

# Comportamento em desgaste para revestimentos obtidos por eletrodeposição por plasma eletrolítico em liga de alumínio

Maria Eliziane Pires de Souza<sup>1</sup>, Maria Aparecida Pinto<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Dra. em Engenharia Mecânica, Professora Universidade Federal do Maranhão, [maria.eliziane@ufma.br](mailto:maria.eliziane@ufma.br);

<sup>2</sup>Dra. em Engenharia Mecânica, Professora Universidade Federal de Ouro Preto, [mariap06@gmail.com](mailto:mariap06@gmail.com).

**Resumo** – O processo de oxidação por plasma eletrolítico (PEO) tem sido estudado e empregado para produção de revestimentos sobre ligas de alumínio e outras metais. Neste trabalho, revestimentos obtidos por plasma eletrolítico foram produzidos sobre a superfície de ligas de alumínio A356.0, sendo empregado como solução eletrolítica Silicato de sódio. Duas condições de tensão foram empregadas 250 V e 300 V. Durante o processo foram acompanhadas a corrente e a temperatura. Os revestimentos obtidos foram caracterizados por desgaste microabrasivo, utilizando o ensaio esfera-sobre-placas. Foi possível constatar que em menor tensão (250 V), houve maior formação de filme sobre a placa bem como uma melhor resposta em termos de desgaste.

**Palavras-chave:** PEO, desgaste, revestimento.

**Abstract** – Plasma electrolytic oxidation (PEO) process has been studied and used to produce coatings on aluminum alloys and other metals. In this work, PEO treatment was performed on A356.0 aluminium alloy in a silicate solution. Two voltage conditions were used 250 V and 300 V. During the process the current and the temperature were monitored. The coatings obtained were characterized by microabrasive wear using the ball-and-plate test. It was possible to observe that in a lower voltage (250 V), there was a higher film formation on the plate as well as a better wear response.

**Keywords:** PEO, wear, coating.

## I. INTRODUÇÃO

As ligas de alumínio estão cada vez mais presentes em peças e equipamentos mecânicos. Como exemplo, as ligas fundidas de Al-Si, que têm substituído o ferro fundido na produção de peças para motores a combustão, uma vez que esses têm aumentado em muito a eficiência, exigindo com isso, materiais mais resistentes [1]. Porém, devido à baixa dureza e resistência ao desgaste limitada, o uso dessas ligas para algumas aplicações se torna inviável [2, 3].

A modificação de superfícies geralmente é realizada nos materiais com o objetivo de conferir a estes, características não encontradas em sua forma natural e, desta forma, ampliar suas possibilidades de aplicação [4, 5]. Os revestimentos são uma opção eficiente para a obtenção de superfícies resistentes ao desgaste e a corrosão [6, 7]. Nesse sentido, o processo de oxidação por plasma eletrolítico (PEO – *Plasma Electrolytic Oxidation*) é uma alternativa viável para a

produção de revestimentos em metais como o alumínio, que apresentam baixo ponto de fusão, uma vez que o mesmo é realizado a pressão atmosférica e em temperaturas relativamente baixas [7, 8]. O desenvolvimento tecnológico envolvendo plasmas tem fundamental importância nas indústrias eletrônica, aeroespacial, metalúrgica, biomédica e de tratamento de resíduos e detritos e pode ser uma atraente alternativa de processamento de materiais para a obtenção de filmes finos protetivos em ligas metálicas [9, 10].

Sendo assim, a proposta deste trabalho foi preparar revestimentos via PEO e verificar o comportamento dos mesmos em termos de desgaste abrasivo, que pode ser definido segundo Cozza [11] como o desgaste devido a partículas duras ou protuberâncias duras forçadas contra e movendo-se ao longo de uma superfície sólida.

## II. MATERIAIS E MÉTODOS

### A. Preparo das amostras

Como substrato para os revestimentos foram empregada ligas fundidas de Al-Si (A356.0) com a composição especificada na Tabela 1.

