

MÉTODO DE SIMULAÇÃO DO DESGASTE ABRASIVO USANDO INTERAÇÕES MÚLTIPLAS¹

Washington Martins da Silva Junior²
José Daniel Biasoli de Mello³

Resumo

Neste trabalho é apresentado o embasamento teórico, assim como os resultados preliminares referentes a uma nova metodologia desenvolvida para simular o desgaste abrasivo com base no movimento das partículas atuantes na abrasão. O rolamento das partículas na interface de desgaste gera indentações nas superfícies, representado por uma seqüência de indentações controladas, enquanto o deslizamento das partículas produz riscos/sulcos nas superfícies, representado por uma seqüência de deslizamentos controlados. Nesse trabalho são descritos os dois equipamentos especialmente desenvolvidos para a simulação: macro-simulador (limite 500 N) e micro-simulador (limite 18 N). A superfície abrasonada, obtida de um teste de desgaste laboratorial, é usada como referência para esse novo método. A análise morfológica e topográfica da referência define a configuração do posicionamento e a intensidade das interações na simulação. As amostras foram confeccionadas em aço ferramenta, vidro e aço carbono. Foi avaliado o efeito dos parâmetros de simulação na morfologia da superfície gerada. Observou-se que a utilização do macro-simulador não é viável, pois o sensor de força não permite a correta medição na faixa de força normal requerida. No micro-simulador foi estudado o rolamento das partículas abrasivas, usando a configuração indentação aleatória. A metodologia proposta para a simulação do desgaste abrasivo via interações múltiplas é viável, uma vez que a simulação gerou desgaste mensurável.

Palavras-chave: Desgaste abrasivo; Mecanismo de desgaste; Simulação.

NEW METHOD TO SIMULATE ABRASIVE WEAR USING MULTIPLE INTERACTIONS

Abstract

This work presents the theoretical basis and preliminary results of a new methodology developed for the simulation of abrasive particle movement. In this method the rolling of the abrasives is represented by a sequence of indentations, and the sliding of the active particle by a sequence of scratches. Two new equipments were especially developed to reproduce the action of an abrasive particle for the abrasive wear simulation: macro-simulator (load limit 500 N) and micro-simulator (load limit 18 N). A worn surface produced in an abrasive test was used as a reference for the simulation. Its topography was assessed using laser interferometry and scanning electron microscopy. Morphological and topographical analysis of the reference defines the simulation configuration and intensity of the interactions. The study was performed on 1010 steel, tool steel and soda lime glass samples. Results showed that the simulation process was not possible when using the macro-simulator because the load cell is out of range for the required loads. Using the micro-simulator the rolling of the abrasive particles was simulated by random positioned indentations.

The proposed methodology is applicable to reproduce the abrasive wear, once it produced measurable mass loss.

Key words: Abrasive wear; Wear mechanism; Simulation; Multiple interactions.

¹ Contribuição técnica ao 64º Congresso Anual da ABM, 13 a 17 de julho de 2009, Belo Horizonte, MG, Brasil.

² Laboratório de Tribologia e Materiais, Departamento de Engenharia Mecânica, UFU.; Centro Tecnológico, Departamento de Engenharia Mecânica, UFES.

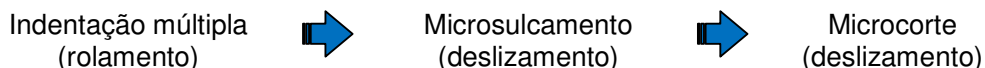
³ Laboratório de Tribologia e Materiais, Departamento de Engenharia Mecânica, UFU.

1 INTRODUÇÃO

Estudos mostram que a morfologia da superfície obtida em testes de abrasão está associada com a dinâmica da partícula abrasiva atuante na interface de desgaste.⁽¹⁻³⁾ Em seu trabalho, Rutherford e Hutchings,⁽¹⁾ mostraram que no desgaste abrasivo a três corpos é possível a ocorrência da rotação e/ ou deslizamento das partículas atuantes. A rotação das partículas resulta em indentações espalhadas sobre a superfície de desgaste, indentação múltipla. Riscos/sulcos são associados ao engastamento das partículas no contra-corpo, que deslizam sobre a amostra.

Trezona, Allsopp e Hutchings⁽²⁾ propõem uma nova classificação para o desgaste abrasivo em função da dinâmica da partícula atuante. O processo de desgaste abrasivo no qual as partículas são fixadas no contra-corpo e deslizam sobre a amostra é descrito como “desgaste abrasivo por sulcamento”, e o processo em que é possível o rolamento das partículas entre as superfícies é descrito como “desgaste abrasivo por rolamento”. Esses autores colocam que o desgaste abrasivo por sulcamento é o processo no qual a mesma região da partícula abrasiva, ou asperidade, permanece em contato com a superfície desgastada ao longo do processo. Nesse tipo de desgaste as superfícies são caracterizadas por sulcos paralelos à direção de deslizamento da partícula. Em contraste, o desgaste abrasivo por rolamento é o processo caracterizado pelo fato de várias asperidades da mesma partícula abrasiva interagir com a superfície de desgaste durante o processo abrasivo. As superfícies de desgaste produzidas pelo processo de rolamento da partícula abrasiva são caracterizadas por serem altamente deformadas, com a presença de indentações múltiplas, e com pouca ou nenhuma direcionalidade.⁽²⁾

