da superfície antes do desgaste.

## 2. MÉTODOS EXPERIMENTAIS

Todas as amostras foram inicialmente polidas. Dois procedimentos de anodização diferentes foram utilizados. Além disso, uma das amostras, após anodização, passou pelo procedimento 3, que consiste em um banho extra para alargamento dos poros. A nomenclatura das amostras é apresentada na Tabela 1, onde se observa também uma amostra somente polida, sem tratamento de anodização.

**Tabela. 1. Nomenclatura das amostras de alumínio anodizadas.**

Amostra	Polimento	Procedimento		
		1	2	3
Al 01				
Al 04				
Al 05				
Al 06				

A caracterização tribológica foi realizada ao ar, sem lubrificação, por meio de um ensaio de deslizamento realizado em um tribômetro da marca Plint and Partners, modelo TE67, com a aplicação de uma carga normal (peso morto) de 0,5 kg. Foram adquiridos tanto o coeficiente de atrito quanto o potencial de contato (taxa de aquisição de 1 Hz) por meio de um computador. A avaliação do potencial de contato permite investigar a formação de óxidos na interface, de forma que, se estes forem isolantes, impede-se a passagem da corrente elétrica, o que eleva os valores do potencial de contato.

Os resultados apresentados constituem a média de pelo menos quatro ensaios realizados por amostra, com duração de uma hora cada.

Um braço pivotado prende uma esfera de aço de diâmetro 0,010 m AISI 52100, que constituiu o contra-corpo. A amostra é presa a uma mesa que se movimenta alternadamente a uma frequência de 2 Hz, descrevendo uma amplitude de deslocamento de 0,004 m.

Antes dos testes, a esfera e as amostras foram cuidadosamente limpas, tendo permanecido imersas em acetona, em um aparelho de ultra-som durante cinco minutos. Posteriormente elas foram secadas com ar quente por cerca de um minuto.

A taxa de desgaste das amostras foi obtida pela variação volumétrica determinada através de interferometria a laser. A interferometria também foi utilizada para caracterizar a topografia de superfície das amostras antes e após o desgaste por deslizamento. Antes dos ensaios, a avaliação topográfica foi feita numa área de 0,003 m x 0,003 m. A taxa de desgaste é calculada utilizando um software desenvolvido especificamente para tal tarefa (Jacomine et al. 2004).

Mediu-se ainda o desgaste dos contra-corpos esféricos por meio de um microscópio óptico equipado de um analisador de imagem.

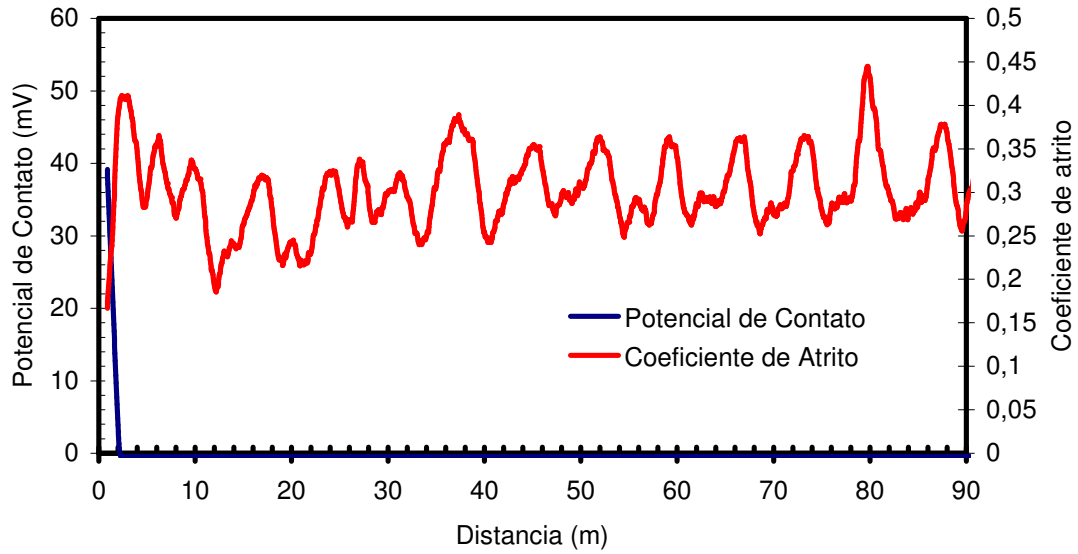
A partir da avaliação topográfica por interferometria, calculou-se os parâmetros de rugosidade característicos das superfícies desgastadas, sendo analisadas três famílias de parâmetros: uma representativa da altura das irregularidades ( $S_q$  – ou rugosidade quadrática média); dois representativos da forma da distribuição estatística característica da superfície (Coeficiente de achatamento –  $S_{ku}$  e o coeficiente de simetria -  $S_{sk}$ ) e um derivado da curva de Abbott-Firestone e característica da capacidade de suporte de carga da superfície ( $tp$ ).