Tabela 1 – Composição química nominal e real (% em peso) da liga Al-Si - A356.0.

| Elementos             | Real    | Nominal [12] |
|-----------------------|---------|--------------|
| Si                    | 6,88 >  | 6,5-7,5      |
| Fe <sub>max</sub>     | 0,06 <  | 0,20         |
| Cu <sub>max</sub>     | 0,00    | 0,20         |
| Mn                    | 0,00    | 0,10         |
| Mg                    | 0,22 <  | 0,25-0,45    |
| Zn                    | 0,01    | 0,10         |
| Ti                    | 0,06    | 0,20         |
| Outros <sub>max</sub> | 0,014   | 0,15         |
| Al                    | balanço | balanço      |

Antes do processo de deposição as amostras foram lavadas utilizando uma cuba ultrassônica (Tecnal – USC 1400) e solução de água e detergente, como agentes de limpeza, seguido de ultrassom em álcool isopropílico. Depois de limpas, as amostras foram secas uma a uma com soprador térmico e armazenadas. Todo processo foi feito utilizando-se de pinça para o manuseio das amostras, evitando que resíduos se depositassem sobre as amostras.

SOUZA, M. E. P. ; PINTO, M. A.

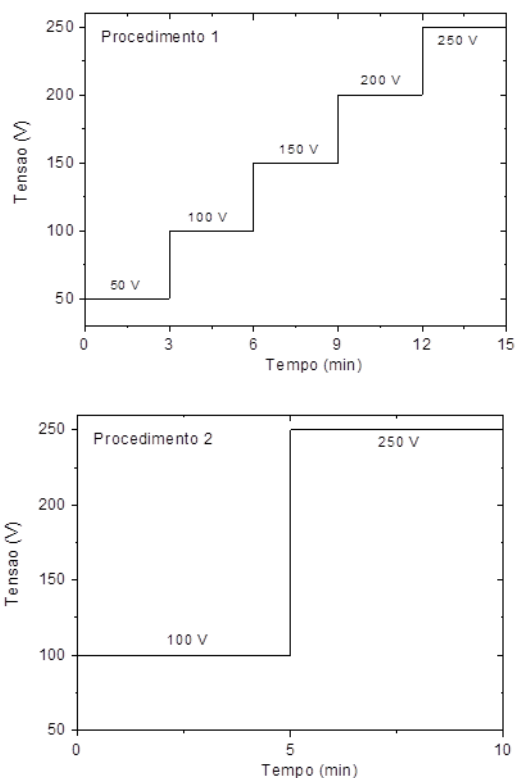
Comportamento em desgastes para revestimento obtidos por eletrodeposição por plasma eletrolítico em liga de alumínio

©Revista Ciência e Tecnologia, Campinas, v. 21, n. 38, p. 11-16, jan./jun. 2018 - ISSN: 2236-6733

### B. Soluções e procedimentos empregados no PEO

A solução utilizada no preparo dos revestimentos tinha como elemento principal o silicato de sódio (15 g/l) acrescentado de fosfato de sódio bibásico heptahidratado 1,5g/L. Para se atingir as condições de plasma foram empregados dois procedimentos, onde variou-se o tempo de permanência na tensão de plasma (fagulhas) e a forma como atingiu-se essa tensão. Os dois procedimentos empregados são apresentados nas Figuras 1a e 1b. Para cada procedimento foram produzidas três amostras, que foram então caracterizadas.

Figura 1 – Procedimentos para obtenção do plasma, Procedimento 1 (acima); Procedimento 2 (abaixo).



Fonte: Autores.

