

SIMULAÇÃO DE DESGASTE ABRASIVO VIA EVENTOS MÚLTIPLOS

W. M. DA SILVA e J. D. B. DE MELLO*

Universidade Federal de Uberlândia, UFU, Faculdade de Engenharia Mecânica, Laboratório de Tribologia e Materiais, Av. João Naves de Ávila, 2160, Campus Santa Mônica, Bloco 1R, CEP: 38400-902, Uberlândia - MG, Brasil.

ltm-demello@ufu.br

RESUMO: A otimização de processos abrasivos é alvo constante de estudos científicos, seja no sentido de minimizar a perda de massa de um sistema tribológico sujeito à presença de abrasivos, seja no sentido de melhorar a qualidade superficial em processo de fabricação, que utilizam abrasivos para remover material. Recentemente, os sistemas de desgaste abrasivo têm sido classificados em função da dinâmica das partículas atuantes: (a) deslizamento das partículas sobre a superfície produzindo sulcamento e/ou riscamento; (b) rolamento dos abrasivos entre as superfícies, levando a formação de indentações múltiplas. O predomínio de uma destas dinâmicas é função das características do sistema, destacando-se a carga por abrasivo, geometria da partícula abrasiva e relação de dureza entre as superfícies. O presente trabalho propõe uma metodologia que relaciona os principais parâmetros dos ensaios laboratoriais de desgaste abrasivo através de uma simulação instrumentada. O equipamento utilizado nesta simulação é um esclerômetro retilíneo que reproduz a atuação de um grão abrasivo sobre a superfície de uma amostra. A partir das informações contidas na superfície desgastada original realiza-se uma sequência de indentações e riscos/sulcos em posições aleatórias dentro de uma área pré-determinada obtendo uma nova superfície. É possível dimensionar a quantidade, intensidade e direção (no caso de riscos/sulcos) dos eventos. Usando interferometria laser e MEV constatou-se a semelhança entre a topografia e os mecanismos de desgaste da superfície produzida na simulação e a superfície original. Observou-se, também, que a simulação é sensível ao direcionamento dos eventos e mecanismos de desgaste.

Palavras chave: Desgaste Abrasivo, mecanismo de desgaste, simulação, eventos múltiplos.

ABSTRACT: The optimisation of the abrasive process is the constant aim of scientific studies, either to minimize the mass lost of any tribological system submitted to abrasive presence, or to improve the superficial quality in the machining and/or finishing processes which use abrasives to remove materials. Recently, the wear system has been classified in two different groups, according to its particle dynamic: (a) sliding of the acting particles on the sample surface producing the mechanism of microcutting and/or microploughing or microcracking; (b) the rolling of the abrasives between the surfaces leading to multiple indentation formation. Predominance of one or the other dynamic is due to system features, especially the force by particle, abrasive particle geometry and hardness ratio between the surfaces. The present work proposes a methodology that shows the principal parameters of laboratory abrasive wear tests by instrumented simulation. The equipment used in this simulation is a rectilinear esclerometer that reproduces the act of one abrasive particle on a sample surface. By an original wear surface analysis, a sequence of indentations and scratches/grooves in random positions inside a pre-defined area can be obtained. It is possible to dimension the quantity, intensity and direction (in case of scratch) of the events. A surface similar to the original can be obtained by simulation. The wear mechanism and topography of this new surface can be described using laser interferometry and SEM. It can also be observed that the simulation is sensible to the direction of events and wear.

Keywords: abrasive wear, wear mechanisms, simulation, multiply events.

1. INTRODUÇÃO

A otimização de processos abrasivos vem sendo alvo constante de estudos científicos, seja no sentido de minimizar a perda de massa de um sistema tribológico sujeito à presença de abrasivos, ou de melhorar a qualidade superficial em processo de fabricação, que utilizam abrasivos para remover material.

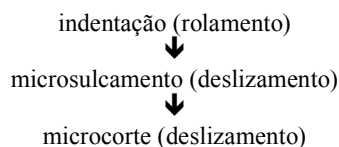
Estudos recentes [1-12] quantificam a perda de massa no desgaste abrasivo em função dos mecanismos de desgaste

predominantes, ou melhor, das características físicas do sistema que influenciam estes mecanismos. Apesar do caráter sistêmico do desgaste abrasivo, a literatura atual resalta dois mecanismos de desgaste diferentes: (a) deslizamento das partículas, onde os abrasivos engastados no contra-corpo riscam a superfície removendo o material; (b) rolamento dos abrasivos, levando a indentações sobre o material, onde, em alguns casos, cada indentação pode ocasionar a remoção de material.

Williams e Hyncica [1,2] usaram um modelo simples para demonstrar o efeito da distância entre as superfícies, tamanho e forma do abrasivo sobre o mecanismo de desgaste predominante. Neste modelo, a partícula abrasiva é representada por um prisma longo, de seção transversal losangular onde D é a maior diagonal e h a distância de separação das superfícies. As superfícies são planas, lisas, possuem a mesma dureza e são animadas de movimento relativo [1,2].

