

# TRIBOSCOPIA: PRINCÍPIOS, POTENCIALIDADES DA TÉCNICA E APLICAÇÃO EM ENSAIOS DE DESGASTE POR DESLIZAMENTO<sup>1</sup>

Antônio César Bozzi<sup>2</sup>  
José Daniel Biasoli de Mello<sup>3</sup>

## Resumo

O presente trabalho apresenta a técnica denominada triboscopia. Esta técnica baseia-se na produção de imagens numéricas dos dados coletados durante o ensaio. O eixo x representa a posição relativa da sonda de deslizamento (contra-corpo) e o eixo y o número de ciclos de deslizamento. Em cada posição  $(x_0, y_0)$ , o nível de intensidade de cada pixel corresponde ao valor do parâmetro medido. Assim, para a obtenção de mapas triboscópicos de ensaios de desgaste por deslizamento com uma alta resolução espacial e temporal, implementou-se neste trabalho um sistema de aquisição dos sinais do potencial elétrico de contato e da força de atrito gerado por um tribômetro, além de se desenvolverem as rotinas computacionais necessárias. Após a implementação deste sistema, foram gerados os mapas triboscópicos do potencial elétrico de contato de ensaios de desgaste por deslizamento alternado com amostras de aço-silício com recobrimento orgânico isolante do tipo AISI C3, para se avaliar as características e as vantagens do uso desta técnica sobre a forma tradicional de apresentação de resultados de ensaios de deslizamento. Os resultados mostraram que a implementação de um sistema capaz da geração de mapas triboscópicos em ensaios de deslizamento é relativamente simples e economicamente barata. Além disso, a utilização de mapas triboscópicos do potencial de contato em ensaios de desgaste por deslizamento realizados nas amostras de aço-silício recobertas permitiu ao mesmo tempo uma visão global e detalhada com uma alta resolução espacial dos fenômenos que ocorreram durante o ensaio.

**Palavras-chave:** Triboscopia; Ensaio de desgaste por deslizamento; Potencial elétrico de contato; Recobrimento isolante

## TRIBOSCOPY: PRINCIPLES, TECHNICAL POTENTIALITIES AND USE IN SLIDING WEAR TESTS

### Abstract

The present work introduces the triboscopic technique. This technique is based on the generation of numerical images of the acquired and evaluated data through a tribological test. The x axis represents the relative position on the wear track of the sliding wear probe and the y axis the number of sliding cycles. In each position  $(x_0, y_0)$  the level of intensity of every pixel corresponds to the numerical value of assessed tribological parameter. This type of graphics converts time dependent data in a dependent map  $(x, y)$ . To carry out this technique and generate a triboscopic map of high spatial and time resolution, a signal acquisition system of the electric contact potential and the friction force generated by a tribometer was implemented and also a computational routine was developed. After that, reciprocating sliding wear tests were performed using electrical steels samples coated with different types of AISI C3 insulating organic coatings. The results showed that the triboscopical maps can be easily and cheaply put into practice. In addition, the use of the triboscopical maps in sliding wear tests provided a better way of presenting the results of the tests when compared with the traditional representation, showing at the same time a global and a detailed approach of wear processes occurring throughout a test.

**Key words:** Triboscopy; Sliding wear; Electric contact potential; Insulating coating

<sup>1</sup> Contribuição técnica apresentada na 61º Congresso Anual da ABM, de 24 a 27 de julho de 2006, Rio de Janeiro – RJ

<sup>2</sup> Doutor, Laboratório de Tribologia e Materiais, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia

<sup>3</sup> Professor titular, Laboratório de Tribologia e Materiais, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia

# 1 INTRODUÇÃO

A compreensão da degradação de uma interface sujeita ao movimento relativo é um dos principais objetos de estudo da tribologia. Este estudo pode ser feito em diferentes escalas dimensionais. Em macrotribologia e em microtribologia, exploram-se as escalas de vão desde centímetros e milímetros até micrômetros e sub-micrômetros, respectivamente.<sup>(1)</sup> Já em nanotribologia, escalas dimensionais ainda menores, da ordem de nanômetros, são exploradas a fim de se obter uma melhor compreensão nesses domínios do fenômeno macroscópico do desgaste e atrito. Logicamente, a compreensão de um sistema complexo tal como um sistema tribológico é influenciado pela escala dimensional em que podemos explorá-lo e representá-lo.<sup>(1,2)</sup>