### C. Sistema empregado no processo

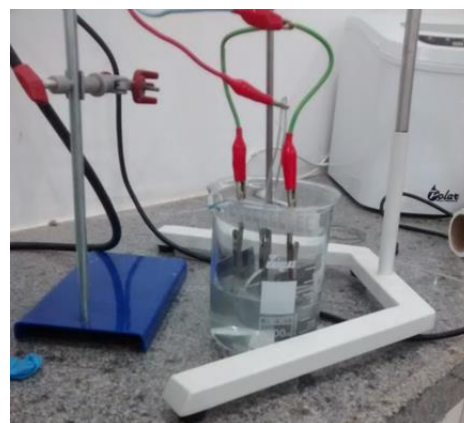
O sistema empregado no processamento a plasma eletrolítico era composto por uma fonte de alimentação de corrente contínua (Powerbras), onde a amostra a ser revestida era conectada no polo positivo (anodo) e o polo negativo (catodo) era composto de dois contra eletrodos de aço inoxidável, sendo todos os três elementos imersos na solução eletrolítica. A disposição dos equipamentos é mostrada nas Figuras 2 e 3. Durante o processamento o eletrólito era mantido em agitação com agitador mecânico e a temperatura do banho era monitorada para que a mesma não ultrapassasse 70 °C. O uso de banho de gelo era a forma empregada para que a temperatura do banho fosse mantida em valores próximos a 50 °C.

Figura 2 – Fonte de corrente contínua empregada para o procedimento de plasma eletrolítico e sistema acoplado.



Fonte: Autores

Figura 3 – Detalhe da montagem do sistema eletroquímico para a deposição a plasma.



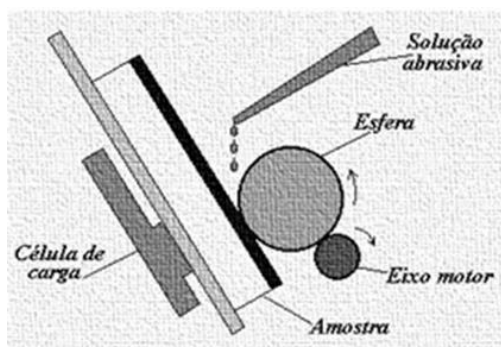
Fonte: Autores.

### D. Caracterização dos revestimentos

As amostras foram pesadas antes e depois da aplicação do revestimento, para verificar a quantidade de filme que se formou na superfície. As superfícies revestidas foram observadas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) utilizando o Microscópio eletrônico de varredura JEOL JSM-6010 do Laboratório de Plasma Tecnológico/UNESP-Sorocaba, a técnica de EDS (Espectroscopia de dispersão de energia) foi empregada para qualificar a composição dos revestimentos. Os ensaios de resistência ao desgaste foram executados em equipamento desenvolvido dentro do Projeto de Pesquisa Universal N° APQ-02225-09 – Edital FAPEMIG 01/2009. Esse equipamento pertence ao Laboratório de Fundição do Departamento de Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Ouro Preto.

A suspensão abrasiva utilizada nos ensaios foi constituída de carvão de silício F1200 em água.

Figura 4 – Esquema do ensaio de desgaste microabrasivo esfera-sobre-placa.



Fonte: [13].

Os parâmetros para os ensaios de desgaste abrasivo foram:

- Carga aplicada: 0,5 N
- Velocidade de rotação da esfera: 100 rpm
- Distância de rodagem: 180 m
- Material da esfera: Aço AISI 52100
- Diâmetro da esfera: 25 mm
- Concentração da suspensão abrasiva: 200g/l

As superfícies de desgaste das amostras foram analisadas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) para caracterização dos mecanismos de desgaste atuantes. O microscópio empregado nessa caracterização foi o VEJA 3 – TESCAN do Instituto Federal de Minas Gerais – Campus Ouro Preto.

### III. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Durante a produção dos revestimentos a variação de corrente (mA) foi monitorada e esses dados são apresentados nas Tabelas 2 e 3, que são referentes respectivamente aos procedimentos 1 e 2.