Para uma razão $D/h < 1$, ou seja, distância entre as superfícies é maior que o tamanho da partícula, estas passam através da interface produzindo somente alguns impactos ocasionais. Se o tamanho da partícula aumenta é provável que esta se prenda, indentando as superfícies. A força associada a cada indentação, que se assemelham a testes de dureza oblíqua, está relacionada à dureza do material e possui direção perpendicular à face de indentação. Como a partícula é simétrica, existe outra indentação ocorrendo no canto oposto formando um binário que tende a rotacionar a partícula. Se a dimensão da partícula não é tão grande, ela pode rotacionar até perder o contato com as superfícies, produzindo somente deformações localizadas (indentações). Entretanto, se a dimensão da partícula é suficiente para que esta não se desprenda das superfícies, esta continua a rotacionar até que as forças atuantes se tornem colineares. Quando isso acontecer o binário que provocava a rotação do abrasivo é anulado, deixando a partícula posicionada a uma determinada inclinação. Nesta situação espera-se encontrar um conjunto de sulcos/riscos sobre as superfícies [1,2].

Estes autores [1,2] demonstram que o ângulo de ataque efetivo cresce em função do aumento da razão D/h , evidenciando duas consequências na mudança do mecanismo de desgaste:



O trabalho de Fang e co-autores [3] destaca a importância da forma do abrasivo na determinação do mecanismo de desgaste predominante. Estes autores estudaram, experimentalmente, o comportamento de uma única partícula de sílica quando inserida entre duas superfícies que possuem movimento relativo.

A geometria arredondada da partícula promove o deslizamento sobre a superfície, enquanto que a partícula angulara tende a rolar entre as superfícies. O deslizamento leva a formação de sulcos sobre a superfície, enquanto que o rolamento produz uma série de pontos de deformação plástica (indentações).

Foi mostrado no modelo de Williams e Hyncica [1,2] que a partícula pode deslizar relativamente às duas superfícies ao mesmo tempo se estas possuírem as mesmas características, entretanto nestes testes [3] esse fato não foi observado. O deslizamento ocorreu somente em uma das superfícies, mesmo nos ensaios onde ambas tinham a mesma dureza. Fang e co-autores [3] colocam que esta contradição no movimento de deslizamento se deve a geometria assimétrica da partícula ensaiada.

Em linhas gerais pode-se traçar uma abordagem comum para a dinâmica das partículas atuantes (rolamento ou deslizamento do abrasivo) em função de três grandezas inerentes ao sistema abrasivo:

- carga por abrasivo, que esta diretamente associada a:
 - força normal aplicada;
 - concentração do abrasivo no meio;
 - distribuição do tamanho das partículas.
- geometria da partícula abrasiva;
- relação de dureza entre as superfícies.

Observa-se que em alguns trabalhos o modelamento físico e matemático do sistema de desgaste abrasivo se baseia na medição precisa dos parâmetros envolvidos. Grandezas como a forma do abrasivo, a carga por abrasivo, o diâmetro médio e a quantidade das partículas atuantes, são difíceis de serem medidas, o que requer um refinamento tecnológico dos equipamentos e instrumentos de medição, como é o caso de Fang e co-autores [3], ou simplificações do modelo matemático em função dos sistemas que estão sendo descritos [1-2, 4-10]. Dessa forma, o estado atual do conhecimento não permite a real compreensão da relação que define os mecanismos de desgaste predominantes em função dos parâmetros físicos que governam a dinâmica dos sistemas abrasivos. Os modelos matemáticos disponíveis se mostram demasiadamente simplificados ou com um universo muito restrito.

Outra abordagem relevante foi apresentada no trabalho de Pintaúde [13] onde a análise da rugosidade da superfície desgastada determina a profundidade média dos eventos ocorridos no desgaste (em geral riscamento). Esta informação possibilita o cálculo da força de penetração correspondente aos eventos do desgaste característicos de cada regime. Assim, utilizando a força de penetração, este autor definiu a “dureza verdadeira” como um importante parâmetro de análise do regime de desgaste. Um dos principais parâmetros de rugosidade utilizados por este autor para a análise da superfície desgastada foi o R_q . Este parâmetro mede o distanciamento dos picos e vales em relação a uma linha média do perfil estudado.

No presente artigo é apresentada uma nova metodologia para simular experimentalmente o desgaste abrasivo. Esse novo método reproduz a atuação do abrasivo sobre a superfície de uma amostra através de uma sequência de monoeventos controlados. Assim como o trabalho de Pintaúde [13], a análise da topografia de uma superfície desgastada fornece informações para a realização de cada evento. Dessa forma, reproduz-se sobre a superfície da amostra o mesmo mecanismo de desgaste observado.

A superfície de referência pode originar tanto de um ensaio laboratorial quanto de uma situação prática. A análise que parte de um ensaio de desgaste laboratorial, permite formular um modelo matemático que descreve o desgaste em função dos mecanismos predominantes.

Por outro lado, a análise de uma superfície que se origina de uma situação prática viabiliza o ranqueamento de materiais que possivelmente podem ser utilizados para substituir a peça desgastada que deu origem à superfície estudada.

Neste trabalho são apresentados dois aspectos desta metodologia, que enfocam o estudo do desgaste abrasivo e o

processo de simulação controlada. O ensaio de desgaste fornece a superfície de referência para a execução da simulação proposta.

2. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

material

O Material utilizado neste trabalho é um aço ferramenta com dureza de 700 HV.