Williams e Hyncica⁽³⁾ usaram um modelo para demonstrar o efeito da distância entre as superfícies, tamanho e forma do abrasivo sobre o mecanismo de desgaste predominante. 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. 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 impactos ocasionais. Se o tamanho da partícula aumenta é provável que esta se prenda, indentando as superfícies móveis. A força associada a cada indentação está relacionada à dureza do material e possui direção perpendicular à face de indentação. Como a partícula é simétrica, existe outra indentação ocorrendo na face oposta 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 e 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. Estes autores⁽³⁾ demonstraram que o ângulo de ataque efetivo cresce em função do aumento da razão D/h , evidenciando duas conseqüências na mudança do mecanismo de desgaste:



O trabalho de Fang et al.⁽⁴⁾ 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 a partícula angulosa tende a rolar entre as superfícies. O deslizamento leva a formação de riscos/sulcos sobre a superfície, enquanto o rolamento produz uma série de pontos de deformação plástica, indentações.⁽⁴⁾

Em síntese, o micromecanismo de remoção de matéria está associado ao movimento e interação das partículas abrasivas com as superfícies. Essa dinâmica é influenciada por alguns parâmetros tribológicos. A Figura 1 mostra um esquema simplificado dos fatores que interferem no mecanismo de desgaste.

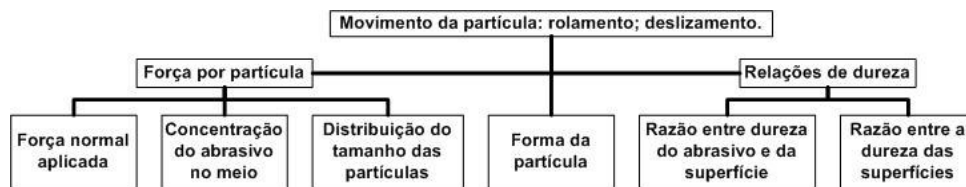


Figura 1 - Parâmetros tribológicos que interferem no tipo de mecanismo de desgaste atuante.

A força por partícula, ou força efetiva suportada pelas partículas abrasivas atuantes no desgaste, está diretamente associada à força normal aplicada, à concentração do abrasivo no meio e à distribuição do tamanho das partículas. O aumento da carga de teste, para uma mesma concentração, aumenta a força por abrasivo e diminui a distância entre as superfícies, o que favorece o deslizamento das partículas. Por outro lado, o aumento da concentração de abrasivo no meio aumenta a quantidade de partículas atuantes. Mantendo a mesma carga de teste, o aumento da concentração leva à diminuição da força por partícula, e em consequência, ao aumento da distância entre as superfícies, o que favorece o rolamento dos abrasivos. A distribuição dos tamanhos das partículas abrasivas permite encontrar o diâmetro das partículas atuantes. Se a condição de carga não induzir a quebra do abrasivo, o aumento do tamanho da partícula leva a diminuição da quantidade total de abrasivos presentes na interface por unidade de área, o que eleva a carga por abrasivo ocasionando aumento na taxa de desgaste. O mecanismo de desgaste predominante se relaciona com a razão do tamanho do abrasivo atuante pela distância entre as superfícies.⁽⁵⁻⁷⁾

Independente do efeito da forma e tamanho da partícula, a dureza da partícula abrasiva está relacionada à sua capacidade de degradação.^(8,9)

A grande diferença de dureza entre as superfícies móveis leva ao engastamento da partícula sobre o material mais mole, facilitando o deslizamento do abrasivo sobre a superfície de maior dureza.^(3,10)

No presente artigo é proposta uma nova metodologia de testes laboratoriais bem controlados para a simulação do movimento das partículas atuantes na abrasão. Foram desenvolvidos dois equipamentos instrumentados capazes de reproduzir a atuação de uma partícula abrasiva através de uma seqüência de interações controladas. Testes exploratórios buscaram avaliar o efeito dos parâmetros de simulação na morfologia da superfície gerada.

2 METODOLOGIA

A proposta de uma nova abordagem para simulação do desgaste abrasivo consiste em realizar uma seqüência de deslizamentos e/ou indentações sobre a superfície de uma amostra. Uma superfície abrasonada é a referência da simulação. O rolamento das partículas é simulado através de uma seqüência de indentações, assim como o deslizamento da partícula é simulado por uma seqüência de riscos/sulcos. De acordo com a morfologia da referência, define-se a configuração da simulação, que pode ser somente indentações ou uma mistura de indentações e riscos/sulcos. No processo de simulação é possível controlar a posição das interações e, no caso de riscos/sulcos, a sua direção. Da análise quantitativa da topografia da referência, obtêm-se as informações sobre a intensidade de cada interação da simulação. A análise de parâmetros de rugosidade define a profundidade ou a força normal das interações. A seqüência de interações superpostas altera a superfície da amostra, de forma que reproduza o mecanismo de desgaste observado na referência. A simulação é considerada válida ao se constatar a semelhança topográfica e morfológica entre a superfície produzida na simulação e a referência; caso contrário os parâmetros de simulação são redefinidos. Constatando a validade da simulação, obtêm-se as principais informações de saída desse processo: a taxa de desgaste, que pode ser medida pela variação de massa, ou volumétrica; e a rugosidade. Estas informações permitem a seleção de materiais para aplicação prática que deu origem à superfície de referência.

O ensaio de simulação guarda informações sobre as forças decorrentes da interação indentador-amostra, posição exata onde ocorreu a interação e distância do indentador em relação a superfície da amostra.

No presente trabalho as referências são obtidas no abrasômetro LTM (três-corpos),^(9,11) cujo esquema de funcionamento está descrito na Figura 2. Os parâmetros tribológicos controlados nesse teste são: força normal, material do contra-corpo, tipo de abrasivo, fluido e velocidade de rotação dos ensaios.

