

## SUPERPOSIÇÃO DE INDENTAÇÕES NA SIMULAÇÃO DO DESGASTE ABRASIVO

**Washington Martins da Silva Júnior**

Laboratório de Tribologia e Materiais – FEMEC - UFU

[washington@mecanica.ufu.br](mailto:washington@mecanica.ufu.br)

**José Daniel Biasoli de Mello**

[ltm-demello@ufu.br](mailto:ltm-demello@ufu.br)

**Resumo:** Recentemente, os sistemas de desgaste abrasivo têm sido classificados em dois grupos principais, em função da dinâmica das partículas atuantes: (a) deslizamento das partículas, produzindo microcorte e/ou microsulcamento e/ou microlascamento; (b) rolamento dos abrasivos, levando a formação de indentações múltiplas. O presente trabalho propõe uma nova metodologia para a simulação do desgaste abrasivo usando um teste laboratorial instrumentado. O equipamento especialmente desenvolvido para esta simulação é chamado de LTM- $\mu$ S1. Este equipamento reproduz a atuação de um grão abrasivo sobre a superfície de uma amostra. A partir das informações obtidas de uma superfície desgastada de referência realiza-se uma seqüência de indentações em posições aleatórias dentro de uma área pré-determinada da superfície da amostra, obtendo assim uma nova superfície. O objetivo é reproduzir as mesmas características observadas na superfície real de desgaste. É possível controlar a quantidade e a intensidade dos eventos. A topografia e os mecanismos de desgaste das superfícies desgastadas podem ser avaliados usando interferometria laser e microscopia eletrônica de varredura. Foi observado que os parâmetros topográficos foram sensíveis ao grau de superposição dos eventos abrasivos.

**Palavras-chave:** desgaste abrasivo; mecanismos de desgaste; simulação; eventos múltiplos; indentação.

### 1. INTRODUÇÃO

Estudos recentes evidenciam a importância dos mecanismos de desgaste no entendimento do processo de desgaste abrasivo (Adachi, K. and Hutchings, I. M., 2003; Buijs, M. and Korpel-van Houten, K., 1993 e 1993-b; da Silva et al., 2005; da Silva, W. M., 2003; Fang et al., 1993; Kelly, D. A. and Hutchings, I. M., 2001; Trezona et al., 1999; Verspui et al., 1995; Verspui, M. A. and With, G., 1997; Williams, J. A. and Hyncica, A. M., 1992 e 1992-b). Os mecanismos de desgaste estão associados às características tribológicas do sistema. Apesar da característica sistêmica, dois principais mecanismos de desgaste abrasivo têm sido classificados (Adachi, K. and Hutchings, I. M., 2003; Trezona et al., 1999) de acordo com a dinâmica das partículas abrasivas presentes na interface:

(a) deslizamento das partículas ativas presentes na interface de desgaste produzindo o mecanismo de microcorte e/ou microsulcamento e/ou microlascamento.

(b) rolamento das partículas abrasivas entre as superfícies de desgaste levando à formação de indentações múltiplas. No caso de materiais frágeis, cada indentação pode levar à remoção de material.

Williams e Hyncica (1992 e 1992-b) desenvolveram um modelo para demonstrar que a distância entre as superfícies e o tamanho das partículas abrasivas influenciam o mecanismo de desgaste predominante. Para uma partícula tridimensional, o ângulo de ataque aumenta de acordo com a razão entre o tamanho das partículas e a distância entre as superfícies. Quando o aumento do ângulo de ataque, o sulcamento passa a ser mais efetivo que o rolamento, entretanto acima de um valor crítico de ângulo de ataque o mecanismo predominante passa a ser o microcorte. Assim, o aumento do ângulo de ataque afeta a severidade do sistema mostrando duas mudanças principais no mecanismo de desgaste, por exemplo (Williams, J. A. and Hyncica, A. M., 1992 e 1992-b):

Indentação (partícula rola) → Microsulcamento (partícula desliza) → Microcorte (partícula desliza)

Fang e co-autores (1993) mostraram a influência da forma da partícula na determinação do mecanismo de desgaste abrasivo predominante. Estes autores estudaram, experimentalmente, o comportamento de uma única partícula de sílica quando esta estava comprimida entre duas superfícies móveis de metal.

Partículas arredondadas tendem a deslizar sobre uma das superfícies, enquanto partículas angulosas tendem a rolar entre as superfícies. As partículas que deslizam levam a formação de riscos/sulcos sobre uma das superfícies, enquanto partículas angulosas levam a formação de indentações nas duas superfícies.

O modelo de Williams e Hyncica (1992 e 1992-b) mostra que uma partícula presa entre duas superfícies móveis pode levar a ocorrência de riscos/sulcos em ambas as superfícies.

Em geral, pode-se descrever o comportamento da dinâmica das partículas atuantes (rolamento ou deslizamento das partículas) em função de três principais parâmetros tribológicos:

- carga por partícula, que está diretamente relacionada com a força normal aplicada, a concentração do abrasivo no meio, e com a distribuição granulométrica dos abrasivos;
- geometria da partícula;
- razão de dureza entre as superfícies.