Nos ensaios abrasivos foram utilizadas três amostras cilíndricas de diâmetro 15 mm e altura 10 mm. Antes dos ensaios as faces planas destas amostras foram retificadas e tiveram a superfície homogeneizada via lixamento e polimento leve.

Para a simulação do desgaste abrasivo utilizou-se uma amostra prismática de seção retangular medindo 50x20x10 mm. A face de maior área desta amostra também foi retificada e passou por um processo de lixamento e polimento metalográfico.

ensaio de desgaste

O ensaio de desgaste abrasivo foi realizado no abrasômetro LTM que está mostrado na Figura 1.

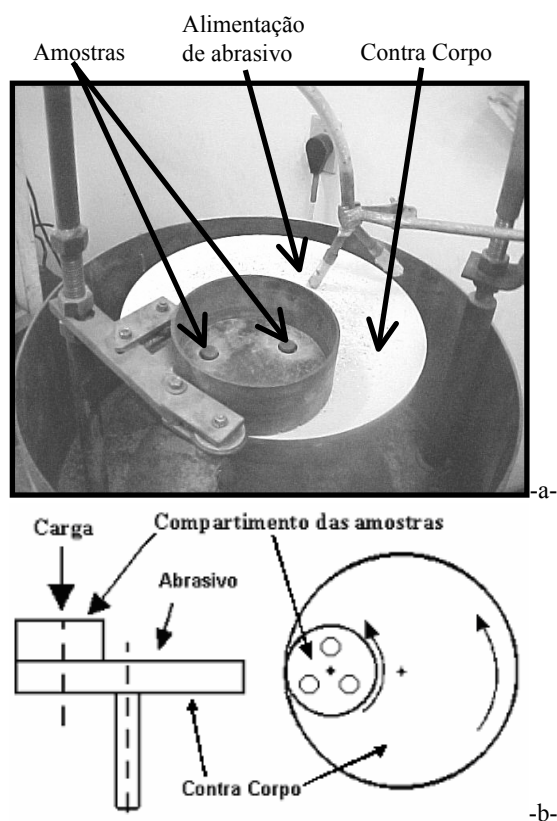


Fig. 1. a- Abrasômetro LTM; b-esquema.

As amostras são colocadas em um compartimento que garante a equidistância entre elas e permite a distribuição uniforme da carga (peso morto) sobre as amostras. O sistema é alimentado por um fluxo contínuo e uniforme de abrasivo (areia normal brasileira nº 30 – NBR 7214), de modo que a rotação do contra-corpo garanta a renovação desse abrasivo na interface de contato. O ensaio é realizado

a seco, com um contra corpo de borracha (estireno-butadieno - dureza 60 Shore A). A carga utilizada foi de 958,9 g.

Foram realizados seis ensaios de 10 minutos cada. O desgaste foi avaliado via perda de massa que foi medida em uma balança de alta resolução (0.0001g).

A topografia das superfícies testadas foi determinada através de um interferômetro a laser (UBM Microfocus Expert IV). A área de varredura foi de 1,0 x 1,0 mm, com uma resolução de 1000x1000 pontos.

A análise dos mecanismos de desgaste decorrentes do processo de abrasão foi realizada através de um microscópio eletrônico de varredura (MEV – Leo 940A – fabricante: Zeiss).

simulação

A análise da topografia da superfície desgastada (interferometria laser) permite a observação precisa da profundidade dos eventos, enquanto que a microscopia eletrônica permite avaliar quantidade relativa de cada evento, bem como a identificação da forma dos eventos. Desta análise os eventos da simulação são dimensionados, o que possibilita a definição da carga e/ou profundidade de cada evento, assim como da quantidade relativa de indentações e riscos realizados na simulação.

Em conformidade com a dinâmica do ensaio de desgaste, os eventos da simulação são realizados em posições e direções (no caso de riscos) aleatórias dentro de uma área quadrada pré-definida. A Figura 2-b mostra um esquema representativo dessa simulação.

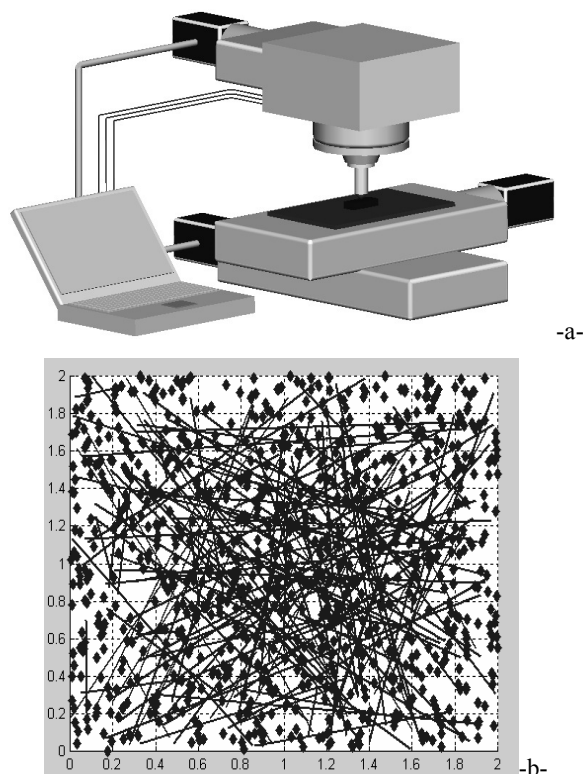


Fig. 2. Simulação LTM. a- esquema; b- área da simulação, representação de 1000 eventos (85% indentações).