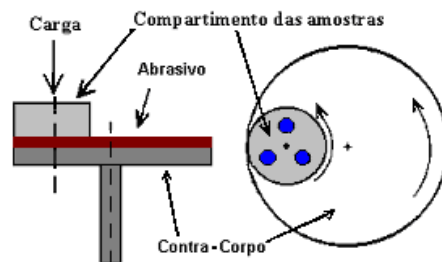


Figura 2. Esquema do abrasômetro LTM.

Nesse abrasômetro são testadas três amostras ao mesmo tempo, posicionadas em um compartimento, e sob a ação de um peso conhecido. O contra-corpo movimentar-se através de um motor elétrico que gira a 35 rpm. Esse movimento faz com que o compartimento das amostras gire em relação ao contra-corpo, como indicado na Figura 2. Foram utilizados dois materiais distintos como contra-corpo: ferro fundido branco (ASTM 532IIIA) temperado e revenido a 250°C por 1 h, dureza 7365 MPa e borracha (estirenobutadieno) de dureza 60 Shore A. O sistema é alimentado por um fluxo contínuo e uniforme de abrasivo, de modo que a rotação do contra-corpo garanta a renovação do abrasivo na interface de contato. O

ensaio pode ser realizado a seco ou úmido. A quantificação do desgaste é obtida através da determinação da variação da massa da amostra.

Os materiais estudados foram: aço ferramenta tipo M2 (dureza de 6800 MPa), vidro sodo-cálcico e aço ABNT 1010. As amostras utilizadas nos ensaios de desgaste abrasivo foram retificadas, enquanto as superfícies dedicadas aos ensaios de simulação passaram por um processo de polimento metalográfico, até pasta de diamante 3 μm .

A morfologia da referência foi observada via microscopia eletrônica de varredura (MEV – Leo 940 A - Zeiss), enquanto a topografia foi acessada utilizando interferometria laser (IL – UBM Microfocus Expert IV) usando uma resolução lateral de 1.000 pontos por mm.

Os parâmetros de rugosidade e o volume desgastado nos ensaios de simulação foram calculados utilizando o programa próprio para a análise da topografia, Mountains Map Universal®, da empresa Digital Surf.

Os equipamentos desenvolvidos para executar a simulação são o macro e o micro-simulador, apresentados na Figura 3. Um sistema de mesas coordenadas de alta resolução movimenta a amostra no plano horizontal e o indentador no eixo vertical. No micro-simulador o movimento do indentador é controlado por um atuador piezelétrico de alta resolução (PZT – 0,5 nm). Células de carga tridimensional são utilizadas para controlar a intensidade da força normal da interação e para medir as forças nas direções x, y e z. Foi desenvolvida uma interface de comunicação e controle desse equipamento utilizando a plataforma Labview®. Nesse trabalho foi utilizado o indentador Vickers.

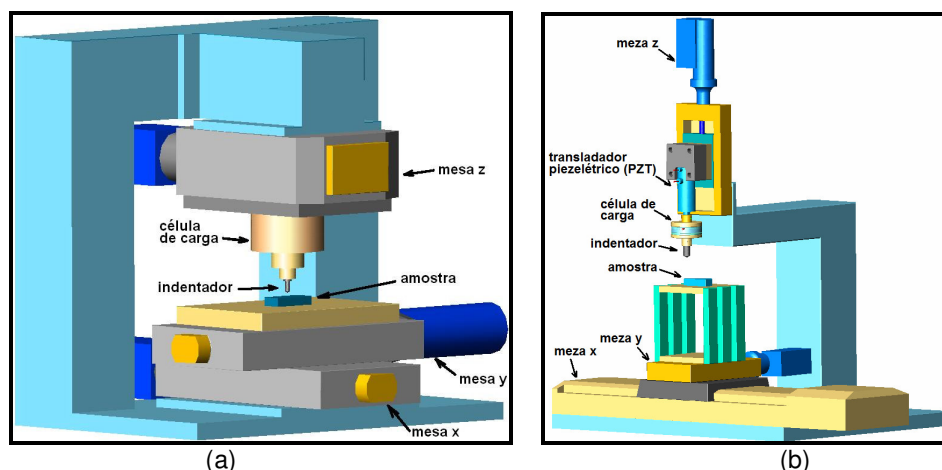


Figura 3. Esquema dos equipamentos desenvolvidos. a- Macro-simulador; b- Micro-simulador.

A Figura 4 apresenta as cinco configurações possíveis para o posicionamento dos riscos/indentações na área pré-definida para a simulação. As posições das indentações e dos deslizamentos foram definidas de acordo com um gerador de números aleatórios. Esse caráter aleatório da definição do posicionamento faz com que existam regiões com maior concentração de interações que outras. O aumento da quantidade de interações leva ao preenchimento da área de trabalho.

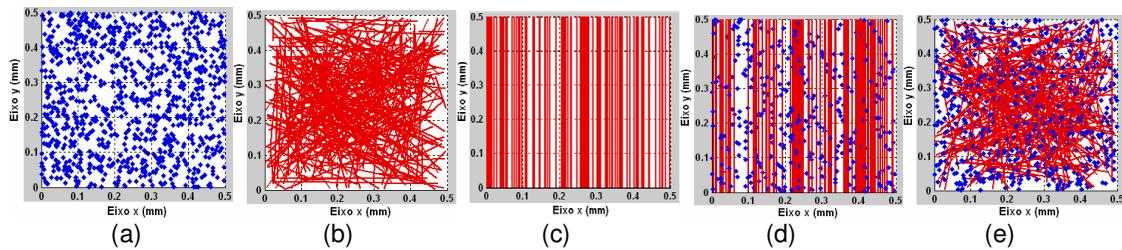


Figura 4. a- Indentação aleatória; b- Deslizamento aleatório; c- Deslizamento paralelo; d- Deslizamento paralelo e indentação aleatória; e- Deslizamento aleatório e indentação aleatória.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 5c apresenta a referência obtida no abrasômetro LTM nas seguintes condições: força normal 6,94 N; abrasivo sílica (SiO_2 - 0,6 a 1,2 mm) e contra-corpo de borracha. Esse teste foi interrompido ao entrar no regime permanente de desgaste (uma hora e meia de ensaio).