Outro trabalho relevante é o de Pintaúde (2002), onde análise topográfica da superfície abrasonada define a profundidade média dos eventos de abrasão. Nesse caso o principal evento estudado foi sulcamento/riscamento. Essa informação permite o cálculo da força de penetração. Sabendo que o tamanho dos eventos depende da severidade do desgaste, e usando a força de penetração, este autor define o parâmetro “dureza verdadeira”, como um importante indicador da severidade do desgaste abrasivo. Um dos parâmetros de rugosidade usados por esse autor para estudar a superfície desgastada foi a rugosidade quadrática média ( $R_q$ ).

Em um trabalho recente (da Silva, W. M. and de Mello, J. D. B., 2006) os presentes autores mostraram uma nova metodologia para simular experimentalmente o desgaste abrasivo. Este método reproduz a ação dos abrasivos sobre a superfície da amostra através de uma sequência de eventos controlados. A análise topográfica da superfície desgastada fornece as informações necessárias para a execução de cada evento, permitindo a reprodução do mecanismo de desgaste observado na superfície desgastada original (da Silva, W. M. and de Mello, J. D. B., 2006).

A superfície de referência pode ser obtida tanto de um teste laboratorial controlado, quanto de uma situação prática de desgaste. A análise laboratorial seguida da simulação viabiliza a formulação de um modelo matemático que descreve o desgaste abrasivo em função do mecanismo de desgaste predominante. Por outro lado, a análise de uma superfície originada de uma situação prática seguida pelo teste de simulação permite o ranqueamento de materiais que podem ser usados para substituir a peça desgastada na situação prática (da Silva, W. M. and de Mello, J. D. B., 2006).

No presente trabalho, um teste laboratorial fornece a superfície de referência a ser simulada. O mecanismo de desgaste predominante foi a indentação múltipla. São mostrados os resultados preliminares da simulação. Dois novos conceitos foram introduzidos para modelar uma superfície abrasonada: monoevento e multievento.

## 2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.

Foi utilizado um teste de desgaste abrasivo do tipo pino sobre disco para gerar a superfície de referência.

O material estudado foi o aço ferramenta com dureza de 700 HV. A configuração do teste de desgaste abrasivo está mostrada na figura 1.

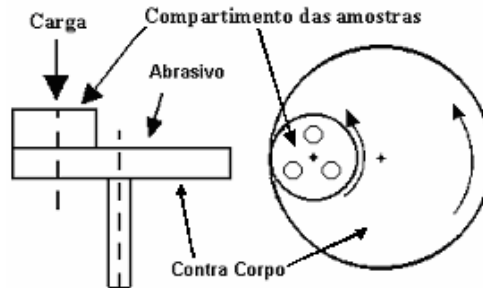


Figura 1. Esquema do teste de desgaste abrasivo.

Três amostras são fixadas em um compartimento especial que leva a uma distribuição uniforme da carga aplicada. O sistema é alimentado por um fluxo constante de abrasivo seco ( $\text{SiO}_2$  – tamanho: 0.6 – 1.2 mm). O contra-corpo é um disco de ferro fundido branco temperado e revenido com uma dureza de 751 HV. A rotação do contra-corpo garante a renovação dos abrasivos na interface de contato. A carga aplicada foi de 9.4 N.

Seis testes foram realizados, com a duração de 10 minutos cada teste. Uma balança de alta resolução (0.0001 g) foi utilizada para medir a perda de massa.

A superfície desgastada foi avaliada usando interferometria laser (IL – UBM Microfocus Expert IV). Os mecanismos de desgaste foram observados usando microscopia eletrônica de varredura (MEV – Leo 940A – Zeiss).

Para a simulação do processo de desgaste abrasivo usando indentações instrumentadas foi desenvolvido um equipamento chamado LTM- $\mu$ S1, que está mostrado na figura 2.

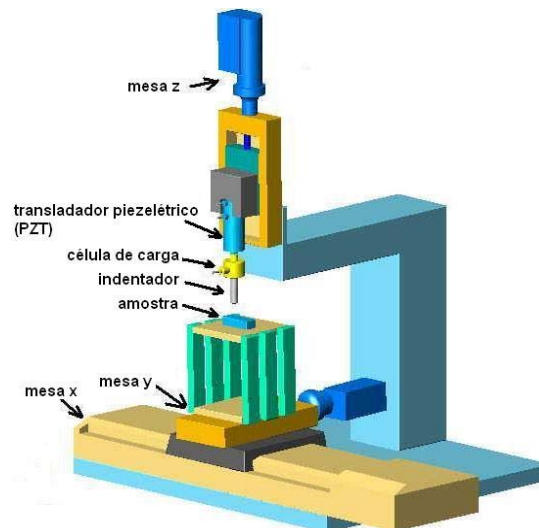


Figura 2. Esquema do simulador LTM- $\mu$ S1.