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

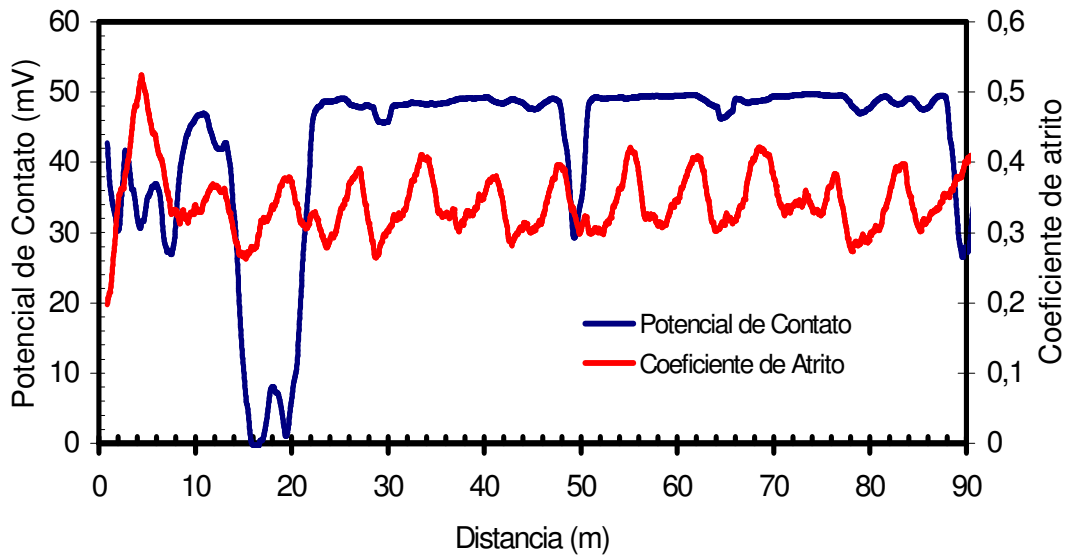
A evolução do potencial de contato não seguiu um comportamento único, o que impossibilitou o estabelecimento de algum padrão para esta variável. A figura 1 exemplifica essa variação para testes em amostras do grupo Al\_01. Em um dos testes, o potencial de contato caiu logo nos instantes iniciais de ensaio para valores bem próximos a zero (Figura 1-a). Em outro, após queda inicial, o potencial é restabelecido para valores elevados (b). Nos demais, o potencial de contato oscila continuamente durante os ensaios (c e d).

Porém, o coeficiente de atrito mostrou um comportamento mais repetitivo entre os ensaios, o que aconteceu também para as demais amostras. Conforme exemplificado na figura 2, inicialmente houve um pequeno pico, seguido de uma ligeira queda, a partir da qual o atrito apresentou alguma oscilação até o final de cada ensaio. Desta forma, foi calculado, após 15 m de ensaio, um coeficiente de atrito médio para cada ensaio.

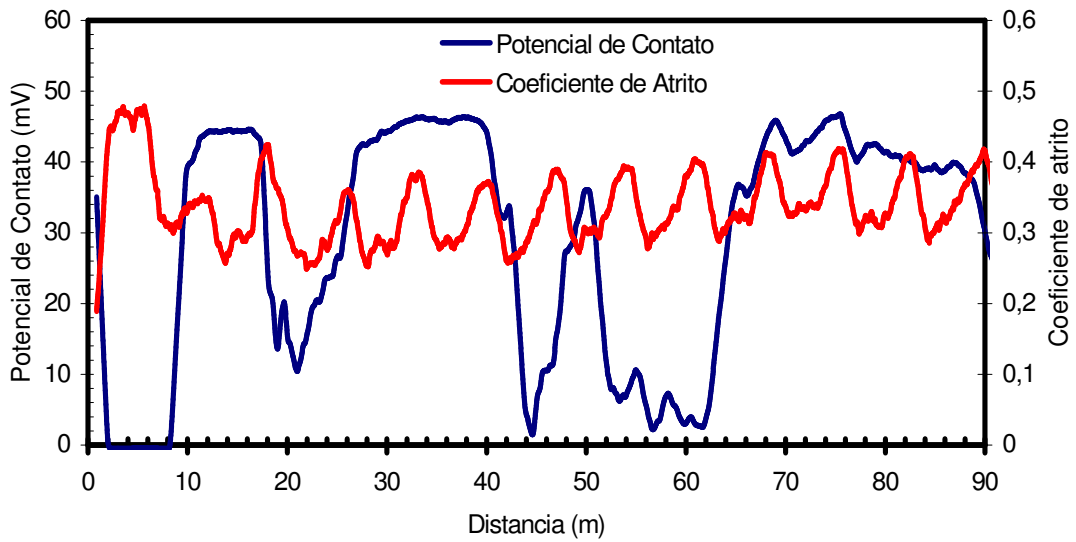
Em seguida, foi calculada uma nova média por grupo de amostras, através das médias obtidas em cada um dos quatro ensaios. Os valores médios finais obtidos para cada grupo de amostras são apresentados na Figura 3. Observa-se que não existe diferença estatisticamente significativa entre os valores de atrito para os diferentes grupos de amostras, nem mesmo para a amostra somente polida.