Geralmente, a fim de se descrever um sistema tribológico de deslizamento/rolamento, a evolução de um dado físico  $P$  versus o tempo de ensaio  $t$  ou a distância de deslizamento  $L$  tem sido usada durante décadas pelos tribologistas. Este tipo de resultado leva às curvas clássicas  $P(t)$  ou  $P(L)$ , dando informações sobre a evolução geral do contato. Assim, por exemplo, através de uma curva da variação do volume de desgaste  $V$  da esfera em um ensaio esfera-sobre-plano, é possível com uma simples observação reconhecer o período de amaciamento, o período do regime estável e o desenvolvimento ou a falha da camada de transferência. Em tal curva, a regularidade, a inclinação ou as descontinuidades fornecem informações valiosas sobre o fenômeno ocorrendo no contato.<sup>(3)</sup>

Este conhecimento é útil em aplicações, a fim de se prever o tempo de vida de um sistema real e para planejar as operações de manutenção de qualquer sistema. Deste modo, estes dados quantitativos são importantes.

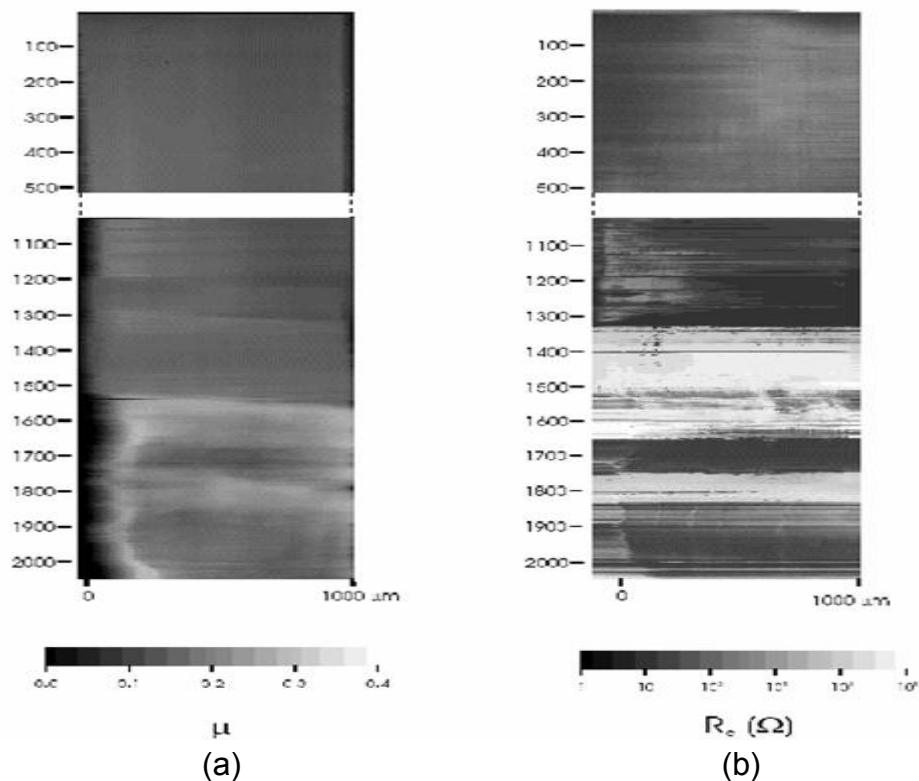
Por outro lado, grandes desenvolvimentos têm sido realizados para se descrever mais acuradamente o fenômeno que ocorre em um contato sob atrito através de outras abordagens. Uma delas é através de experimentos que permitem acompanhar os ensaios de deslizamento com a visualização direta da zona de contato por meio da microscopia ótica<sup>(4)</sup> ou da microscopia eletrônica de varredura.<sup>(5)</sup>

Uma outra abordagem é através da técnica denominada triboscopia, que objetiva melhorar a descrição de um contato submetido ao movimento relativo. Para isto, se considera que os fenômenos tribológicos possuem quatro características principais: eles são todos locais, ocorrem em uma escala microscópica, são dependentes do tempo e podem ter efeitos diretos na força de atrito, resistência elétrica de contato ou quaisquer outros parâmetros tribológicos.<sup>(6)</sup>

A terminologia e a técnica da triboscopia foi empregada primeiramente por Belin et al.,<sup>(1,6,7)</sup> que demonstrou que informações complementares da condição do contato podem ser obtidas através do registro simultâneo de medidas de atrito e de resistência de contato espacialmente resolvidas, ou seja, esta técnica monitora a evolução de fenômenos locais dependentes do tempo (como a falha de um recobrimento não condutor) com uma resolução espacial limitada somente pelo tamanho do contato entre corpo e contra-corpo (diâmetro de Hertz).