Tabela 2 – Variação de Tensão e corrente durante o procedimento 1.

|           | Tensão (volts) | Corrente (A) | Corrente após 2 min. (A) |
|-----------|----------------|--------------|--------------------------|
| Amostra 1 | 50             | 0,50         | 0,22                     |
|           | 100            | 0,54         | 0,20                     |
|           | 150            | 0,54         | 0,23                     |
|           | 200*           | 1,16         | 0,25                     |
|           | 250            | 1,34         | 0,74                     |
| Amostra 2 | 50             | 0,48         | 0,25                     |
|           | 100            | 0,90         | 0,25                     |
|           | 150            | 1,10         | 0,27                     |
|           | 200*           | 1,20         | 0,23                     |
|           | 250            | 1,30         | 0,23                     |
| Amostra 3 | 50             | 0,50         | 0,17                     |
|           | 100            | 0,80         | 0,20                     |
|           | 150            | 1,02         | 0,22                     |
|           | 200*           | 1,20         | 0,25                     |
|           | 250            | 0,40         | 0,30                     |

A diminuição nos valores de corrente após certo intervalo de tempo é esperado, visto que com o

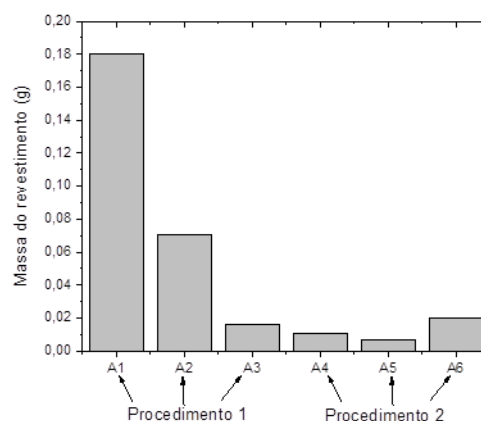
crescimento de um filme óxido a passagem de corrente vai se tornando mais difícil, já que esse filme funciona como uma resistência. Essa diminuição permanece até que ocorra o rompimento (quebra) desse revestimento ou um novo valor de tensão é aplicado.

Tabela 3 – Variação de Tensão e corrente durante o procedimento 2.

|           | Tensão (volts) | Corrente (A) | Corrente após 2 min. (A) |
|-----------|----------------|--------------|--------------------------|
| Amostra 4 | 100            | 0,45         | 0,24                     |
|           | 250            | 0,30         | 0,19                     |
| Amostra 5 | 100            | 0,98         | 0,19                     |
|           | 250            | 0,55         | 0,14                     |
| Amostra 6 | 100            | 0,70         | 0,15                     |
|           | 250            | 1,10         | 0,20                     |

Na Figura 5 é apresentado os valores da massa acrescentada de nas amostras após o processo de revestimento.

Figura 5 – Massa de revestimento formada obtida pela variação das massas das amostras antes e após os procedimentos de plasma.



Fonte: Autores.

Como pode ser observado, o procedimento 1 foi o que resultou um maior aumento de massa, ou seja, mais filme foi formado durante esse processamento. Houve uma diferença grande entre as amostras e esse fato pode ser associado à montagem do sistema, que como não existia um adequado controle nas distâncias entre os eletrodos e também na agitação, talvez tenha favorecido a formação de revestimento. Porém, pode-se dizer que no procedimento 1, o tempo maior de processo permite que mais filme seja formado, mesmo tendo sido alcançado a mesmo valor de tensão. Durante este processo, o filme em formação passa por diversos estágios.