Este equipamento é composto por três mesas coordenadas digitalmente controladas, que permitem o movimento da amostra no plano horizontal e o movimento do penetrador no eixo vertical. Adicionalmente, no eixo z existe um sistema de translação piezelétrico que movimenta unidirecionalmente em 40  $\mu\text{m}$  de distância com uma resolução de 5 nm. A interação entre o indentador e a superfície da amostra produz os eventos, que podem ser tanto indentações quanto deslizamento.

A simulação consiste de uma sequência de eventos efetuados sobre a superfície da amostra, dentro de uma área quadrada pré-definida (área de trabalho). São possíveis cinco configurações para a distribuição dos eventos dentro da área de trabalho. A figura 3 mostra um esquema representativo destas configurações: indentações aleatórias; deslizamento aleatório; deslizamento paralelo aleatório; deslizamento paralelo e indentações aleatórias; deslizamento e indentações aleatórias.

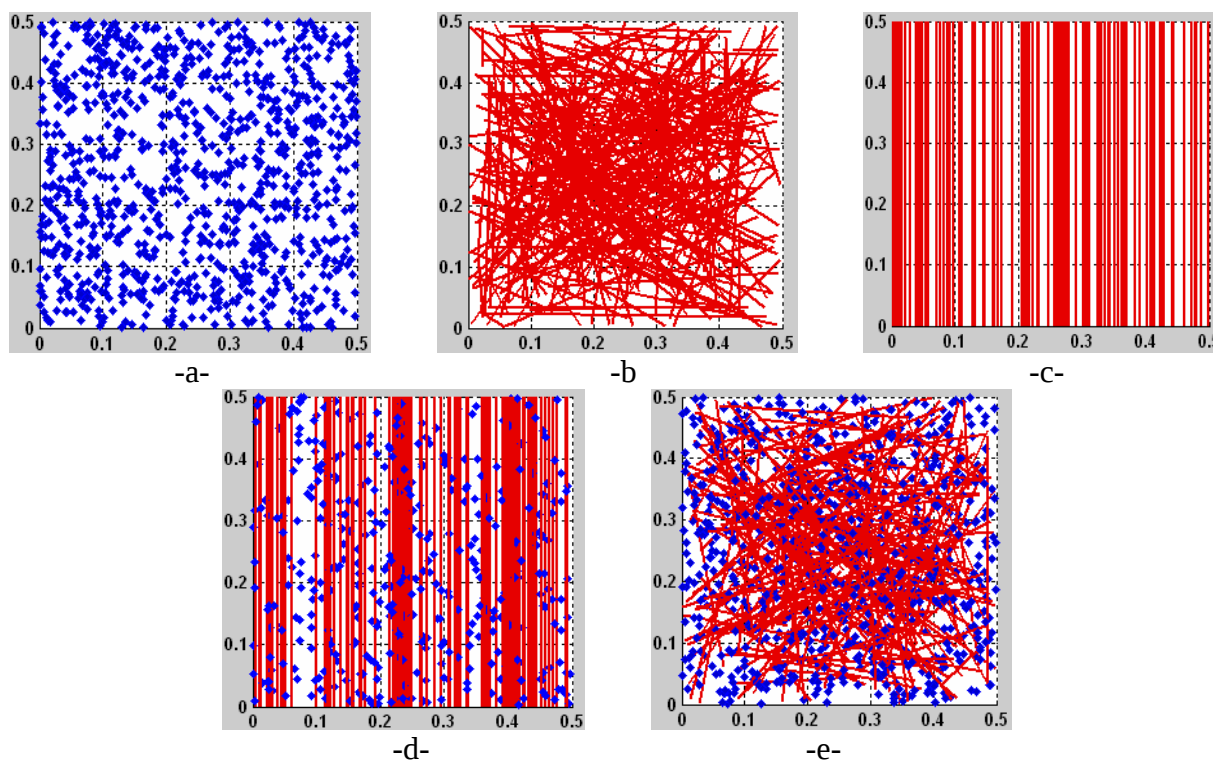


Figura 3: Esquema do posicionamento dos eventos na área de trabalho: a- indentações aleatórias; b- deslizamento aleatório; c- deslizamento paralelo aleatório; d- deslizamento paralelo e indentações aleatórias; e- deslizamento e indentações aleatórias.

Os parâmetros utilizados no teste de desgaste abrasivo levaram a uma superfície desgastada onde predominou o rolamento dos abrasivos, ou seja, indentações aleatoriamente distribuídas sobre a superfície. Então, foi escolhida a configuração mostrada na figura 3-a.

Foi utilizado um penetrador de diamante do padrão Vickers.

O teste de simulação foi realizado com uma sequência de 3000 indentações aleatoriamente posicionadas sobre a área de trabalho e com a mesma carga, 150 gf.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A superfície referência obtida pelo teste laboratorial está mostrada na figura 4. Observou-se que o rolamento das partículas abrasivas levou a indentações aleatoriamente distribuídas sobre a superfície desgastada.

Foi escolhido o parâmetro de rugosidade quadrática média 3D ( $S_q$ ) para quantificar as profundidades dos eventos, que obteve o valor médio de  $S_q$  de  $4,08 \mu\text{m}$  (figura 4-b). Assim, a profundidade de penetração dos eventos na simulação foi definida como  $4,0 \mu\text{m}$ .