Esta técnica pode ser descrita considerando-se um ensaio de desgaste no qual uma esfera desliza contra uma amostra plana, com uma carga normal constante  $W$ , em um movimento alternado de frequência  $F$  constante com  $N$  ciclos de amplitude  $A$ . Durante o deslizamento, sinais de um parâmetro físico  $P$  qualquer, tal como a força de atrito  $F_t$  ou a resistência elétrica de contato da interface  $R_c$  são adquiridos e armazenados continuamente.

A triboscopia se baseia fundamentalmente na produção de imagens numéricas destes sinais adquiridos durante o ensaio, no qual o eixo  $x$  representa a posição da sonda de deslizamento (esfera) ou contra-corpo em relação à amostra e o eixo  $y$  representa o número  $N$  de ciclos. Em cada posição  $(x_0, y_0)$ , o nível de intensidade de cada pixel corresponde ao valor do sinal do parâmetro físico adquirido. A Figura 1 exemplifica didaticamente os mapas triboscópicos do coeficiente de atrito (a) e da resistência elétrica de contato (b) de um ensaio de desgaste por deslizamento. Nestes mapas, os eixos horizontais fornecem a posição da trilha de desgaste e os eixos verticais o número de ciclos percorridos. Em baixo, têm-se as escalas de intensidade de cinza correspondentes aos valores dos parâmetros avaliados.



**Figura 1.** Mapa triboscópico do coeficiente de atrito (a) e da resistência elétrica de contato (b) de um ensaio de desgaste por deslizamento.<sup>(8)</sup>

Este tipo de representação converte dados dependentes do tempo em um diagrama dependente de  $(x, y)$ . Deste modo, como os resultados obtidos aparecem como imagens numéricas, cada qual correspondente à variação dos vários parâmetros físicos avaliados durante ensaios de desgaste em função do espaço e tempo, como é comum em outras técnicas microscópicas, ela foi denominada de triboscopia.<sup>(9)</sup>

Portanto, uma imagem ou mapa triboscópico é uma representação bidimensional de flutuações dos parâmetros físicos  $P(t)$  durante um ensaio de desgaste com uma resolução espacial e temporal superior à comumente obtida com a representação clássica destes parâmetros físicos. Através do uso desta forma de apresentação, podemos localizar algumas variações instantâneas, ambas no tempo e na posição, de quaisquer parâmetros triboscópicos monitorados durante um ensaio tribológico. Deste modo, as imagens numéricas produzidas pela triboscopia contêm simultaneamente os detalhes inerentes às peculiaridades locais, sem perder de vista a evolução global do fenômeno tribológico.<sup>(1,2,6-9)</sup>

Devido ao fato da técnica triboscópica ser de implementação relativamente simples e barata, permitindo uma melhor compreensão do fenômeno do desgaste e do atrito em escalas micrométricas por causa maior resolução espacial e temporal, é natural se esperar que ela possua uma imensa potencialidade de aplicação em ensaios de desgaste por deslizamento. Contudo, uma extensa pesquisa na literatura técnico-científica indica que esta potencialidade ainda não foi aproveitada e que há poucos trabalhos abordando e utilizando esta técnica.<sup>(1,2,6-11)</sup>

Tendo-se isto em vista, procurou-se neste trabalho realizar a implementação de um sistema de aquisição de sinais do potencial elétrico de contato e da força de atrito fornecida por um tribômetro, com a devida construção de um sistema de condicionamento de sinais, a uma taxa de aquisição suficiente para a obtenção de mapas triboscópicos de ensaios de desgaste por deslizamento com alta resolução espacial e temporal, aliado ao desenvolvimento das rotinas computacionais necessárias para isto.

Após a implementação, ensaios iniciais de desgaste por deslizamento para a validação e a calibração da imagem triboscópica gerada foram realizados com uma chapa de aço elétrico recoberta com uma camada isolante, devidamente preparado para este fim. A seguir, as peculiaridades e as vantagens desta técnica em ensaios tribológicos são analisadas e discutidas.