A Figura 2 -b mostra gráfico que representa uma área de 2x2 mm onde são distribuídos 1000 eventos, sendo 90% destes eventos indentações. A posição da indentação consiste de um par coordenado aleatoriamente definido dentro desta área, enquanto que a posição de um risco é definida pelos pontos extremos, ou seja, dois pares coordenados igualmente aleatórios. A ordem de cada evento também é aleatória. Esta lógica definiu o posicionamento dos eventos durante a simulação.

O equipamento utilizado nesta simulação foi o macro-esclerômetro retilíneo, Figura 2-a, composto por três mesas coordenadas que permitem a movimentação da amostra no plano horizontal e do penetrador na direção perpendicular a esse plano. A resolução das mesas coordenadas é de 0.001 mm para os eixos x e y e 0.00001 mm no eixo z. Este equipamento é equipado com uma célula de carga que suporta 50 Kg.

Foram utilizados penetradores de diamante nos padrões Rockwell e Vickers.

Em todos os testes foram utilizadas velocidades de deslizamento do penetrador sobre a amostra abaixo de 0,300 mm/s com o objetivo de preservar a integridade do penetrador durante a realização da sequência de eventos.

Através de interferometria laser e MEV é possível observar a semelhança entre a topografia e os mecanismos de desgaste da superfície produzida na simulação e a superfície original.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A superfície de referência para a simulação obtida no 'abrasômetro LTM' foi caracterizada via MEV, está mostrada na Figura 3.

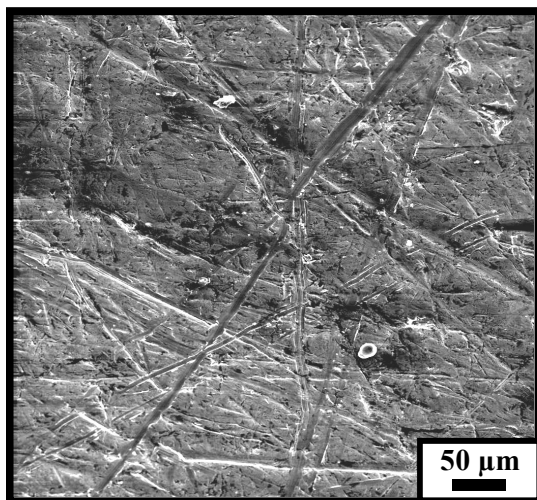


Fig. 3. Superfície desgastada. Inclinação 30°, MEV.

Esta condição de ensaio: abrasivo grande, alta carga e contra-corpo de borracha, favorece, em princípio, o deslizamento dos abrasivos na interface. Entretanto, é possível a ocorrência de rolamento e deslizamento simultaneamente, uma vez que os abrasivos não são fixos no contra corpo. A dinâmica deste ensaio não permite o

direcionamento dos eventos formados durante o desgaste (Fig.1-b).

A Figura 3 mostra uma maior quantidade de indentações do que riscos/sulcos sobre a superfície desgastada. Os riscos/sulcos são de comprimentos variados e direções aleatórias, como esperado neste tipo de ensaio de desgaste.

A topografia da superfície desgastada, Figura 4-a, também permite a observação da ocorrência tanto de riscos quanto de indentações. A Figura 4-b mostra o aspecto da superfície desgastada em perspectiva.

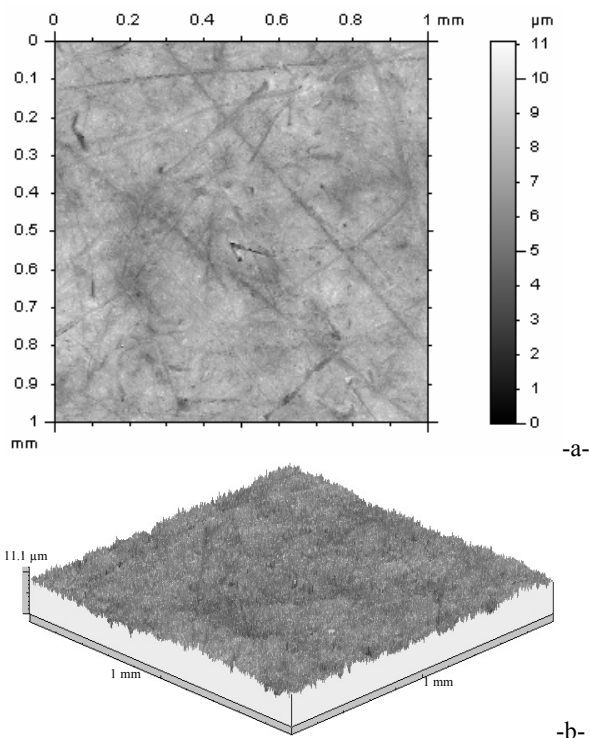


Fig. 4. Interferometria a laser: a- topografia da superfície desgastada; b- topografia em perspectiva.