Para executar a profundidade de indentação de  $4 \mu\text{m}$  na simulação foi necessário encontrar a correlação entre profundidade de indentação e carga. Assim, foi realizada uma sequência de indentações com diferentes cargas. A profundidade de cada indentação foi medida usando interferometria laser. Este método forneceu uma curva de correlação da profundidade da indentação em função da força aplicada como mostrada na figura 5, onde a profundidade de indentação aumentou com a carga. Usando esta curva, foi selecionada a carga de 150 gf (1,47 N).

A figura 6 mostra a superfície obtida na simulação.

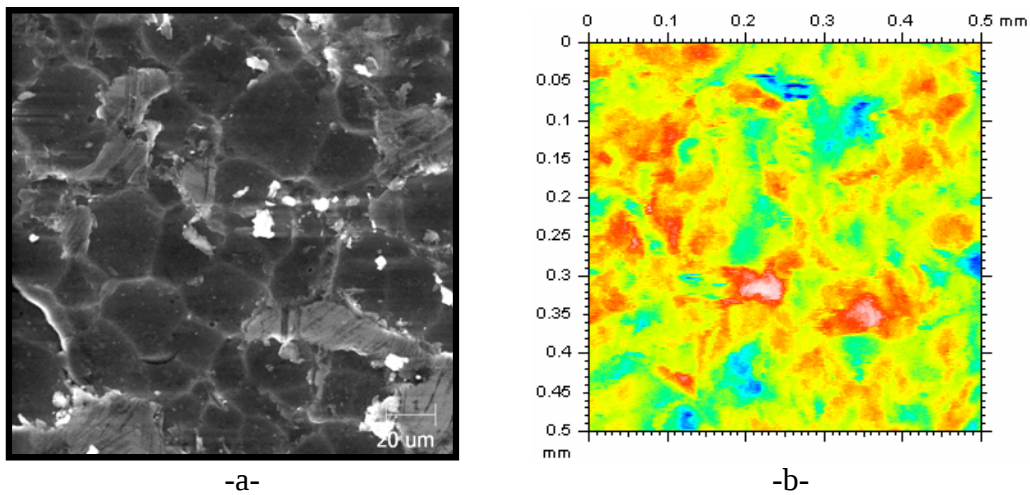


Figura 4: Aspecto típico da superfície obtida no teste de desgaste: a- MEV; b- IL.

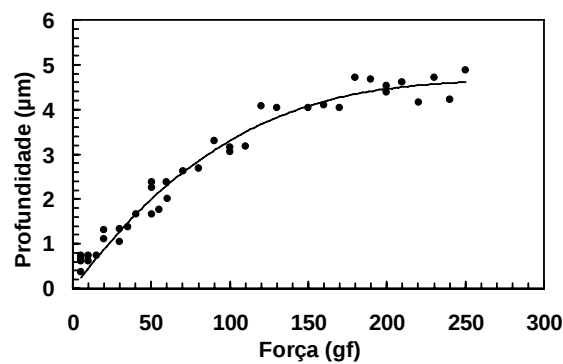


Figura 5: Correlação entre profundidade de penetração e carga aplicada.

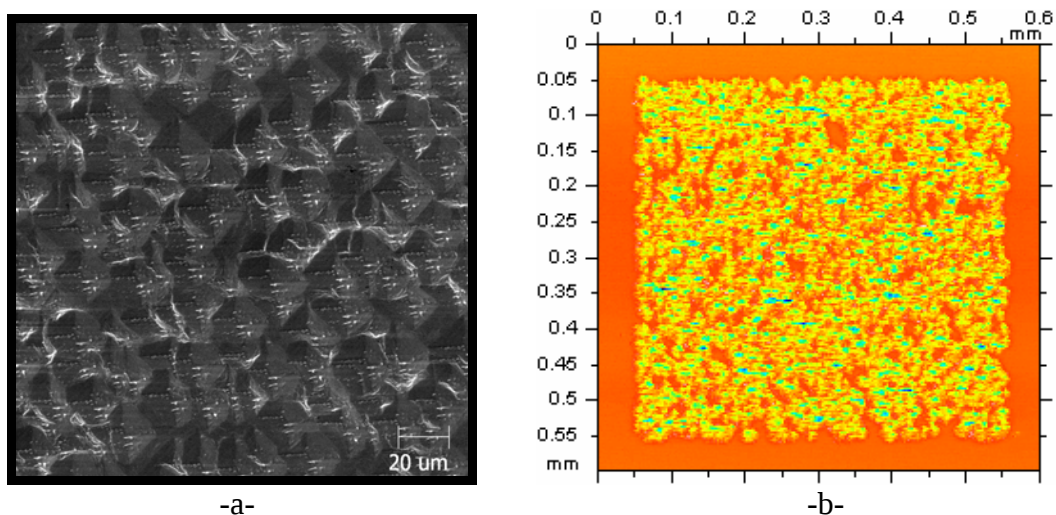


Figura 6: Superfície obtida na simulação (150 gf; 3000 eventos). a- MEV. b-IL.