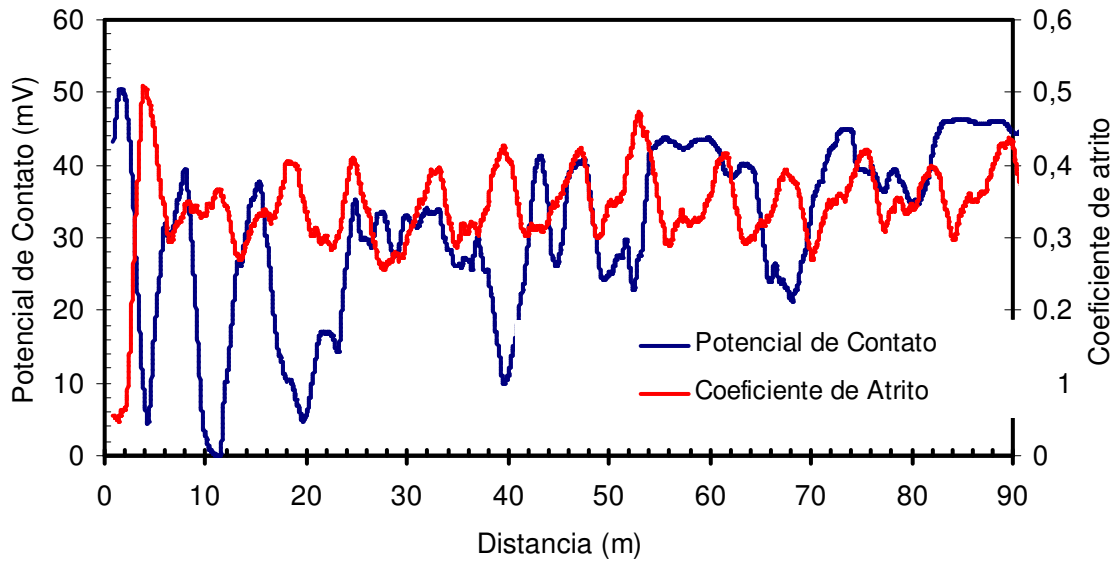
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 1. Variação de coeficiente de atrito e potencial de contato durante os ensaios de deslizamento para as amostras do grupo Al\_01.