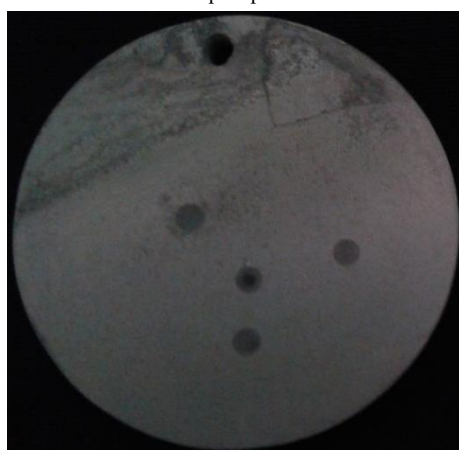
Amostras contendo revestimentos obtidos pelos dois procedimentos foram submetidas à análise quanto à resistência ao desgaste abrasivo (tipo esfera rotativa). As calotas geradas no ensaio são apresentadas nas fotos da Figura 6 e 7. Na Amostra obtida pelo procedimento 2, Figura 7, uma das calotas (central) foi desconsiderada por problemas durante o ensaio.

Figura 6 – Calotas geradas no ensaio de desgaste para revestimento obtido pelo procedimento 1.



Fonte: Autores.

Figura 7 – Calotas geradas no ensaio de desgaste para revestimento obtido pelo procedimento 2.



Fonte: Autores.

Os diâmetros das calotas de desgaste foram medidos utilizando-se imagens de microscópio eletrônico e os seus valores são apresentados na Tabela 4, os resultados apresentados correspondem à média de 3 ensaios. As calotas produzidas nos ensaios apresentam a forma perfeitamente circular, o que possibilitou a utilização da Equação 1 para o cálculo dos valores do coeficiente de desgaste ( $k$ ).

$$k = \frac{\pi d^4}{128 t n_{EFS} F_N R^2} \quad (1)$$

Na Equação 1  $d$  é o diâmetro da calota esférica resultante,  $R$  é o raio da esfera,  $F_N$ ,  $n_{EFS}$  e  $t$  são parâmetros de ensaio (força normal, rotação da esfera e tempo de ensaio, respectivamente) [11]. Mantendo-se  $R$ ,  $n_{EFS}$  e  $t$  constantes e variando-se somente  $F_N$ , o diâmetro da calota de desgaste  $d$  irá variar diretamente com  $F_N$ .

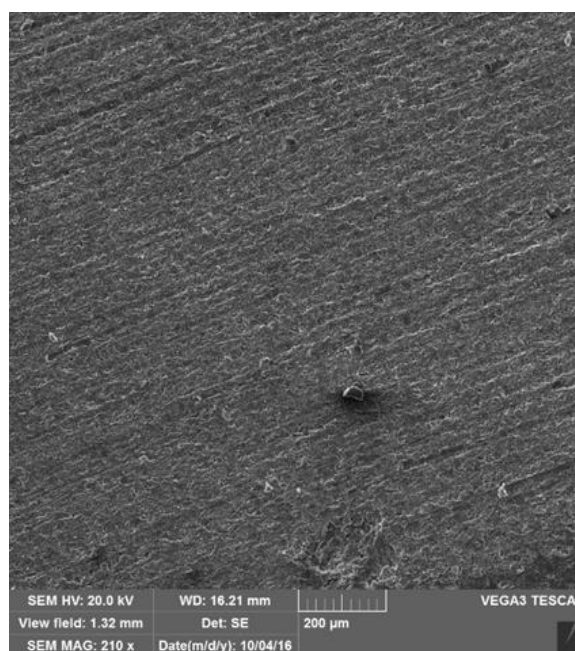
A partir dos dados da Tabela 4, pode-se dizer que a maior resistência ao desgaste abrasivo foi obtida para o revestimento preparado pelo procedimento 1, uma vez que seu coeficiente de desgaste é uma ordem de grandeza menor que aquele o do revestimento obtido via procedimento 2.