Comparando as figuras 4-a e 6-a, observa-se uma significativa diferença dos eventos produzidos na simulação e a superfície de referência. O eventos produzidos na simulação (figura 4-a) são visualmente menores do que os observados na superfície de referência (figura 6-a).

O Sq obtido na superfície mostrada na figura 6-b é igual a 1.8  $\mu\text{m}$ , confirmando a forte diferença entre as duas superfícies (figuras 4 e 6). Esse fato indica que a correlação direta entre a carga aplicada em cada evento (figura 5) e a rugosidade da superfície resultante da simulação não é adequada.

A figura 7 mostra a topografia de uma simulação, com baixa densidade de eventos (500 eventos), realizada nessa mesma amostra. Algumas regiões mostram claramente a superposição dos eventos.

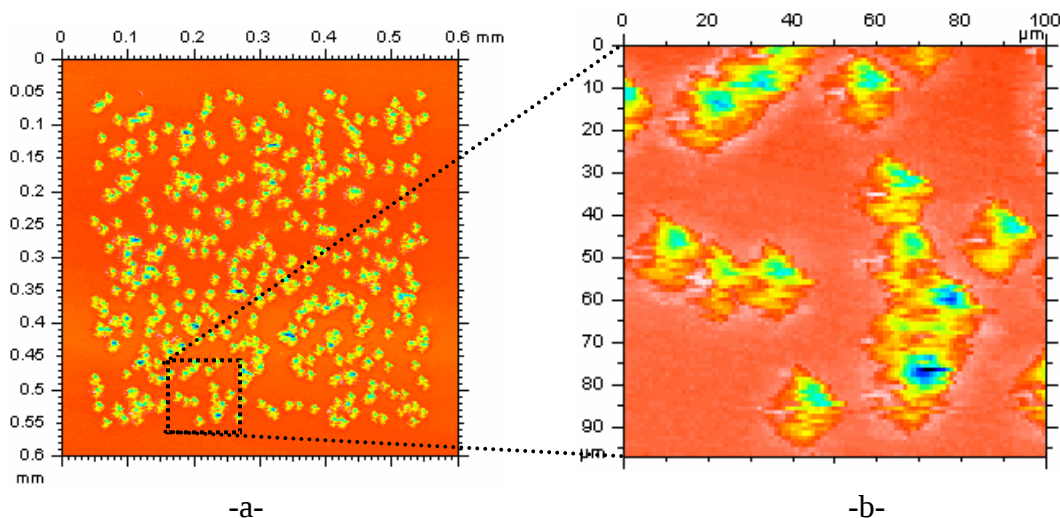


Figura 7: Superposição dos eventos. a- área de trabalho; b- ampliação. IL.

A figura 7-b mostra um grupo de indentações realizadas em posições próximas umas das outras. Essa figura sugere que quando uma indentação sobrepõe outra, a profundidade resultante pode ser diferente do valor esperado.

Foi desenvolvida uma metodologia simples para observar e melhor entender o fenômeno de superposição de indentações. Foram produzidas linhas paralelas de indentações equiespaçadas, com a mesma quantidade de indentações em cada linha. A separação entre as indentações foi reduzida, entre as linhas subsequentes, até que todos os eventos foram executados na mesma posição. O resultado dessa metodologia está mostrado na figura 8-a. A distância entre eventos na primeira linha foi fixada em 79,2  $\mu\text{m}$ . O tamanho do lado da indentação foi de 19,8  $\mu\text{m}$ .

Figura 8-b mostra a linha de indentações AA indicada na figura 8-a. Nesse perfil, os eventos não se sobrepõem, e a profundidade dos eventos permanece aproximadamente constante. Entretanto, a figura 8-c mostra que quando os eventos são sobrepostos, a profundidade média das indentações diminui. Isto pode ser explicado pelo fato de que o material deformado por uma indentação cobre parcialmente a indentação anterior. O percentual de superposição é a razão entre o valor da distância entre os eventos e o tamanho do lado da indentação. A superposição igual a zero significa que as indentações estão tocando umas as outras. Um valor negativo de superposição significa que as indentações estão distantes uma das outras de uma distância relativa a uma porcentagem do valor do lado de uma indentação. A figura 9 mostra a profundidade média das indentações em função da superposição relativa.

Na figura 9, para uma distância entre indentações maior do que 15,8  $\mu\text{m}$  (superposição menor que -40 %), não se observam mudanças significativas na profundidade de indentação média. Quando os eventos estão superpostos (acima de 0% de superposição), a profundidade média diminui até atingir um mínimo para a superposição igual a 70%. Para superposições maiores que 70% a profundidade média aumenta.

A quantificação da profundidade média em função do percentual de superposição é importante porque define duas classes diferentes de eventos abrasivos:

**Monoevento** – a deformação plástica causada por um evento não afeta nenhum outro. No caso estudado (figura 8), isto ocorre para uma distância entre eventos maior do que 15,8  $\mu\text{m}$  (superposição menor do que -40%).

**Multievento** – a deformação plástica dos eventos tem efeito sobre sua profundidade média. Isso acontece para valores positivos de superposição.