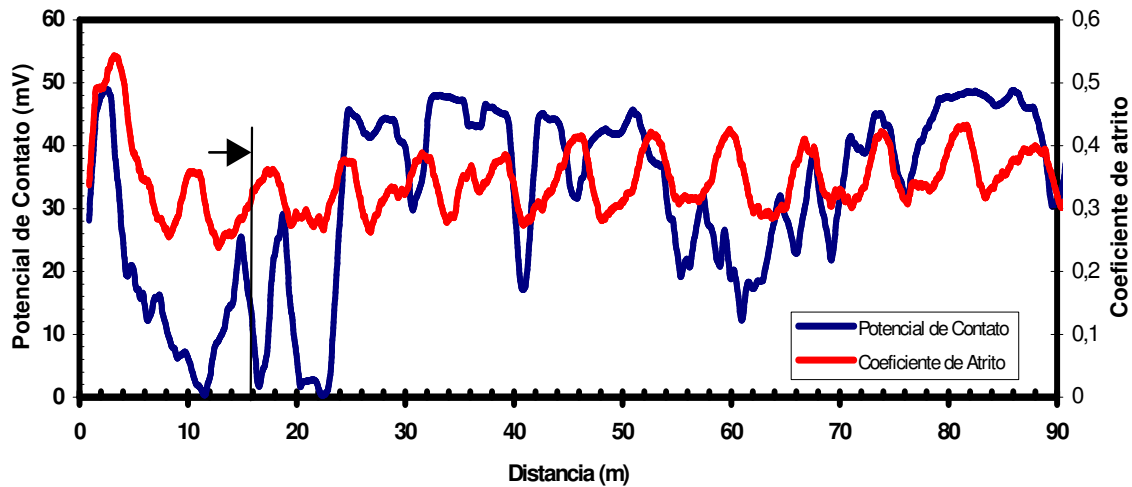
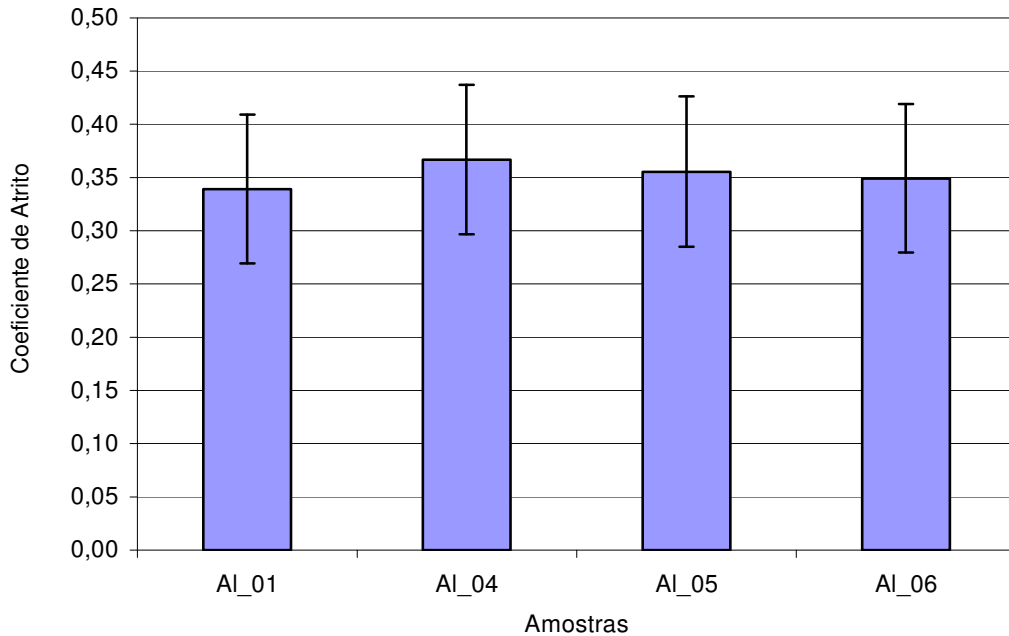
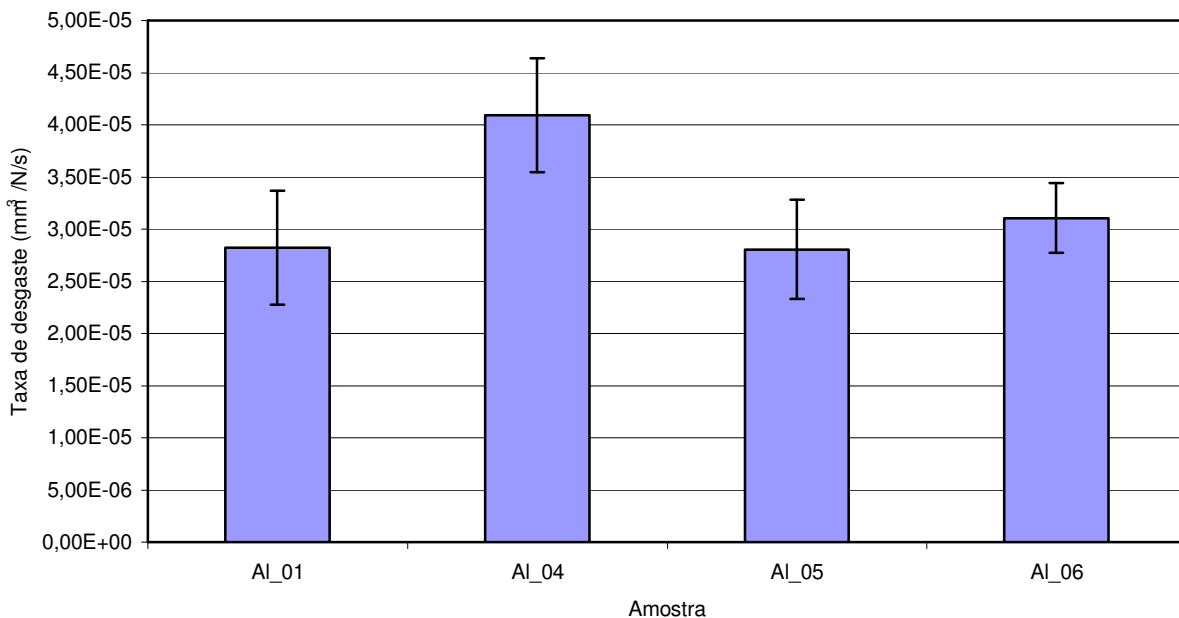


Figura 2. Detalhe do ponto inicial considerado para cálculo do valor médio do coeficiente de atrito.