## 2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Para a geração dos mapas triboscópicos do potencial de contato e coeficiente de atrito de ensaios de deslizamento realizados por um tribômetro Plint & Partners modelo TE 67 foi implementado um sistema de aquisição de dados do tribômetro além do já incluído no equipamento, por causa da baixa taxa de aquisição deste.

Análises preliminares dos parâmetros e das condições de contato em ensaios de deslizamentos típicos mostraram a necessidade de uma taxa de aquisição da ordem de 500 Hz para uma resolução espacial da ordem do diâmetro de contato de Hertz. Deste modo, utilizou-se um outro sistema de aquisição de sinais com uma placa com maior taxa de aquisição, em adição ao já existente no tribômetro.

Como todos os sinais originais fornecidos pelo tribômetro apresentaram um alto nível de ruídos, além de sua distorção devido ao efeito *aliasing*, foi necessário o uso de filtros analógicos para os sinais. Deste modo, foram usados filtros passa-baixo Butterworth de 4<sup>a</sup> e de 2<sup>a</sup> ordem para os sinais do potencial de contato e da força de atrito, respectivamente. Estes filtros foram construídos em uma placa de condicionamento, acoplamento e amplificação dos sinais do tribômetro para o novo sistema de aquisição de sinais.

O programa computacional foi desenvolvido utilizando-se a plataforma LabVIEW<sup>®</sup> da National Instruments, constituindo-se basicamente de três módulos: aquisição, processamento e análise.

Ensaos iniciais para a validação do programa computacional desenvolvido e para o ajuste e a calibração dos parâmetros para a obtenção de um mapa triboscópico otimizado foram realizados por meio de ensaios de desgaste por deslizamento alternado em amostras de chapas de aço elétrico de grãos orientados com 2% de silício, recoberta com revestimentos orgânicos do tipo AISI C3.<sup>(12)</sup> Ensaos adicionais foram realizados em amostras de chapas no qual o recobrimento foi removido em duas regiões com largura de 390  $\mu\text{m}$  para criar artificialmente “defeitos” pela exposição do substrato de aço sem a camada superficial isolante.

Além disso, estes ensaios serviram para a análise das vantagens da triboscopia sobre a forma clássica de apresentação de resultados de ensaios tribológicos.

A escolha de chapas de aço elétrico recobertas com isolante para esses ensaios foi devido à disponibilidade e principalmente por causa da necessidade de se ter um conjugado substrato/recobrimento com valores substancialmente diferentes em termos de resistência elétrica, o que é o caso do conjugado aço elétrico-recobrimento orgânico isolante. Com isto se procura um bom contraste de intensidade no mapa triboscópico do potencial de contato das regiões com e sem a presença do recobrimento.

Os parâmetros usados em todos os ensaios foram os seguintes: carga de 4,9 N, curso e a frequência de deslizamento de 5 mm e 0,5 Hz, respectivamente. Como contra-corpos foram utilizadas esferas de aço AISI 52100 com diâmetro de 5 mm. Estes ensaios foram realizados sem lubrificação na temperatura e umidade ambientes, sendo monitorados a força de atrito e o potencial elétrico de contato.