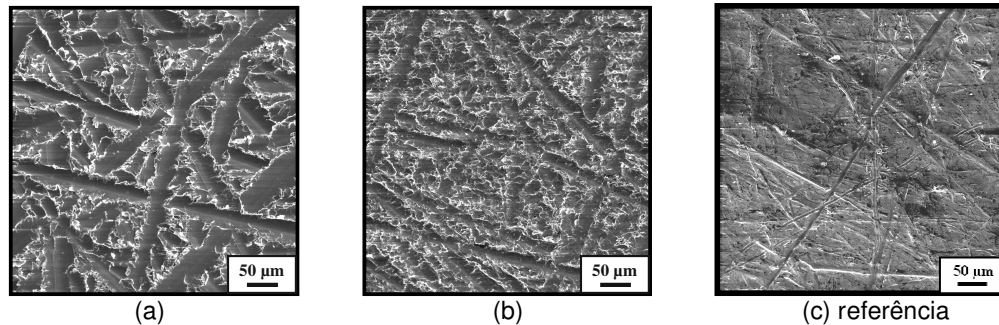


Figura 5 - Superfície produzida na simulação. a- 500 interações; b- 2500 interações; c- Referência. MEV, inclinação 30° .

Observa-se a ocorrência tanto de riscos/sulcos quanto de indentações sobre a superfície desgastada (Figura 5c). Para representar essa condição de desgaste na simulação foi utilizada a configuração deslizamento aleatório e indentação aleatória mostrado na Figura 4e.

A simulação foi realizada em 5 etapas de 500 interações. Foi definida a proporção 90% de ocorrência de deslizamentos e 10% de indentações. O resultado duas condições de simulação são apresentados na Figura 5 a-b. Comparando com a referência, observa-se que as marcas produzidas na simulação têm maior dimensão em relação aos encontrados na referência. Observa-se também que a morfologia é suavizada com o aumento da quantidade de interações.

Adotou-se o parâmetro de rugosidade da superfície S_q para representar variação média das alturas das irregularidades da topografia da referência. Este parâmetro foi associado à profundidade das interações que ocorreram na abrasão. Assim, o valor de S_q da referência igual a $0,81 \mu\text{m}$ correspondeu ao controle direto da profundidade da interação em $0,8 \mu\text{m}$ no processo de simulação. A Figura 6 mostra a perda de massa e a variação volumétrica entre cada etapa da simulação.

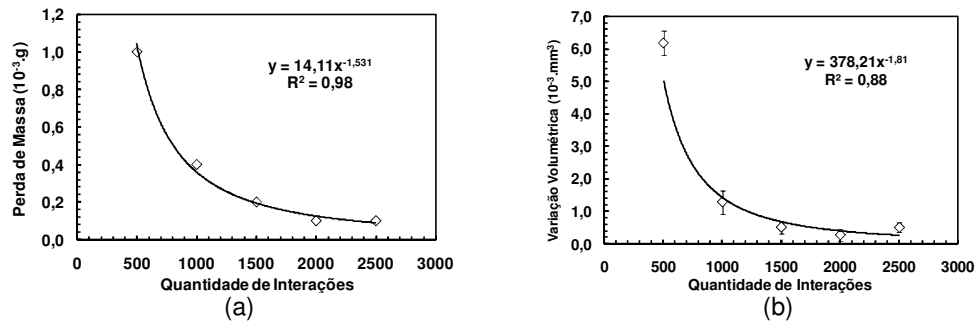


Figura 6 - a- Perda de massa e b- variação volumétrica em função da quantidade de interações.

A Figura 6a mostra que o valor da perda de massa diminui com o aumento da densidade de interações. A variação da massa foi pequena, principalmente nas últimas etapas da simulação (aproximadamente 0,0001 g), valor próximo ao limite de resolução da balança. O volume de material removido é medido utilizando a borda da área onde as interações foram realizadas como referência da superfície da amostra. Assim como na perda de massa, a variação volumétrica diminui à medida que a densidade de interações aumenta (Figura 6b). A medição da variação volumétrica via IL é uma boa opção para avaliar o desgaste na simulação. A rugosidade das superfícies obtidas na simulação foram medidas na região interna à de simulação, sem o efeito da borda dessa área. A Figura 7a apresenta os resultados de Sq em função da quantidade de interações.