**Figura 3. Coeficientes de atrito médios para cada grupo de amostras.**

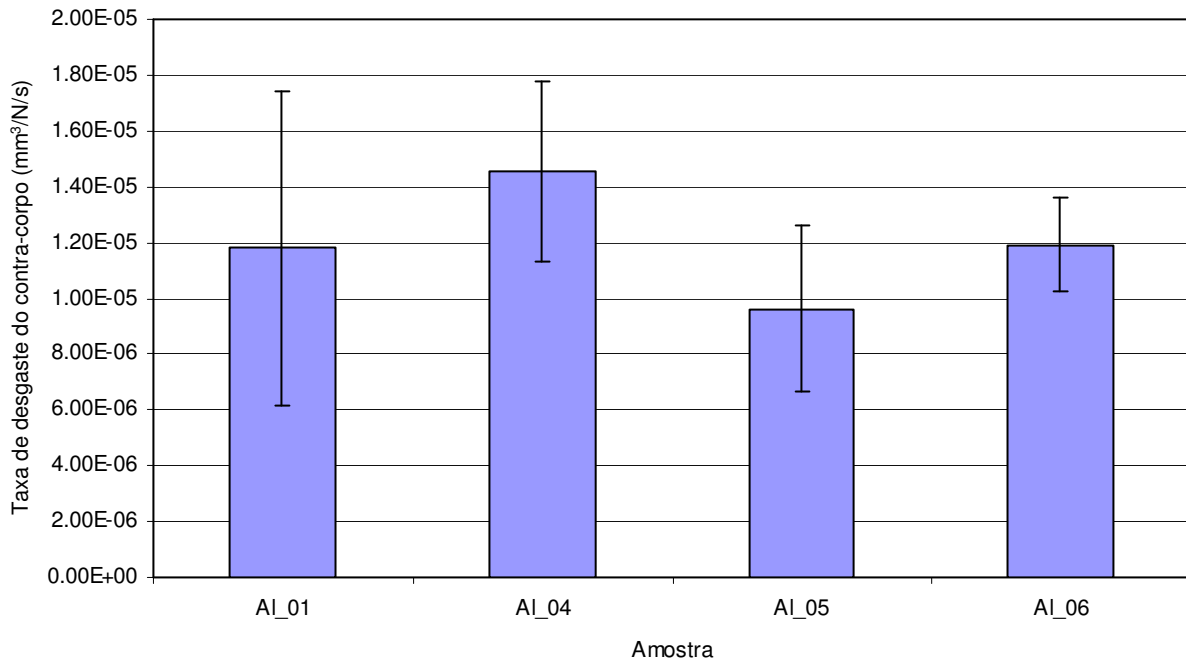
As taxas de desgaste para cada grupo de amostras, calculadas utilizando-se os volumes de desgaste medidos por interferometria a laser, são apresentados na Figura 4. Observa-se que as amostras anodizadas (AI\_01, AI\_05 e AI\_06) apresentaram taxa de desgaste inferior à amostra somente polida, o que comprova o benefício tribológico conseguido pela anodização. Porém, observa-se pouca diferença entre o desgaste médio medido para os diferentes grupos de amostras anodizadas, o que não permitiu uma diferenciação entre os diferentes procedimentos de anodização.



**Figura 4. Taxa de desgaste média para os diferentes grupos de amostras.**

Quando se observa o desgaste sofrido pelos contra-corpos esféricos, Figura 5, o desgaste contra uma amostra não-anodizada resultou em desgaste ligeiramente superior ao das amostras anodizadas, mas esta diferença é pouco significativa quando a comparação é feita com o grupo anodizado de

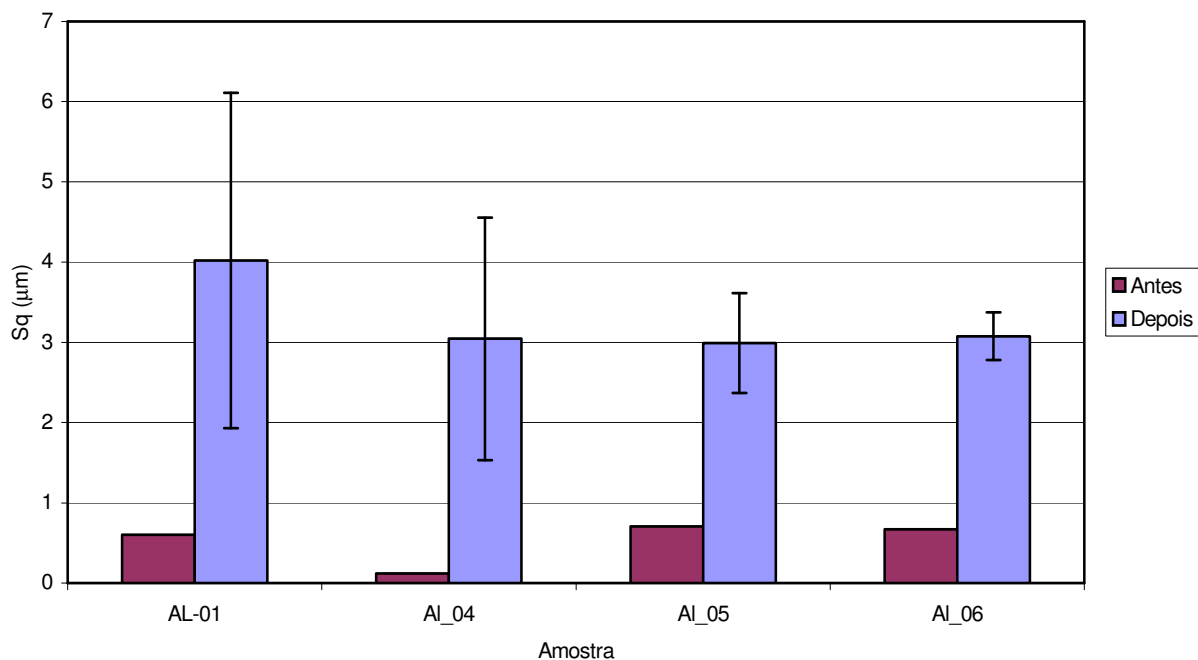
forma convencional. O procedimento de anodização alternativo denominado procedimento 2, não seguido de etapa de alargamento dos poros, resultou em desgaste da esfera ligeiramente inferior ao dos demais procedimentos.