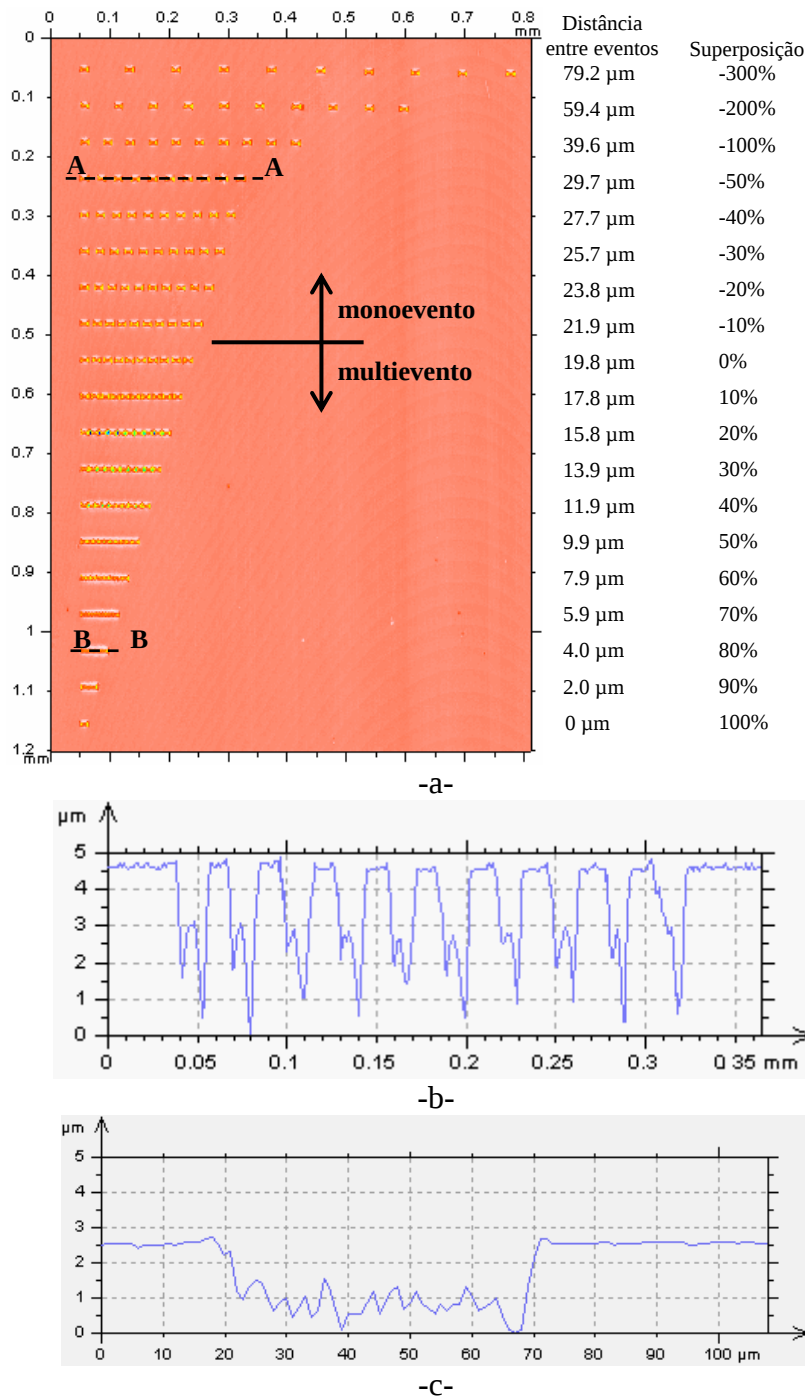


Figura 8: Superposição de eventos: a- todas as linhas; b- perfil AA; c- perfil BB. IL.

Ambos os casos tem diferente influência sobre a topografia da superfície simulada.

A figura 10 mostra um estudo morfológico da superposição dos eventos com distâncias controladas entre indentações. Foram geradas áreas de tamanhos idênticos, mas com uma quantidade crescente de indentações. Consequentemente o percentual de superposição aumentou até atingir um valor de 85%.

Como esperado, ocorreu um comportamento análogo que confirmou as situações ‘monoevento’ e ‘multievento’. Para distâncias entre eventos menores do que 15,8  $\mu\text{m}$  (situação multievento), a superposição dos eventos acarretou uma significativa modificação na topografia da superfície.

A figura 11 mostra a evolução do  $S_q$  em função da densidade dos eventos.

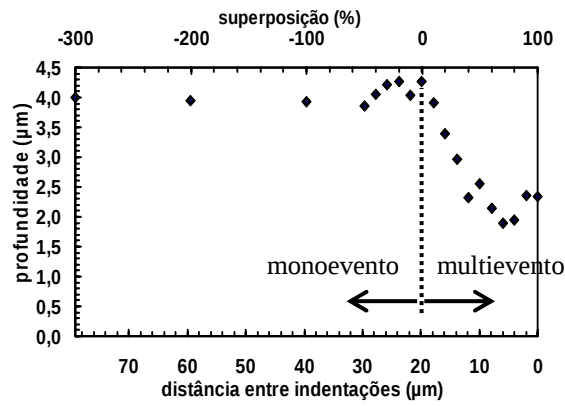


Figura 9: Efeito da superposição na profundidade dos eventos.