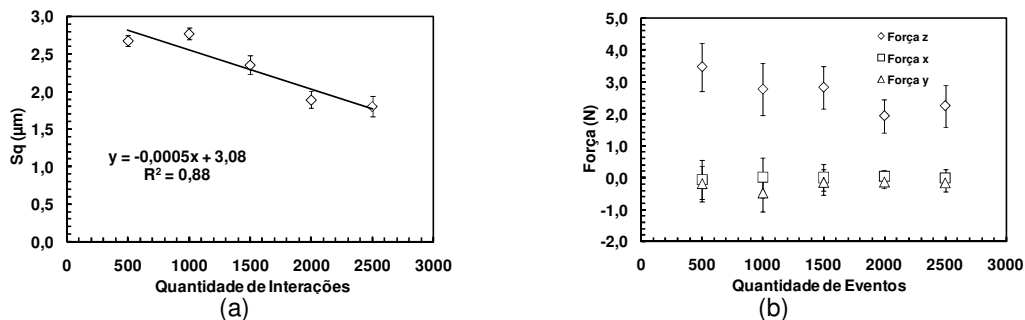


Figura 7 - a- Rugosidade Sq e b- força média em função da densidade de interações.

O valor do Sq da superfície produzida na simulação está na ordem de 1,8 a 2,6 μm , e não corresponde a rugosidade da referência, 0,81 μm . Entretanto, a rugosidade da superfície produzida na simulação tende a diminuir linearmente em função do aumento da quantidade de interações.

A Figura 7b mostra que 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 interações, e são dispersas em torno de zero. Esse fato se deve à aleatoriedade da direção dos deslizamentos, característico da configuração utilizada para a simulação.

O fundo de escala da célula de carga do macro-simulador é 500 N, o que indica que a precisão deste sensor diminui para cargas abaixo de 5 N. Esta insensibilidade intrínseca do sistema para medir forças abaixo de 5 N contribuiu para a grande dispersão da força normal medida (Figura 7b), e para a variação da dimensão das interações observadas na Figura 5a-b.

Nesse estágio do estudo exploratório nos deparamos com um problema de escala, ou seja, deve-se diminuir a dimensão das interações na simulação para representar o desgaste abrasivo. A solução encontrada foi a utilização do micro-

simulador que é mais preciso nas medições de força (fundo de escala 18 N) e no posicionamento do indentador (PZT). Como característica desse equipamento, o controle da profundidade é realizado monitorando a força normal de cada interação, ou seja, cada profundidade de interação possui uma força normal associada.

Nessa nova etapa foi estudado somente o rolamento da partícula abrasiva, representado na simulação pela configuração indentação aleatória (Figura 4a). Os ensaios preliminares as indentações são realizadas com força normal constante em quatro níveis (0,49 N; 0,98 N; 1,47 N e 1,96 N). São avaliados três níveis de quantidade de indentações (2.000, 3.500 e 5.000). O volume desgastado foi calculado utilizando a superfície da amostra na borda da área da simulação como referência. Esse cálculo foi realizado no programa Mountains Map Universal®.

3.1 Aço Ferramenta

A Figura 8 mostra alguns resultados preliminares de volume removido e Sq usando amostras de aço ferramenta.

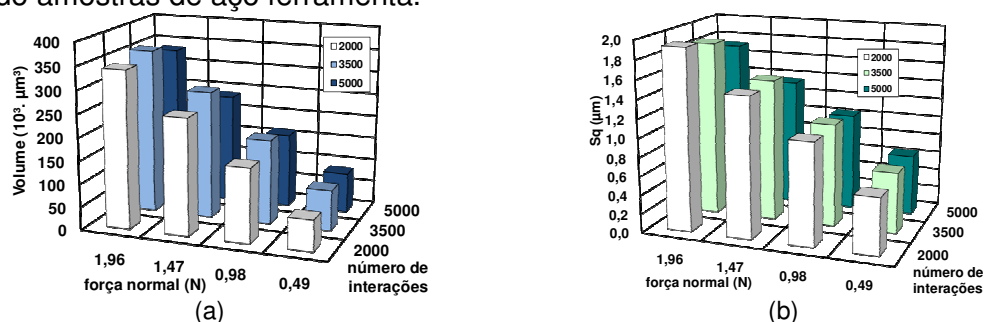


Figura 8 – Resultado do mapeamento no aço ferramenta: a- Volume removido; b- Sq.

Para a mesma quantidade de indentações, o volume aumenta em função da força normal das indentações (Figura 8^a). Essa variação representou um aumento no valor do volume de até 410% em relação à força normal. Em relação à quantidade de indentações a variação no valor do volume não foi significativa. O Sq foi medido dentro da área de trabalho, sem influência das deformações na borda. Na Figura 8b, observa-se que a força normal afeta fortemente o valor do Sq. Essa influência é de 222% para as simulações realizadas com 2000 indentações. Para valores baixos de força normal (0,49 N e 0,98 N) o valor do Sq aumenta de 8,4%, em função da quantidade de indentações. Na força normal 1,96 N o Sq diminui 11,6% em função do aumento da quantidade de indentações.

3.2 Vidro Sodo-cálcico

A mesma metodologia foi realizada em amostras de vidro. Na maioria das condições de teste, o mecanismo de remoção de matéria foi o estilhaçamento da superfície, característico do comportamento frágil. Na simulação com 2000 indentações e força normal 0,49 N houve a deformação plástica, característica do comportamento dútil, na maior parte da área de trabalho. Esse fato motivou a realização de novos ensaios de simulação em menores níveis de força normal (0,15 N; 0,29 N; 0,44 N e 0,59 N) e quantidade de indentações (500, 1.000, 1.500 e 2.000). Algumas superfícies resultantes desses ensaios de simulação estão apresentadas na Figura 9 e 10.