**Figura 5. Taxas de desgaste dos contra-corpos esféricos para os diferentes grupos de amostras.**

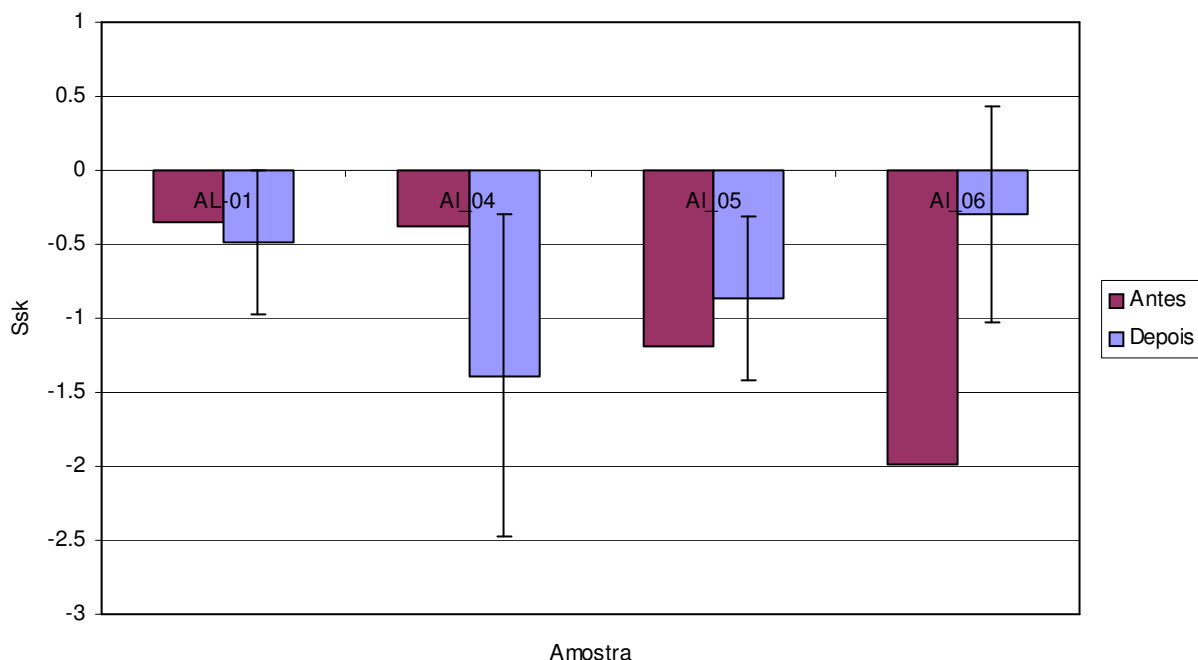
Os parâmetros de topografia de superfície antes e depois dos ensaios de desgaste são sintetizados nas Figuras 6 a 9. As medições após o desgaste foram feitas dentro da região central das marcas de desgaste utilizando o software UBSoft 1.9.

A Figura 6 mostra que todos os procedimentos de anodização aumentaram  $S_q$  significativamente, apesar do aumento causado pelo procedimento 1 ter sido ligeiramente inferior. Porém, após o desgaste, não houve diferença significativa entre os valores de  $S_q$  para as diferentes amostras. Além disso, observa-se um grande desvio padrão dentro de cada grupo.