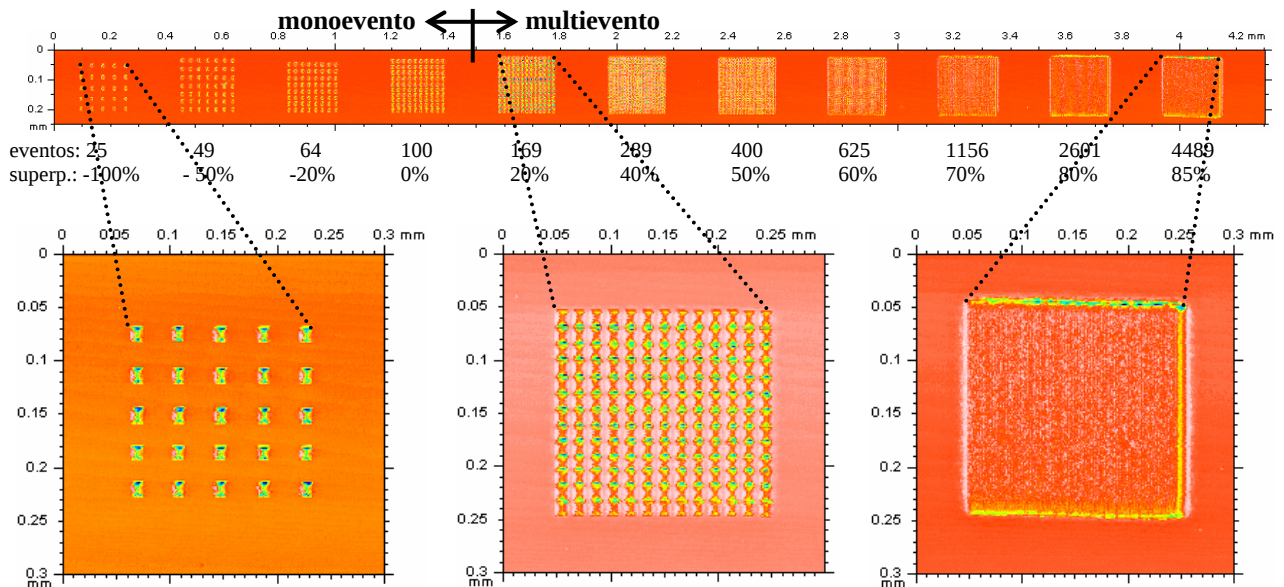


Figura 10: Variação do percentual de superposição em função da densidade dos eventos; A superfície foi observada usando IL.

Na situação monoevento a deformação da superfície é pequena, o que leva a uma grande quantidade de áreas planas entre as indentações. Assim, valores negativos de superposição correspondem a pequenos valores de  $S_q$ . O aumento da superposição dos eventos representa um aumento na quantidade de área deformada em torno de cada evento. Essa área deformada, também conhecida como 'pile up', leva a um aumento no valor do parâmetro de rugosidade  $S_q$ . Entretanto, para superposições maiores do que 20%, a deformação plástica causada pela superposição começa a cobrir a indentação anterior e a rugosidade decresce. Isso representa a situação multievento.

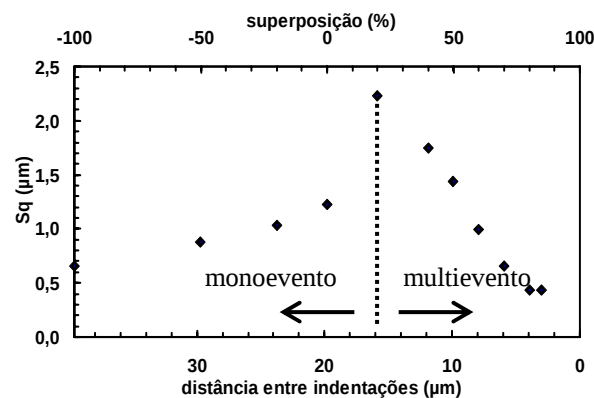


Figura 11: Efeito da superposição no  $S_q$ .

O valor de Sq medidos na superfície simulada (figura 6) foi bem abaixo do valor esperado de 4  $\mu\text{m}$ , para uma carga de 150 gf (veja figura 5). Por outro lado, a superposição mostrada na figura 10 aponta que quando a densidade dos eventos distribuídos aleatoriamente sobre a área de trabalho é alta, ocorre a situação multievento. Assim, a escolha dos parâmetros de carga e quantidade de eventos na simulação requer uma análise cuidadosa no sentido de reproduzir uma topografia com características similares aquelas encontradas na superfície de referência.

#### 4. CONCLUSÕES

Os resultados preliminares mostram que o mecanismo de desgaste de uma superfície abrasonada real foi bem simulado, entretanto os eventos são menores na simulação.