Estuda-se a possibilidade de se fazer análises de imagem para quantificar precisamente a proporção de riscos/sulcos e indentações, para sistemas onde ocorrem tanto o mecanismo de rolamento quanto de deslizamento da partícula abrasiva. Entretanto, para um estudo inicial, a observação visual da superfície desgastada apresentada na Figura 3 e sua respectiva topografia, Figura 4-a, pode-se estimar, numa primeira aproximação, cerca de 10 % de ocorrência de riscos, e 90% de ocorrência de indentações.

A profundidade dos eventos ocorridos na superfície desgastada foi quantificada utilizando a análise da rugosidade calculada a partir da topografia desta superfície. Estes parâmetros estão mostrados na tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros de rugosidade da superfície desgastada.

Sa	Sq	Ssk	Sku
0.633 µm	0.811 µm	-0.424	3.940

O parâmetro escolhido nesta análise é o Sq, que relaciona dispersão da altura dos picos e dos vales em relação a um plano médio da superfície estudada. Assim, a profundidade

de média de penetração dos eventos foi definida em $0,8\text{ }\mu\text{m}$, de acordo com o 'Sq' da topografia da superfície de referência. (tabela 1).

Em um ensaio exploratório inicial, foram realizados 2000 eventos aleatoriamente distribuídos em uma área de 1 por 1 mm, com velocidade de riscamento fixa em $0,200\text{ mm/s}$. É importante salientar que a velocidade de riscamento é constante independentemente da direção do risco.

Nesse ensaio realizou-se um controle de profundidade do evento, fixado em $0,8\text{ }\mu\text{m}$ tanto para o deslizamento quanto para a indentação. Foi utilizado um penetrador Rockwell C (diamante-cônico). A Figura 5 mostra a superfície gerada neste ensaio.

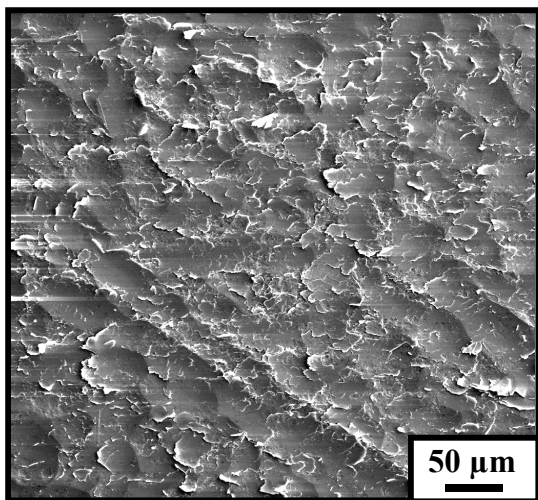


Fig. 5. Superfície obtida na simulação. Área $1\times 1\text{ mm}$, 2000 eventos. MEV.

Observa-se que a deformação plástica ocorrida na superfície pode levar a remoção de material. O mecanismo de desgaste mostrado na Figura 5 não é compatível com o observado na superfície de referência (Figura 3).

Assim, foram realizados novos testes utilizando um penetrador Vickers (piramidal), com uma velocidade de riscamento fixada em $0,300\text{ mm/s}$ em uma área de 2 por 2 mm. Estes testes foram realizados até 3000 eventos, em seis etapas de 500 eventos. A Figura 6 mostra o aspecto da superfície após a realização dos 3000 eventos.

Observa-se que a superfície mostrada na Figura 6 se aproxima da superfície de referência (Figura 3), entretanto os eventos produzidos na simulação têm uma dimensão maior que os da referência (Figuras 3 e 6).

A Figura 7 mostra a variação da força resultante do movimento do penetrador sobre a superfície da amostra. Neste gráfico a força foi representada pelas componentes nos eixos x, y e z, e ao final de cada etapa da simulação (corresponde a 500 eventos) foi calculada a força média referente a todos os eventos e o desvio padrão.

A Figura 7 mostra que componente da força em z decresceu durante o ensaio, representando um decréscimo de até 3,5 vezes no valor da força normal. Essa diminuição pode ser justificada pelo fato da referência do posicionamento do

penetrador ser externa à área de atuação. Dessa forma, no decorrer do ensaio a superfície foi alterada e parte do material removido, diminuindo a profundidade efetiva de atuação do penetrador a partir de 2000 eventos (Figura 7).

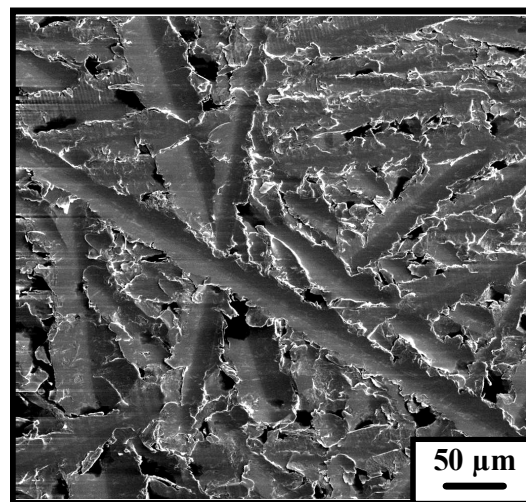


Fig. 6. Superfície produzida na simulação. Área $2\times 2\text{ mm}$, 3000 eventos. MEV.