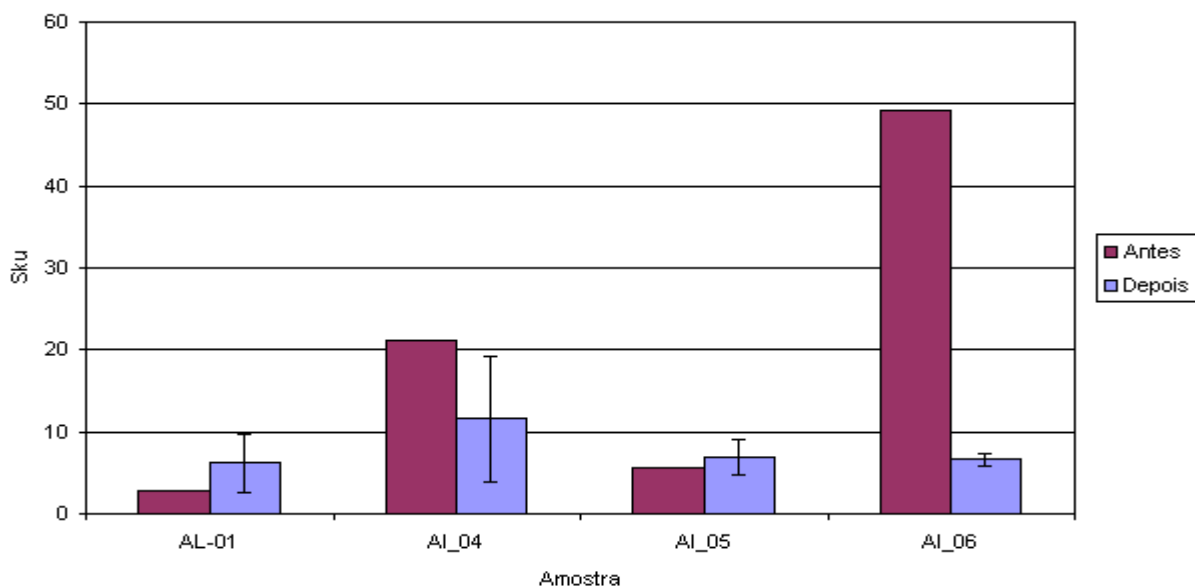


**Figura 6. Rugosidade média  $S_q$  antes e depois dos ensaios de desgaste.**

A análise das distribuições das irregularidades é apresentada nas Figuras 7 e 8. O coeficiente de achatamento das distribuições foi negativo para todas as amostras testadas, tanto antes quanto depois dos ensaios, indicando a predominância de platô-vales o que caracteriza a existência de uma boa superfície de apoio. Verifica-se que o procedimento (2) de anodização antes do desgaste proporciona valores menores de Skewness. Após o desgaste, a diferença entre os grupos de amostras não foi significativa. Não foi possível identificar um padrão de comportamento para os valores de coeficiente de achatamento, mostrados na Figura 8.