Tabela 4 – Diâmetro das calotas e coeficiente de desgaste  $k$ , calculado pela Equação 1.

| Amostra        | Diâmetro da Calota ( $\mu\text{m}$ ) |         | $k$ ( $\text{m}^3/\text{N.m}$ ) |
|----------------|--------------------------------------|---------|---------------------------------|
|                | 1                                    | 2       |                                 |
| Procedimento 1 | 1                                    | 1100,67 | $9,177 \times 10^{-14}$         |
|                | 2                                    | 1617,48 |                                 |
|                | 3                                    | 1578,22 |                                 |
|                | Média ( $\mu\text{m}$ )              | 1432,12 |                                 |
|                | Desvio Padrão                        | 287,72  |                                 |
| Procedimento 2 | 1                                    | 1765,30 | $2,319 \times 10^{-13}$         |
|                | 2                                    | 1794,89 |                                 |
|                | 3                                    | 1857,02 |                                 |
|                | Média ( $\mu\text{m}$ )              | 1805,74 |                                 |
|                | Desvio Padrão                        | 46,81   |                                 |

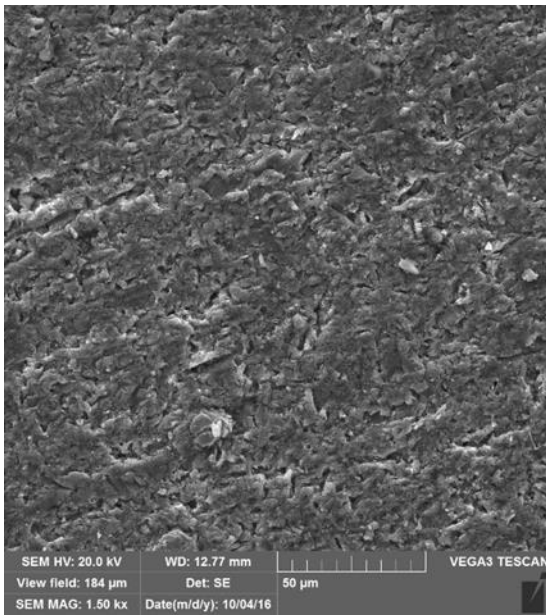
Os mecanismos de desgaste presentes nos dois revestimentos foram investigados através das imagens de MEV das superfícies das calotas geradas com o desgaste. Nas Figuras 8 e 9 são apresentadas as superfícies dos revestimentos obtidos pelo procedimento 1. Já as Figuras 10 e 11 são referentes aos revestimentos obtidos pelo procedimento 2.

Figura 8 – Superfície da calota de desgaste – revestimento obtido procedimento 1.



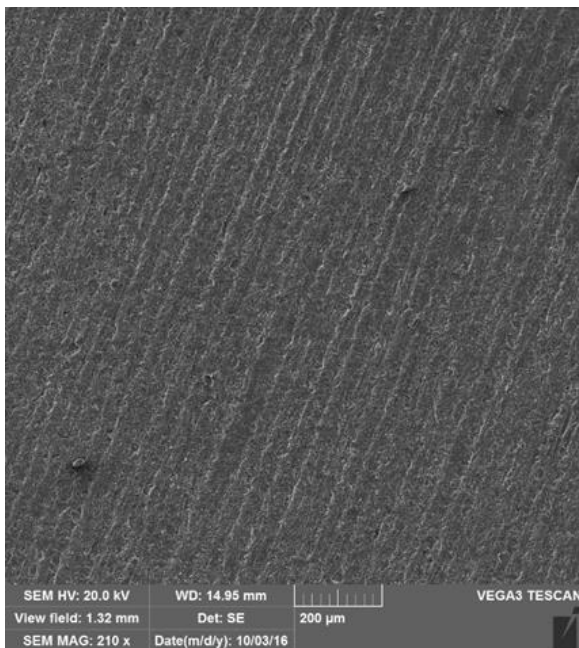
Fonte: Autores.

Figura 9 – Aumento na região de desgaste – revestimento obtido procedimento 1.



Fonte: Autores.

Figura 10 – Superfície da calota de desgaste – revestimento obtido procedimento 2.