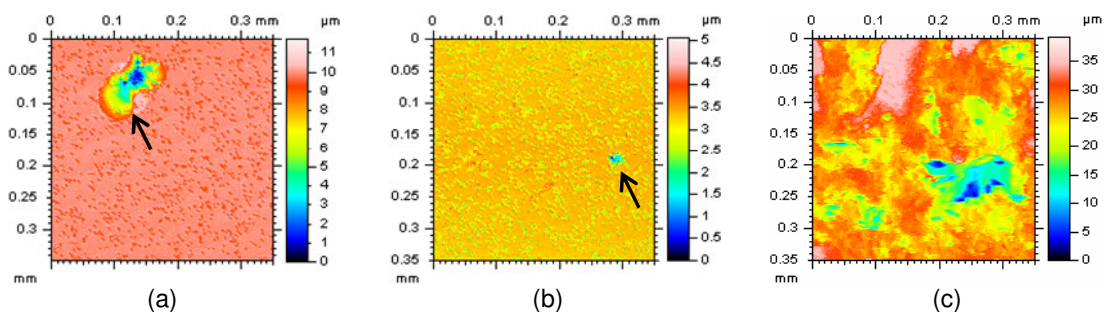


Figura 9 – Topografias do mapeamento no vidro sodo-cálcico. a- 1.500 indentações, 0,29 N; b- 2.000 indentações, 0,29 N; c- 1.500 indentações, 0,59 N. IL.

Os estilhaçamentos apontados nas Figuras 9 e 10 mostram que, independentemente do valor da força normal, a proximidade das indentações pode induzir ao comportamento frágil do vidro, onde a propagação de trincas leva a remoção localizada de material. As imagens da Figura 10 foram obtidas dias depois das topografias apresentadas na Figura 9. Esse tempo permitiu o coalescimento e propagação de trincas e aumentou o nível de estilhaçamento da superfície obtida na simulação, observadas nas Figuras 9-a e 10-a.

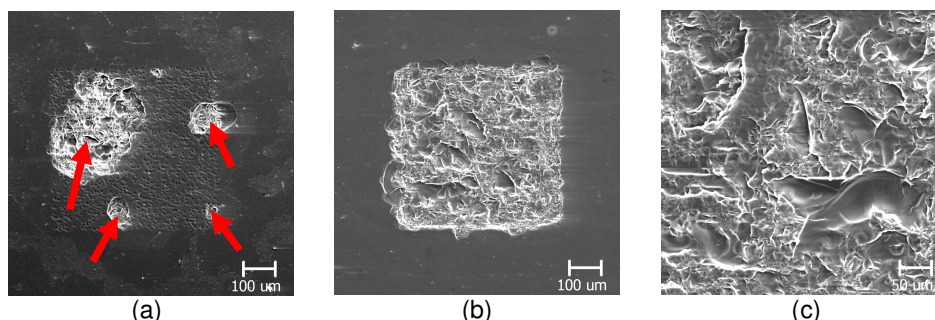


Figure 10. MEV dos testes de simulação com indentações aleatoriamente posicionadas no vidro sodo-cálcico: a- 1.500 indentações, 0,29 N; b- 2.000 indentações, 0,59 N; c- 1.500 indentações, 0,59 N.

O aumento da força normal e da quantidade de indentações levou ao predomínio do comportamento frágil na simulação. O resultado do volume desgastado medido nesse mapeamento está apresentado na Figura 11.

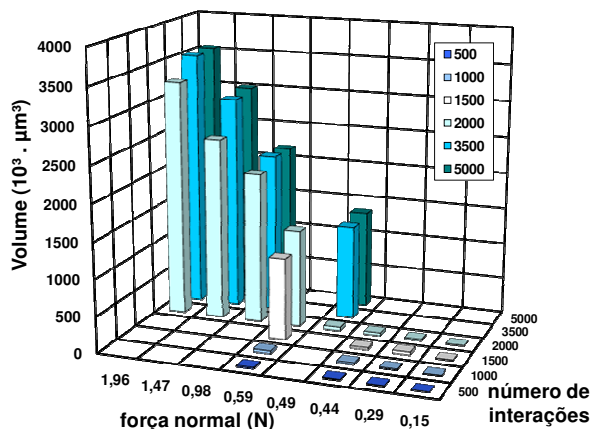


Figura 11 – Volume desgastado na simulação em amostras de vidro sodo-cálcico.

O gráfico da Figura 11 mostra claramente a diferença de comportamento na simulação do vidro quando há o predomínio do regime frágil ou o predomínio do regime dúctil. O comportamento frágil do vidro leva a um maior nível de remoção de matéria. Na transição de comportamento dúctil-frágil o volume desgastado apresenta uma grande variação, de até 2.700% no valor do volume removido. Na região de comportamento frágil observa-se que a força normal exerce grande influência nos valores de volume. O aumento da força normal leva ao aumento do valor do volume desgastado, esse aumento foi de até 173,4%. O volume desgastado apresenta um aumento de até 20,1% em relação ao parâmetro quantidade de indentações.

3.3 Aço 1010

No mapeamento dos parâmetros de simulação da amostra de aço 1010, adotou-se um método para determinar a superfície de resposta dos valores de S_q e identificar os parâmetros que determinam um valor de S_q igual ao da referência. A Figura 12 mostra algumas das superfícies obtidas nesse método de simulação e a referência.

A referência foi obtida usando o abrasômetro LTM nas seguintes condições: carga de 11,4 N, abrasivo sílica (SiO_2 - tamanho entre 0,15 a 0,3 mm) e contra-corpo de ferro fundido branco. Esse teste foi interrompido ao entrar no regime permanente de desgaste (uma hora de ensaio).