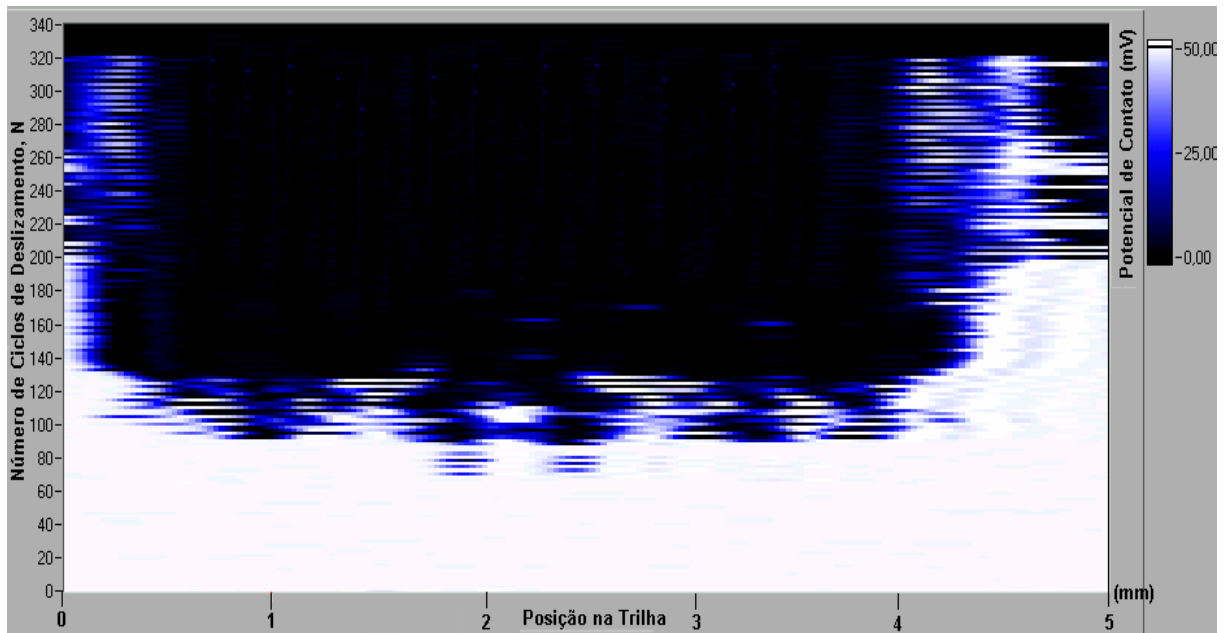
O potencial elétrico de contato monitorado nos ensaios é uma forma de se avaliar a resistência elétrica de contato da interface entre o corpo e o contra-corpo, sendo este medido por meio da aplicação de um pequeno potencial elétrico com um circuito Lunn-Furey. Este circuito consiste basicamente de um divisor de tensão com uma razão fixa de 100:1. Assim, com o circuito utilizado, um valor de potencial de contato de cerca de 50 mV corresponde a nenhum contato (resistência de contato infinita), enquanto que um valor de potencial igual a zero corresponde a um contato total (resistência de contato zero).

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O uso da plataforma de programação LabVIEW<sup>®</sup> permitiu o desenvolvimento de um programa estruturado em módulos compactos e de fácil manutenção. Além disso, a interface com o usuário é bastante amigável e intuitiva.

Na Figura 2 é mostrado o mapa triboscópico do potencial elétrico de contato adquirido a uma taxa de 350 Hz do ensaio com uma amostra de aço recoberta com isolante sem a presença de “defeitos”. No eixo horizontal, temos a posição  $x$  da trilha de desgaste na amostra e no eixo vertical temos o número  $N$  de ciclos percorridos durante o ensaio. Denominamos neste trabalho de ciclo, a uma distância de deslizamento equivalente à extensão de um curso (5 mm) durante o ensaio. Ao lado do mapa, temos a escala do nível de intensidade de cinza, que fornece para cada posição  $(x_0, N_0)$ , o valor do sinal correspondente ao parâmetro avaliado (potencial de contato).

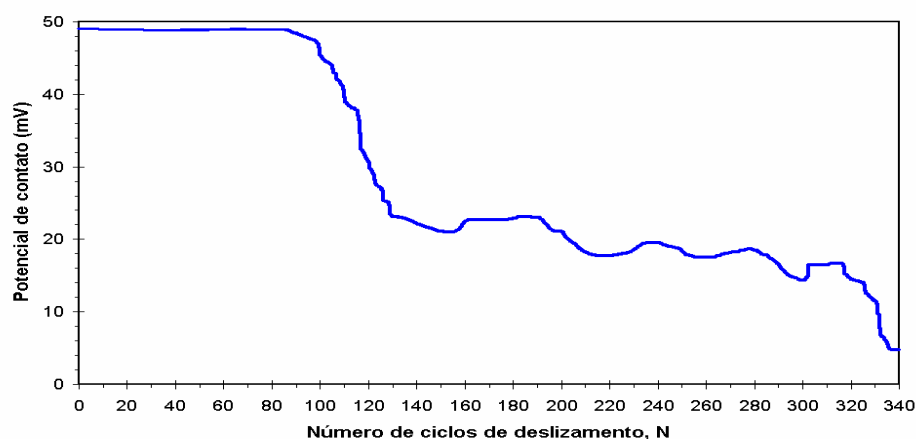
Nesta imagem ou mapa triboscópico, pode-se observar que no início do ensaio o recobrimento isolante está praticamente intacto e homogêneo em todo o curso de deslizamento, correspondendo deste modo a um alto potencial de contato (cor branca). Após cerca de 80 ciclos, começam a surgir gradualmente os primeiros pontos ou locais de degradação do recobrimento (cores cinza e preta), que aumentam em extensão, atingindo, após 320 ciclos, todo o curso de deslizamento. Observa-se também, que as regiões mais próximas às bordas do curso (extrema esquerda e extrema direita do mapa), são as últimas a sofrerem degradação da camada isolante.