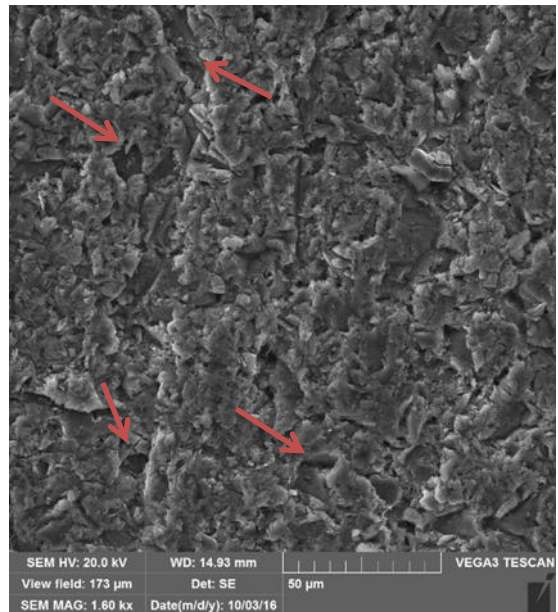


Fonte: Autores.

Pela análise dessas imagens é possível perceber que a remoção de material da superfície ocorreu pela ação combinada dos mecanismos de microsulcamento e rolamento provocados pelas partículas do abrasivo. Entretanto, para os revestimentos obtido pelo procedimento 1, Figura 9, observa-se que os sulcos possuem menor profundidade, o que levou a um menor coeficiente de desgaste.

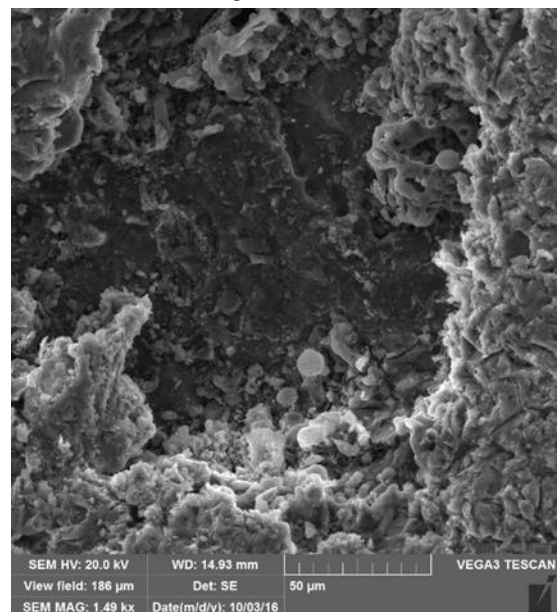
O revestimento obtido pelo procedimento 2 apresentou maior irregularidade na superfície comparativamente ao outro revestimento. Essas irregularidades podem ter contribuído para a redução da resistência ao desgaste, uma vez que facilitam a remoção de material pela ação das partículas abrasivas. Essa remoção de material pode ser visualizada de forma mais evidente nas regiões apontadas pelas setas na Figura 11, e destacada na Figura 12, onde uma cratera é apresentada.

Figura 11 – Superfície da calota de desgaste – revestimento obtido no procedimento 2.



Fonte: Autores.

Figura 12 – Região de remoção de material, revestimento obtido no procedimento 2.



Fonte: Autores.

#### IV. CONCLUSÕES

A partir dos resultados apresentados fica claro que os dois procedimentos empregados no processo de oxidação por plasma eletrolítico levam a formação de revestimentos distintos em termos de morfologia e comportamento em desgaste. Apesar de ambos serem formados por óxido de alumínio e silício, durante o processo de oxidação a plasma a forma como o filme vai sendo formado parece ser um pouco diferenciada. Desta forma, os revestimentos obtidos em condições experimentais diferentes, mesmo empregando a mesma solução eletrolítica, resultaram em propriedades e comportamentos distintos.