Observa-se que as superfícies obtidas na simulação são homogêneas, em comparação à referência (Figura 12). Mesmo com valores de S_q próximos, as indentações encontradas na referência são maiores que os obtidos na simulação. Os gráficos da superfície de resposta dos valores de S_q em função dos parâmetros da simulação e a curva de nível para o S_q igual a 2,8 μm estão apresentados na Figura 13.

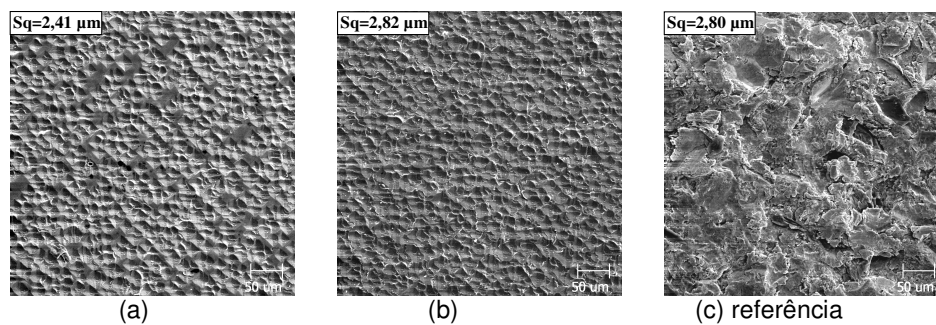


Figura 12 – Morfologia das superfícies obtidas na simulação do Aço 1010 (ABNT). a- 1.500 indentações - 0,29 N; b- 5.000 indentações - 0,34 N e c- referência. MEV.

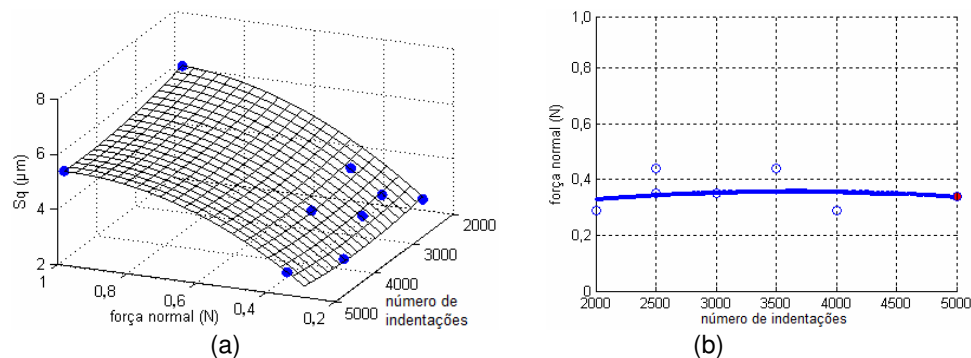


Figura 13 – Mapeamento do aço 1010. a- Superfície de resposta do S_q ; b- Curva para o S_q igual a 2,8 μm .

Detalhando o planejamento de experimentos na região de interesse foi possível, em poucos ensaios, encontrar os valores de força normal e quantidade de indentações que produziram superfícies com valores de S_q próximos ao da referência. A curva de nível no valor de S_q 2,8 μm (Figura 13b), é praticamente independente da variação da quantidade de indentações. Observa-se que são possíveis inúmeros parâmetros de simulação que resultem em uma superfície cujo valor de S_q é próximo ao da referência.

A morfologia da referência mostrada na Figura 12c apresenta indentações de diferentes tamanhos. Essa heterogeneidade está associada à variação do tamanho das partículas atuantes na interface de desgaste. Como foi demonstrado no modelo de Williams e Hincycá⁽³⁾ o tamanho da partícula influencia na força normal que esta imprime sobre as superfícies móveis. Por analogia, observa-se que a morfologia homogênea das superfícies obtidas na simulação (Figura 12a-b) deve-se ao fato de a força normal usada na simulação ser constante.

O processo abrasivo está associado à atuação de partículas de tamanho diferentes. A dimensão destas partículas abrasivas pode ser representada por uma distribuição granulométrica. Dessa forma, a força que as partículas abrasivas exercem sobre a superfície da amostra pode ser descrita por uma distribuição de valores de força. É razoável pensar na simulação controlada por valores de força normal variável. Os diferentes valores de força normal simulam as diferenças de tamanho da partícula na abrasão.

Nessa etapa do trabalho procurou-se associar a variação do valor da força normal do ensaio de simulação a parâmetros da topografia da referência. Por exemplo, calculando o valor do parâmetro de rugosidade R_z em todos os perfis bidimensionais que compõem a topografia da referência do aço 1010, obtêm-se os valores mostrados na Tabela 3.

Tabela 3 - Varredura na topografia da referência. Amostra de aço 1010. "Cut off" 80 μm

	R_z (μm)	Força normal correspondente (N)
Mínimo	5,16	0,66
Média	7,61	1,43
Máximo	13,6	4,53

Considerando que o R_z representa a profundidade das indentações encontrados na superfície da referência, a força normal correspondente é calculada comparando o R_z com a profundidade da indentação produzida na simulação. Essa função de transferência, apresentada na Figura 14a, relaciona a força normal à profundidade da indentação isolada. Assim, têm-se os valores de força normal médio, máximo e mínimo (Tabela 3) que são utilizados como referência no processo de geração dos valores aleatórios para a força de cada indentação na simulação. Foi utilizado um gerador de números aleatórios de padrão normal (gaussiano) para determinar a distribuição dos valores de força normal em torno da média 1,43 N como mostrada na Figura 14b, para 1500 indentações. A Figura 14c mostra a superfície obtida nesse ensaio de simulação.