**Figura 2.** Mapa triboscópico do potencial de contato de um ensaio de deslizamento em uma amostra de aço elétrico recoberta com isolante.

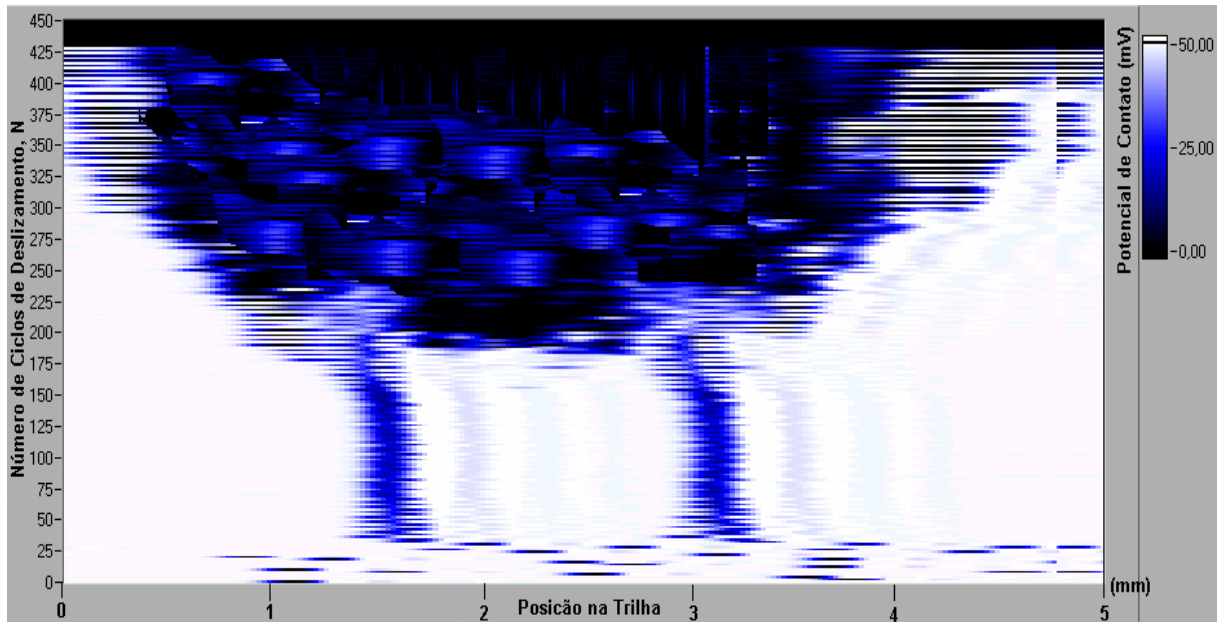
Na Figura 3, o mesmo ensaio de deslizamento é mostrado através da forma típica de apresentação dos resultados de ensaios de deslizamento, ou seja, através da evolução do potencial de contato em função do número de ciclos.

Observa-se nesta Figura, que o potencial de contato inicial apresenta valores elevados e estáveis, de aproximadamente 50 mV, e após cerca de 90 ciclos, sofrem uma queda acentuada e estabilizam em torno de 20 mV, para caírem novamente após 320 ciclos. Isto está inteiramente de acordo com o já observado no mapa triboscópico. Contudo, através do mapa triboscópico podem-se obter mais informações do que as fornecidas pela Figura 3, como por exemplo, o fato de que o processo de degradação da camada isolante não ocorre de modo homogêneo em todo o curso de deslizamento como pode ser visto na Figura 2.