**Figura 7. Coeficientes de assimetria Ssk antes e depois dos ensaios de desgaste.**

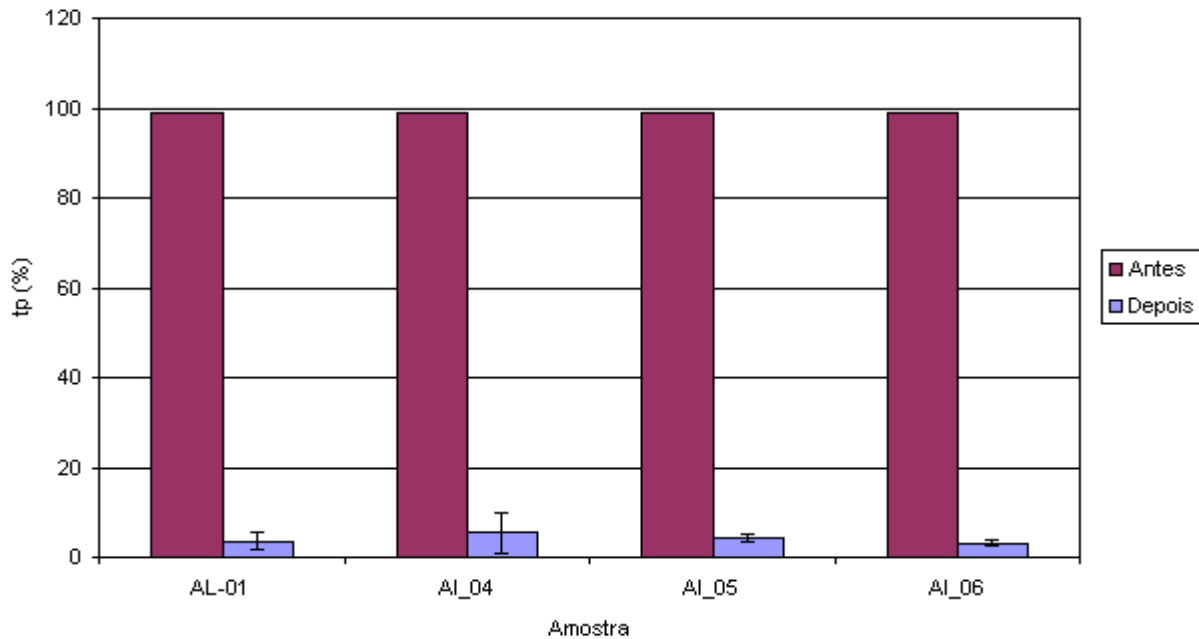


**Figura 8. Coeficiente de achatamento Sku antes e depois dos ensaios de desgaste.**

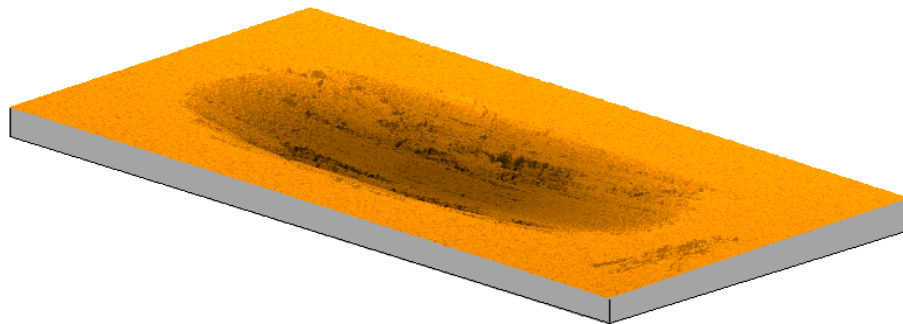
Os valores da porcentagem de apoio de cada superfície são sintetizados na Figura 9. Observa-se uma drástica redução na capacidade de apoio dentro das marcas de desgaste para todas os grupos de amostras. A amostra AI\_06, que sofreu o procedimento de anodização 3, apresentou a mais drástica redução, provavelmente devido ao alargamento dos poros. Tais valores mostram-se compatíveis



com a imagem topográfica das marcas de desgaste mostradas na Figura 10, que mostra um desgaste bastante severo, com arrancamento não homogêneo de grandes porções de material.



**Figura 9. Capacidade de apoio  $t_p$  antes e depois dos ensaios de desgaste.**



**Figura 10. Marca de desgaste medida por interferometria a laser após ensaio de deslizamento na amostra Al06.**

#### 4. CONCLUSÕES

O processo de anodização proporciona um grande benefício tribológico ao material, sem alterar as dimensões originais do mesmo. Verificou-se pelos ensaios que a taxa de desgaste do alumínio anodizado é reduzida significativamente, quando comparada com o alumínio apenas polido.

Com relação aos diferentes processos de anodização, observou-se que o procedimento (2) proporcionou uma redução considerável da taxa de desgaste do contra-corpo esférico. Tal análise é importante em um sistema tribológico, uma vez que não basta produzir um material de alta dureza e resistência, se este quando colocado no sistema mecânico atua como elemento de degradação dos demais componentes que com ele interagem.

#### 5. AGRADECIMENTOS

Agradecemos em especial ao professor André Avelino Pasa (UFSC) pelo fornecimento das amostras.

## 6. REFERÊNCIAS

- Budinsky, K. G. (1988). Plating processes. Surface Engineering for Wear Resistance, Prentice Hall: 44-77.
- Costa, H. L., V. C. Pandolfelli, et al. (1996). On the abrasive wear of zirconias. Wear **203-204**: 626-636.
- De Mello, J. D. B. and R. Binder (2006). A methodology to determine surface durability in multifunctional coatings applied to soft substrates. Tribology International **39**(8): 769-773.
- Hutchings, I. M. (1992). Tribology - friction and wear of engineering materials. London, Arnold.
- Jacomine, L., L. D. P. Barcelos, et al. (2004). Quantificação da perda de volume em desgaste via interferometria laser e análise de imagem. 59th Internacional ABM Congress, São Paulo.
- Milan, J. C. G., M. A. Carvalho, et al. (2005). Effect of temperature, normal load and pre-oxidation on the sliding wear of multi-component ferrous alloys. Wear **259**(1-6): 412-423.
- Rickerby, D. S. and A. Matthews (1991). Advanced Surface Coatings: A Handbook of Surface Engineering. Glasgow, Blackie & Limited.

## TRIBOLOGICAL EVALUATION OF ANODISED ALUMINIUM. PART 1: SLIDING TESTS

### Tarsis Prado Barbosa

Laboratório de Tribologia e Materiais, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia  
Bloco 1R, Av. João Naves de Ávila 2160, 38400-902, Uberlândia MG, Brasil  
tircispb@yahoo.com.br

### Roberto Lopes Salvador

ro\_salvador@hotmail.com

### Henara Lillian Costa

ltm-henara@mecanica.ufu.br

### José Daniel Biasoli de Mello

ltm-demello@ufu.br

**Abstract:** *Aluminum and its alloys can be good materials for non-lubricated sliding contacts, especially when they are surface treated. In this paper, the tribological behavior of aluminum was investigated after two different anodizing processes and a third complementary process used for increasing the pore size. The evaluation was performed using: i) sliding wear tests (Part 1) and ii) micro abrasion wear tests, which will be presented in a following paper (Part 2) Dry sliding tests were carried out in air in a reciprocating tribometer Model Plint & Partners under a normal load of 0.5 kg. Friction coefficient and contact resistance data were acquired during the tests. The counter body (pin) was a 10 mm AISI 52100 steel sphere. The sample was attached to a reciprocating table moving at a frequency of 2 Hz, which accounts for a stroke amplitude of 0.,004 m. Four different samples were tested and a total of four tests per sample were carried out, which gives a total of 16 tests. Laser interferometry and a specially designed software were used to measure the wear rates for each sample. The counter-body wear rate was measured using an optical microscope and an image analysis system. Three families of surface topography parameters were calculated: one height parameter ( $S_q$ ), two parameters associated with the statistical distribution of the irregularities and one parameter derived from the Abbott-Firestone curve ( $tp$ ), which characterizes the surface load support.*

**Keywords:** *Aluminum anodizing, tribology, sliding wear, surface topography.*