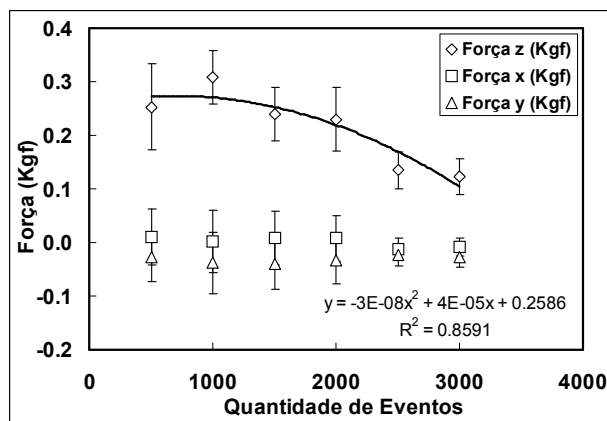


Fig. 7. Componentes da força adquiridas durante todo o ensaio.

Para minimizar esse efeito foi realizada um processo de toque na superfície na posição onde o evento ocorre (posição da indentação ou posição do início do risco), e depois a penetração com a profundidade definida.

Procedeu-se, então, a realização de 2500 eventos aleatoriamente distribuídos em uma área de 2 por 2 mm, em cinco etapas de 500 eventos. A velocidade do riscamento foi fixada em $0,300\text{ mm/s}$.

Para analisar o comportamento de algumas variáveis em função da densidade de eventos, foram obtidos, entre cada etapa, a massa da amostra, a topografia da superfície (interferometria a laser) e o aspecto do mecanismos de desgaste (MEV).

A Figura 8 mostra a perda de massa entre cada etapa da simulação.

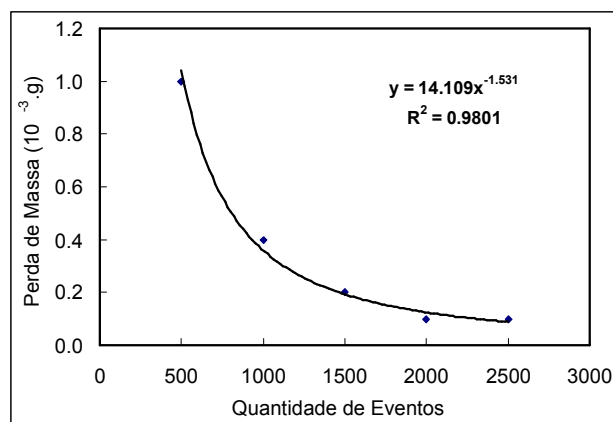


Fig. 8. Perda de massa em função da quantidade de eventos.

Observa-se a tendência da diminuição da perda de massa com o aumento da densidade de eventos sobre a mesma área. A variação da massa foi pequena, principalmente nas últimas etapas da simulação (aproximadamente 0,0002 g), o que leva a questionar se a balança utilizada é suficientemente sensível para essa medição uma vez que a variação da massa está próxima da resolução do equipamento. Assim, para efeito de comparação, procedeu-se a medição da perda de volume do material utilizando interferometria a laser. A Figura 9 mostra a variação do volume de material retirado da superfície em função da quantidade de eventos.

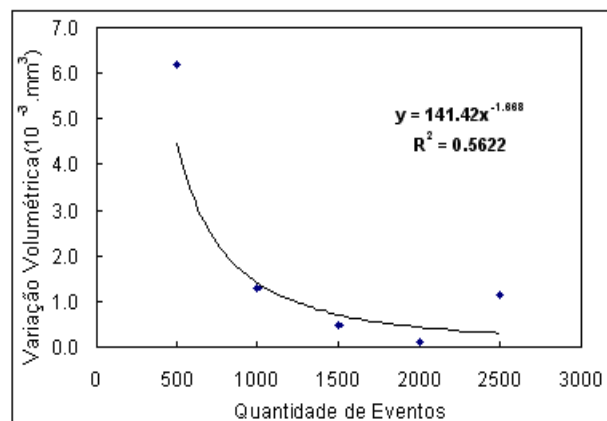


Fig. 9. Variação do volume de material retirado da superfície em função da quantidade de eventos.

Assim como na perda de massa, a perda de volume tende a diminuir, principalmente nas maiores densidades de eventos (Figura 9). A análise via interferometria a laser também mostrou que a rugosidade diminuiu com o aumento da quantidade de eventos, como está mostrado no gráfico da Figura 10.

É importante notar que a rugosidade produzida na simulação não corresponde a rugosidade da superfície desgastada (tabela 1), entretanto a medida que aumenta a quantidade de eventos a rugosidade da superfície simulada tende a se aproximar da rugosidade da superfície de referência.

A Figura 11 mostra a evolução da superfície produzida na simulação em função da quantidade de eventos.

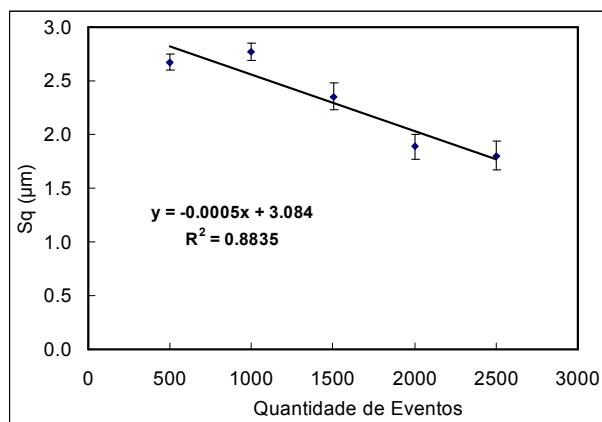


Fig. 10. Rugosidade 'Sq' em função da densidade de eventos.