**Figura 3.** Evolução do potencial de contato em função no número de ciclos do ensaio mostrado na Figura 2.

Na Figura 4 é mostrado o mapa triboscópico do potencial de contato adquirido a uma taxa de 400 Hz em um ensaio com uma amostra de aço elétrico recoberta com a presença dos dois “defeitos”. Os outros parâmetros são os mesmos que os do ensaio anterior mostrado na Figura 2.



**Figura 4.** Mapa triboscópico do potencial de contato de um ensaio de deslizamento em uma amostra de aço elétrico recoberta, com a presença de dois “defeitos”.

Neste mapa triboscópico, pode-se observar nitidamente a presença de duas faixas verticais de menor potencial de contato (faixa escura) entre 25 e 200 ciclos de deslizamento, correspondentes às regiões nas quais foi removida a camada de recobrimento isolante, envolvidas por regiões de alto potencial de contato, correspondente às regiões com recobrimento intacto. A largura destas duas faixas, avaliada diretamente sobre o mapa triboscópico, é de aproximadamente 400  $\mu\text{m}$ , valor este muito próximo do valor da largura da região de remoção do recobrimento, avaliada através de microscopia ótica, que foi de cerca de 390  $\mu\text{m}$ .

Com o prosseguimento do ensaio, o mapa triboscópico nos indica a degradação progressiva do recobrimento, iniciando-se em cerca de 200 ciclos nas regiões centrais do curso, e expandindo-se para as suas extremidades até a degradação significativa do recobrimento em todo o curso de deslizamento, de modo similar ao ocorrido no ensaio mostrado na Figura 2.

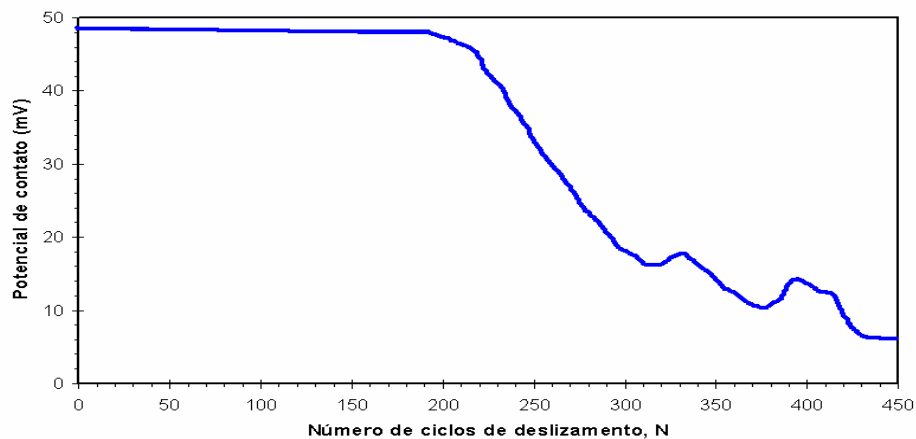
Com relação à região inicial do ensaio, entre 0 e 25 ciclos, observam-se a inexistência das duas faixas contínuas de baixo potencial de contato, constatando-se, contudo, a presença de várias faixas descontínuas verticalmente. Isto é devido a um período transiente inicial na frequência do deslizamento e surge da imprecisão com que é avaliado momento de inversão do movimento alternado, necessário ao posicionamento  $x$  para a geração do mapa triboscópico.

Sabe-se que em todos os sistemas tribológicos a resposta do contato depende dos dois sólidos envolvidos e do meio interfacial ou terceiro corpo. Assim, para se realizar uma interpretação razoável de um mapa triboscópico devem-se considerar algumas situações esquemáticas e simplificadoras de acordo com as condições do contato e a natureza das amostras.<sup>(1)</sup> Deste modo, para uma interpretação plausível dos mapas triboscópicos mostrados nas Figuras 2 e 4, considerou-se que a esfera

de contato e qualquer outro meio interfacial ou terceiro corpo não muda significativamente durante o ensaio e, portanto, toda a variação do sistema é devida somente à degradação do recobrimento da amostra.

Na Figura 5, é mostrado a evolução do potencial de contato como função do número de ciclos do ensaio de deslizamento apresentado na Figura 4. Observa-se nesta Figura que o potencial de contato inicial apresenta valores elevados e estáveis próximos a 50 mV. Somente após 200 ciclos se verifica queda acentuada potencial até cerca de 300 ciclos. A seguir, esta queda continua com menor ritmo até 450 ciclos. Novamente, isto está completamente de acordo com o já observado no mapa triboscópico equivalente, Figura 4.