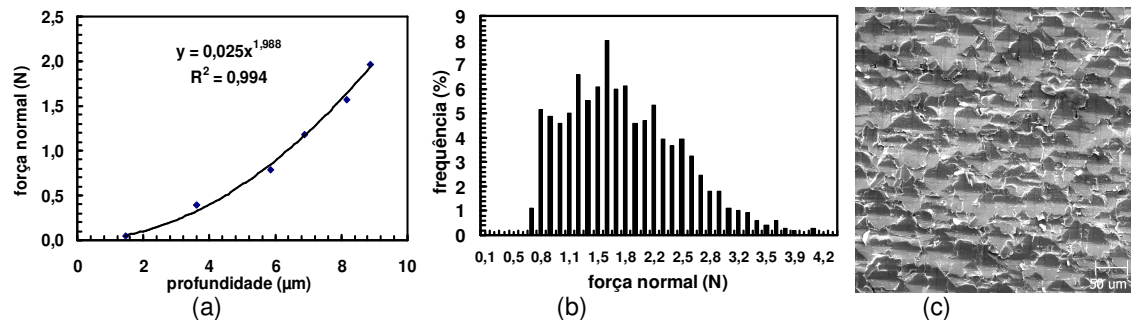


Figura 14 – a- Função de transferência força normal x profundidade; b- Perfil de força utilizando as informações referentes ao Rz e c- Superfície resultante na simulação, $S_q = 5,96 \mu\text{m}$, MEV.

Comparando a superfície obtida nessa simulação, Figura 14c, com a referência, Figura 12c, observa-se que as marcas encontradas na superfície da simulação são menores que as encontradas na realidade. Sugere-se que a deformação resultante da indentação interfere na sua vizinhança de forma que a profundidade média das indentações na área de trabalho não corresponda à profundidade de uma indentação isolada. Assim, para entender o processo da simulação é necessário entender como as deformações são superpostas entre as várias interações.

4 CONCLUSÕES

A metodologia proposta para a simulação do desgaste abrasivo via interações múltiplas é viável, uma vez que foi medido o desgaste na simulação. O rolamento das partículas atuantes no desgaste foi representado por indentações aleatoriamente espalhadas. Os resultados obtidos mostraram que:

1. O melhor método de medição do desgaste na simulação é através da variação volumétrica, obtida nas análises de interferometria laser.
2. O mapeamento do aço ferramenta apresentou a correlação entre os parâmetros de controle da simulação e o S_q da superfície resultante. O parâmetro força normal influencia fortemente nessa resposta.
3. O mapeamento do vidro apresentou claramente a transição do comportamento de abrasão dúctil para abrasão frágil. O volume de material removido evidencia claramente essa transição. A quantidade de indentações tem influência, pois a proximidade das indentações pode levar a fragilização do sistema mesmo em baixo valor de força normal.
4. No mapeamento do aço 1010, foi utilizado um método para ajustar os parâmetros da simulação que reproduzem o mesmo valor de S_q da referência. A comparação visual mostra que a morfologia da superfície da simulação e a referência não são semelhantes.
5. O uso de força normal variável na simulação leva a heterogeneidade na dimensão das indentações produzidas na simulação. O perfil de força pode ser correlacionado com parâmetros de rugosidade da referência. A topografia da superfície produzida na simulação possui marcas de menor dimensão que os da referência.

AGRADECIMENTOS

Aos programas CAPES e CNPq pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS

- 1 RUTHERFORD, K. L.; HUTCHINGS, I. M. A micro-abrasive wear test, with particular application to coated systems, *Surface and Coatings Technology*, v. 79, p. 231-239, 1996.
- 2 TREZONA, R. I.; ALLSOPP, D. N.; HUTCHINGS, I. M. Transition between two-body and three-body abrasive wear: influence of test conditions in the microscale abrasive wear test, *Wear*, v. 225-229, p. 205-214, 1999.
- 3 WILLIAMS, J. A.; HYNICICA, A. M. Mechanisms of abrasive wear in lubricated contacts, *Wear*, v. 152, p. 57-74, 1992.
- 4 FANG, L.; KONG, X. L.; SU, J. Y.; ZHOU, Q. D. Movement patterns of abrasive particle in three-body abrasion, *Wear*, v. 162 - 164, p. 782 – 789, 1993.
- 5 PHILLIPS, K.; CRIMES, G. M.; WILSHAW, T. R. On the mechanism of material removal by free abrasive grinding of glass and fused silica, *Wear*, v. 41, p. 327 – 350, 1977.
- 6 BUIJS, M.; KORPEL-VAN HOUTEN, K. Three-body abrasion of brittle materials as studied by lapping, *Wear*, v. 166, p. 237-245, 1993.
- 7 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*, v. 188, p. 102 – 107, 1995.
- 8 ZUM GAHR, K. L. Microstructure and wear of materials, *Tribology Series*, v. 10, ELSEVIER SCIENCE PUBLISHERS B. V., Amsterdam, ISBN 0444427546, 560 p, 1987.
- 9 BOZZI, A. C.; DE MELLO, J. D. B. Wear resistance and wear mechanisms of wc-12%co thermal sprayed coatings in three-body abrasion, *Wear*, v. 233 - 235, p. 575 – 587, 1999.
- 10 MISRA, A.; FINNIE, I. On the size effect in abrasive and erosive wear, *Wear*, v. 65, p. 359-373, 1981.
- 11 COSTA, H. L.; DE MELLO, J. D. B. Desenvolvimento de um novo abrasômetro a três corpos, In. XVI CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA MECÂNICA – COBEM, 2001, *Tribologia*, v. 3, anais do XVI COBEM, p. 235 – 244.