O revestimento obtido através do procedimento 1 resultou em uma maior quantidade de revestimento e apresentou um melhor comportamento em termos de desgaste abrasivo. A formação de um revestimento muito heterogêneo e cheio de aglomerados, no caso do procedimento 2, leva um revestimento menos resistente em termos de desgaste.

#### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o suporte financeiro das agências FAPEMIG (projeto APQ-00190-10) e FAPEMA.

#### REFERÊNCIAS

- [1] DAVIS, F.A.; EYREA, T.S. The effect of silicon content and morphology on the wear of aluminium-silicon alloys under dry and lubricated sliding conditions. *Tribology International*, v. 27, n. 3, p.171-181, 1994.
- [2] MALAYOGLU, U.; TEKIN K. C.; SHRESTHA, S. An investigation into the mechanical and tribological properties of plasma electrolytic oxidation and hard-anodized coatings on 6082 aluminum alloy. *Material Science and Engineering A*, v. 528, p. 7451-7460, 2011.
- [3] ZHUANG, J. J.; GUO, Y. Q.; XIANG, N.; LU, X. Y.; HU Q.; SONG, R. G.. Sliding wear behaviour and microstructure of PEO coatings formed on aluminium alloy. *Materials Science and Technology*, v. 32, p. 1559-1566, 2016.
- [4] OLIVEIRA, C. R. Alteração das propriedades superficiais do alumínio via eletrólise a plasma. 122f. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual Paulista, Sorocaba, 2010.
- [5] GEORGIOS, S. E. Antipas, Augmentation of Wear-protective Coatings for Non-ferrous Alloys by the Addition of Cr and Ni Elements. *Materials Research*. v. 17, p. 1485-1488, 2014.
- [6] ARRABAL, R.; MOHEDANO M.; MATYKINA E.; PARDO, A.; MINGO, B.; MERINO, M.C. Characterization and wear behaviour of PEO coatings on 6082-T6 aluminium alloy with incorporated  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particles. *Surface and Coatings Technology*, v. 269, p. 64-73, 2015.
- [7] NIE, X.; MELETIS, E.I.; JIANG, J.C.; LEYLAND, A.; YEROKHIN, A. L.. Abrasive wear/corrosion properties and TEM analysis of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> coatings fabricated using plasma electrolysis. *Surface and Coatings Technology*, v. 149, p. 245-251, 2002.
- [8] NIE, X.; LEYLAND, A.; SONG, H. W.; YEROKHIN, A. L.; DOWEY, S. J.; MATTHEWS, A. Thickness effects on the mechanical properties of micro-arc discharge oxide coatings on aluminium alloys. *Surface and Coatings Technology*, v. 119, p. 1055-1060, 1999.
- [9] YEROKHIN, A.L.; NIE, X.; LEYLAND, A.; MATTHEWS, A.; DOWEY, S. J. Plasma Electrolysis for surface engineering. *Surface and Coatings Technology*, v. 122, p.73-93, 1999.
- [10] MU, M.; ZHOU, X.; XIAO, Q.; LIANG, J.; HUO, X. Preparation and tribological properties of self-lubricating TiO<sub>2</sub>/graphite composite coating on Ti6Al4V alloy. *Applied Surface Science*, v. 258, p. 8570-8576, 2012.
- [11] COZZA, R. C. Estudo do comportamento do coeficiente de desgaste e dos modos de desgaste abrasivo em ensaios de desgaste microabrasivo. Dissertação de mestrado, Universidade de São Paulo – USP, São Paulo, 2006.
- [12] KAUFMAN, J. G.; ROOY, E. L. **Aluminum Alloys Castings – Properties, Process and Applications**. 1. ed. ASM International, 2004.
- [13] PINTO, M. A. Deposição de Revestimentos Compósitos Metal-Cerâmico WC-Co por Fusão a Laser: Avaliação da Resistência ao Desgaste e à Corrosão. Tese de Doutorado, Unicamp (Universidade Estadual de Campinas), Campinas, 2004.