Foram definidas duas classes distintas de eventos abrasivos: a- um monoevento ocorre quando a deformação plástica causada por um evento não afeta nenhuma outro evento; b- ocorre multievento quando a deformação plástica dos eventos tem efeito na sua profundidade média.

Uma simulação com alta densidade de eventos randomicamente distribuídos sobre a área de trabalho manifesta a situação multievento.

A identificação dos parâmetros de carga e quantidade de eventos na simulação com eventos aleatoriamente distribuídos requer uma cuidadosa análise no sentido de alcançar uma topografia com características similares aquelas encontradas na superfície de referência.

#### 4. REFERÊNCIAS

- Adachi, K. and Hutchings, I. M., 2003 “Wear Mode Mapping for the Micro-Scale Abrasion Test”, *Wear*, vol 255, pp 23 – 29.
- Buijs, M. and Korpel-van Houten, K., 1993, “Three-Body Abrasion of Brittle Materials as Studied by Lapping”, *Wear*, vol 166, pp 237 – 245.
- Buijs, M. and Korpel-van Houten, K. , 1993 “A Model for Lapping of Glass”, *Journal of Materials Science*, vol 28, pp 3014 – 3020.
- da Silva, W. M. , 2003, “Efeito da Pressão de Compactação e Tamanho do Pó de Ferro na Microabrasão do Ferro Sinterizado Oxidado a Vapor”, *Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG*, 98p.
- da Silva, W. M., Binder, R. e de Mello, J. D. B., 2005, “Abrasive Wear of Steam Treated Sintered Iron”, *Wear*, vol 258, pp 166-177.
- da Silva, W. M. and de Mello, J. D. B., 2006, “Simulação de Desgaste Abrasivo via Eventos Múltiplos”, *Ciência & Tecnologia dos Materiais (ISSN 0870-8312)*, vol 18, n 1/2, pp 49-56 Portugal, janeiro –junho 2006.
- Fang, L., Kong, X. L., Su, J. Y., and Zhou, Q. D., 1993, “Movement Patterns of Abrasive Particle in Three-body Abrasion”, *Wear*, vol 162 - 164, pp 782 – 789.
- Kelly, D. A. and Hutchings, I. M., 2001, “A New Method for Measurement of Particle Abrasivity”, *Wear*, vol 250, pp 76-80.
- Pintaúde, G. , 2002, “Análise dos Regimes Moderados e Severo de Desgaste Abrasivo Utilizando Ensaios Instrumentados de Dureza”, *Tese de Doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo*, 200p.
- Trezona, R. I., Allsopp, D. N., and Hutchings I. M., 1999, “Transition Between Two-body and Three-body Abrasive Wear: Influence of Test Conditions in the Microscale Abrasive Wear Test”, *Wear*, vol 225 – 229, pp 205 – 214.
- Verspui, M. A., With, G. de, Th.van Der Varst, P. G., and Buijs, M., 1995, “Bed Thickness and Particle Size Distribution in Three-Body Abrasion”, *Wear*, vol 188, pp 102 – 107.
- Verspui, M. A. and With, G., 1997 “Three-body Abrasion: Influence of Applied Load on Bed Thickness and Particle Size Distribution in Abrasive Processes”, *Journal of the European Ceramic Society*, vol 17, pp 473 – 477.

- Williams, J. A. and Hyncica, A. M., 1992, "Mechanisms of Abrasive Wear in Lubricated Contacts", Wear, vol 152, pp 57-74.
- Williams, J. A. and Hyncica, A. M. , 1992-b, "Abrasive Wear in Lubricated Contacts", J. Phys. D: Appl. Phys., vol 25, pp A81-A90.

## **SUPERIMPOSITION OF INDENTATIONS IN A SIMULATION OF ABRASIVE WEAR**

**Washington Martins da Silva Júnior**

Tribology and Materials Laboratory – FEMEC - UFU

[washington@mecanica.ufu.br](mailto:washington@mecanica.ufu.br)

**José Daniel Biasoli de Mello**

[ltm-demello@ufu.br](mailto:ltm-demello@ufu.br)

**Abstract:** Abrasive wear is currently classified according to different particle dynamics: (a) sliding of the active particles on the sample surface, producing the mechanisms of microcutting and/or microploughing and/or microcracking; (b) the rolling of the abrasives between the surfaces leading to multiple indentation formation. The prevailing of either dynamics depends on the system features, especially particle force, particle geometry and to hardness ratio of the two sliding surfaces. This present work proposes a new methodology for the simulation of abrasive wear using instrumented laboratory tests. A new equipment was especially developed and was called LTM- $\mu$ S1. It reproduces the action of one abrasive particle on a sample surface. Based on the analysis of the original wear surface topography, a sequence of indentations in random positions inside a pre-defined area can be made on a sample surface. The aim is to mimic a surface worn under real abrasive conditions. It is possible to control the number and the intensity of the events. The wear mechanism and topography of this new surface were assessed using laser interferometry and scanning electron microscopy. It could be observed that topographical parameters were sensitive to the degree of superimposition of the abrasive events.

**Keywords:** abrasive wear, wear mechanisms, simulation, multiple events, indentation.