Observa-se, na Figura 11, que a superfície é alterada, apresentando um aspecto mais suave, a medida que aumenta a densidade de eventos. Essa observação está de acordo com o gráfico da Figura 10, confirmando a análise em função da rugosidade da superfície.

Comparando a superfície de referência (Figura 4) com a Figura 11 -d- e, observa-se que, quando a quantidade de eventos é grande, a simulação se aproxima da superfície desgastada, entretanto os eventos produzidos na simulação são maiores que na superfície de referência.

Qualitativamente, a superfície produzida pela simulação onde a referência era somente externa a área de atuação (Figura 6) não apresenta diferença da superfície produzida pela simulação que realizou um apalamento antes de cada evento (Figura 11).

O gráfico mostrado na Figura 12 mostra a evolução das componentes da força durante o ensaio.

A Figura 12 mostra que o processo de apalamento da superfície antes da realização de cada evento promoveu a redução na tendência de diminuição da força normal para 2,25 vezes. Entretanto, a dispersão dos valores da componente da força em z é considerável. As componentes da força no sentido de x e y não apresentam variação com a quantidade de eventos, e são dispersas em torno do valor zero. Essa dispersão se deve a aleatoriedade do movimento do penetrador sobre a amostra.

O fundo de escala da célula de carga desse equipamento é 50 Kg, o que indica que a precisão deste sensor diminui para cargas abaixo de 0,5 Kg. De acordo com a curva de calibração desta célula de carga observa-se que o erro de medição da força é crescente em baixas cargas, estando entre 8 e 17 % na faixa de carga onde ocorrem os eventos, o que justifica a dispersão da força no sentido z.

O processo de apalamento da superfície toma como referência uma carga menor ainda, em torno de 0,1 Kgf, que pode representar um erro de medição de até 42 %. Esta insensibilidade intrínseca do sistema para determinar a superfície antes de cada evento pode estar contribuindo para a grande dispersão da força normal medida, e para a variação da dimensão dos eventos.