No entanto, observando-se somente a Figura 5 não se poderia conceber a presença dos dois “defeitos” criados artificialmente na amostra, ao contrário do que se sucede com o mapa triboscópico, onde isto é claramente visualizado. Isto mostra a grande vantagem da triboscopia sobre a forma típica de apresentação de resultados de ensaios de deslizamento, pois nela podemos observar as peculiaridades locais do processo tribológico em escala micrométrica, cuja resolução espacial e temporal pode ser ajustada segundo as necessidades e objetivos do estudo específico, conjuntamente com a visão global deste.



**Figura 5.** Evolução do potencial de contato em função no número de ciclos do ensaio mostrado na Figura 4.

#### 4 CONCLUSÕES

- 1- A implementação da instrumentação e programa computacional para a utilização da triboscopia em ensaios tribológicos de deslizamento foi relativamente simples e barata.
- 2- O potencial elétrico de contato mostrou-se um parâmetro extremamente adequado para o estudo da degradação de recobrimentos superficiais isolantes em ensaios de deslizamento.
- 3- A utilização do mapa triboscópico do potencial de contato nos ensaios de desgaste por deslizamento, realizados nas amostras de aço-silício recobertas com isolante, permitiu ao mesmo tempo uma visão sintetizada e detalhada com uma alta resolução espacial dos fenômenos que ocorreram durante o ensaio de deslizamento. Isto representou uma grande vantagem em relação à forma usual de apresentação da evolução de um parâmetro tribológico em ensaios de deslizamento.



## Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pela concessão de bolsa de recém-doutor e apoio financeiro.

## REFERÊNCIAS

- 1 BELIN, M. Triboscopy: a new quantitative tool for microtribology. *Wear*, 168, p. 7-12. 1993.
- 2 LOUBET, J.L., BELIN, M., DURAND, R., PASCAL, H. Triboscopic description of local wear phenomena under an AFM tip. *Thin Solid Films*, 253, p.194-198. 1994.
- 3 RABINOVICZ, E. *Friction and Wear of Materials*. New York: John Wiley & Sons, 1965.
- 4 PLAY, D., Godet, M. Visualization of chalk wear. In: *The Wear of Non-Metallic Materials*. London: Mechanical Engineering Publishers, 1978. p. 221-229.
- 5 KATO, K., KITSUNAI, H., HOKKIRIGAWA, K., INOUE, H. The Transition of Microscopic Wear Mode during Repeated Sliding Friction Observed by SEM-Tribosystem. In: *WEAR OF MATERIALS CONFERENCE*, ASME, Denver, Colorado, USA, 1989. p. 807-814.
- 6 BELIN, M., LOPEZ, J., MARTIN, J.M. Triboscopy, a quantitative tool for the study of the wear of a coated material. *Surface and Coatings Technology*, 70, p. 27-31. 1994.
- 7 BELIN, M., MARTIN, J.M. Triboscopy, a new approach to surface degradations of thin films. *Wear*, 156, p. 151-160. 1992.
- 8 WAHL, K.J., BELIN, M., SINGER, I.L. A triboscopic investigation of wear and friction of MoS<sub>2</sub> in a reciprocating sliding contact. *Wear*, 214, p. 212-220. 1998.
- 9 MEYER, E., GYALOG, T., OVERNEY, R.M., DRANSFELD, K. *Nanoscience: Friction and Rheology on the Nanometer Scale*. Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 1998.
- 10 SÁNCHEZ-LOPEZ, J.C., BELIN, M., DONNET, C., QUIRÓS, C., ELIZALDE, E. Friction mechanisms of amorphous carbon nitride films under variable environments: a triboscopic study. *Surface and Coatings Technology*, 160, p. 138-144. 2002.
- 11 FONTAINE, J., BELIN, M., LE MOGNE, T., GRILL, A. How to restore a superlow friction of DLC: the healing effect of hydrogen gas. *Tribology International*, 37, p. 869-877. 2004.
- 12 NAKAMURA, M., SUGIYAMA, T., KITAYAMA, M. Magnetic and insulating properties of electrical steel with a new insulating coating. *IEE Transactions on Magnetics*, 17, n. 3, p. 1270-1274. 1981.