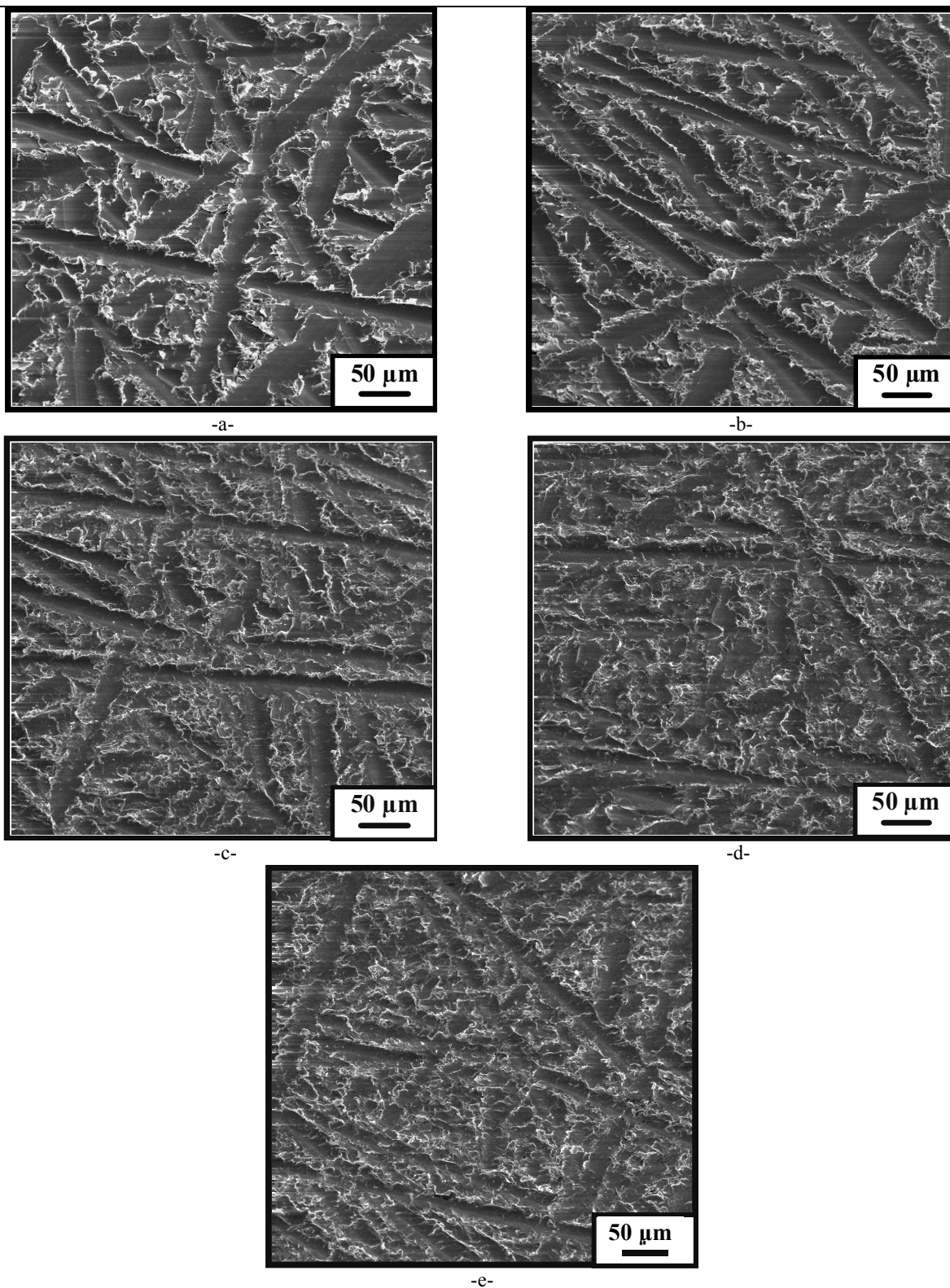


Fig. 11. Superfície produzida na simulação LTM. a- 500 eventos; b- 1000 eventos; c- 1500 eventos; d- 2000 eventos; e- 2500 eventos. Inclinação: 30°, MEV.

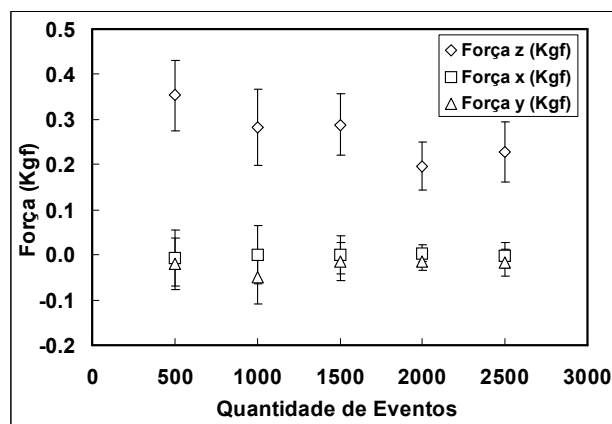


Fig. 12. Componentes da força resultante média em função da quantidade de eventos.

4. CONCLUSÕES

- Os resultados preliminares mostraram que a simulação dos mecanismos de desgaste se aproxima da realidade, mas apresenta eventos em uma escala maior do que a referência.
- A semelhança qualitativa entre a superfície produzida pela simulação e a referência pode estar associada a profundidade efetiva dos eventos realizados na simulação.
- A metodologia proposta para a realização da simulação dos mecanismos de desgaste abrasivo via eventos múltiplos é viável, entretanto faz-se necessário aumentar a sensibilidade do sistema de leitura da carga para que a simulação possa reproduzir fielmente o mecanismo de desgaste da superfície de referência.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Williams, J. A. and Hyncica, A. M., "Mechanisms of abrasive wear in lubricated contacts", *Wear*, volume 152, pp 57-74, 1992.
- [2] Williams, J. A. and Hyncica, A. M., "Abrasive wear in lubricated contacts", *J. Phys. D: Appl. Phys.*, volume 25, pp A81-A90, 1992.
- [3] Fang, L., Kong, X. L., Su, J. Y. and Zhou, Q. D., "Movement patterns of abrasive particle in three-body abrasion", *Wear*, volume 162 - 164, pp 782 - 789, 1993.
- [4] Verspui, M. A., With, G. de, Van Der Varst, P. G. Th., Buijs, M., "Bed thickness and particle size distribution in three-body abrasion", *Wear*, volume 188, pp 102 - 107, 1995.
- [5] Buijs, M. and Korpel-van Houten, K., "A model for lapping of glass", *Journal of Materials Science*, volume 28, pp 3014 - 3020, 1993.
- [6] Buijs, M. and Korpel-van Houten, K., "Three-body abrasion of brittle materials as studied by lapping", *Wear*, volume 166, pp 237 - 245, 1993.
- [7] Verspui, M. A., With, G., "Three-body abrasion: Influence of applied load on bed thickness and particle size distribution in abrasive processes", *Journal of the European Ceramic Society*, volume 17, pp 473 - 477, 1997.
- [8] Adachi, K., Hutchings, I. M., "Wear mode mapping for the micro-scale abrasion test", *Wear*, volume: 255, pp 23 - 29, 2003.
- [9] Trezona, R. I., Allsopp, D. N. and Hutchings, I. M., "Transition between two-body and three-body abrasive wear: influence of test conditions in the microscale abrasive wear test.", *Wear*, volume 225 - 229, pp 205 - 214, 1999.
- [10] Kelly, D. A. and Hutchings, I. M., "A new method for measurement of particle abrasivity", *Wear*, volume 250, pp 76-80, 2001.
- [11] Da Silva, W. M., "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, 2003, 98p.
- [12] Da Silva, W. M., Binder, R. e de Mello, J. D. B., "Abrasive Wear of Steam Treated Sintered Iron", *Wear*, volume 258, pp 166-177, 2005.
- [13] Pintaúde, G., "Análise dos regimes moderados e severo de desgaste abrasivo utilizando ensaios instrumentados de dureza", *Tese de Doutorado*, Departamento de Engenharia Mecânica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 200p, 2002.