

# SIMULAÇÃO DO DESGASTE ABRASIVO USANDO DESLIZAMENTOS PARALELOS<sup>1</sup>

Washington Martins da Silva Junior<sup>2</sup>  
Jose Daniel Biasoli de Mello<sup>3</sup>

## Resumo

O desgaste abrasivo pode ser classificado em função do movimento das partículas atuantes na interface de desgaste: rolamento e deslizamento das partículas abrasivas entre as superfícies móveis. O predomínio de uma dessas dinâmicas é função dos parâmetros tribológicos. No presente trabalho uma metodologia recentemente desenvolvida foi utilizada para simular o deslizamento paralelo dos abrasivos usando seqüências de riscos/sulcos. O equipamento especialmente desenvolvido e utilizado nesta simulação reproduz a ação de uma partícula abrasiva. De acordo com o tipo de mecanismo, e os parâmetros topográficos encontrados na referência, define-se a configuração do ensaio de simulação. A superfície abrasonada obtida em um teste de desgaste tipo roda de borracha é usado como referência para a simulação. A superfície obtida no ensaio roda de borracha mostrou o predomínio de riscos/sulcos paralelos causados pelo deslizamento das partículas abrasivas atuantes. Os resultados mostraram que a análise da superposição dos deslizamentos é a base que permite correlacionar os parâmetros topográficos da referência com as variáveis de controle da simulação. Foi desenvolvido um método para avaliar a profundidade média dos riscos/sulcos em função da distância entre eles (superposição). Desgaste ocorre para superposição maior que 80%. A metodologia da simulação produz uma superfície topograficamente e morfologicamente similar à referência.

**Palavras-chave:** Desgaste abrasivo; Simulação; Interações múltiplas; Riscos/sulcos.

## USING PARALLEL SCRATCHES TO SIMULATE ABRASIVE WEAR

### Abstract

Abrasive wear is currently classified according to different particle dynamics: a) the sliding of active particles on the sample surface and b) the rolling of abrasive particles between the surfaces. In this paper, instrumented laboratory tests are used to present a new methodology for the simulation of abrasive wear. The rolling of the abrasives is represented by a sequence of indentations, and the sliding of the active particle by a sequence of scratches. A new equipment was especially developed to reproduce the action of an abrasive particle. A worn surface produced in a rubber wheel abrasive wear test was used as the reference for the simulation. Its topography was assessed by using laser interferometry and SEM and showed that the prevailing wear mechanism was parallel scratches. The results showed that the superimposition of scratches is the basis which makes it possible to correlate topographical parameters of the reference to the controlling variables used in the simulation. A special method to describe the average depth of the scratches in function of the distance between them (superimposition) was developed. Wear occurs when superimposition is greater than 80%. This simulation methodology produced a surface topographically and morphologically similar to that of the reference.

**Key words:** Abrasive wear; Simulation; Multiple interactions; Scratching.

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

<sup>2</sup> *Centro Tecnológico, Departamento de Engenharia Mecânica, UFES.*

<sup>3</sup> *Laboratório de Tribologia e Materiais, Departamento de Engenharia Mecânica, UFU.*

## 1 INTRODUÇÃO

O estudo das interações entre partículas duras e superfície é complexo devido ao tamanho e forma irregulares das partículas e da topografia das superfícies. O mecanismo de desgaste está associado ao movimento das partículas abrasivas na interface de desgaste, e depende das características tribológicas do sistema.<sup>(1-3)</sup> Em contraste com o caráter sistêmico do desgaste abrasivo, o desgaste abrasivo pode ser classificado de acordo com a dinâmica que a partícula atuante apresenta na interface:<sup>(1,2)</sup> a- deslizamento das partículas abrasivas na interface de desgaste levando aos mecanismos de microcorte e/ou microsulcamento e/ou microfratura; b- o rolamento dos abrasivos entre as superfícies levando a indentação múltipla. No caso de materiais frágeis cada indentação pode levar à remoção de material.<sup>(4)</sup>

Kitsunai et al.<sup>(5)</sup> estudaram o deslizamento controlado de uma única partícula abrasiva, e detalharam em um mapa de mecanismos de desgaste. O aumento da força normal do deslizamento induz a transição do microsulcamento para a formação de cunha. Aumentando a força normal ocorre a formação de língua (“*shear tongue*”) de material deformado nas bordas do sulco e. Em níveis mais elevados de força normal ocorre o microcorte.

Testes esclerométricos usam uma única partícula para simular o desgaste abrasivo, permitindo o controle da movimentação da partícula. O presente trabalho propõe a utilização de testes bem controlados de esclerometria para simular como a interação partícula-superfície leva ao desgaste abrasivo. Esse novo método reproduz a ação de uma partícula abrasiva sobre uma superfície através de uma seqüência de interações controladas. A análise topográfica de uma superfície desgastada fornece as informações essenciais para a execução de cada interação, permitindo a reprodução do mecanismo de desgaste observado. Essa superfície de referência pode ser obtida tanto de um teste laboratorial quanto de uma situação prática onde ocorre o desgaste. Quando uma análise laboratorial de desgaste é seguida por um teste de simulação utilizando a metodologia proposta, um modelo matemático que descreve o desgaste abrasivo pode ser formulado. Por outro lado, quando a análise de uma aplicação prática real é seguida por testes de simulação, é possível a seleção de materiais para substituir a peça desgastada nessa situação particular.

Williams e Xie<sup>(6)</sup> e Williams<sup>(7)</sup> estudaram a ocorrência de desgaste resultante da interação entre deslizamentos paralelos. Segundo estes autores, a diminuição do ângulo de ataque da partícula em sulcamentos isolados leva a transição do microsulcamento para o microcorte. Reduzindo a distância entre deslizamentos houve a mudança do mecanismo de desgaste, atribuída à interação da vizinhança dos deslizamentos.

Mezlini et al.<sup>(8)</sup> usaram interações entre deslizamentos para detecta transições de mecanismos de desgaste para ligas de alumínio. Nestes experimentos, estes autores produziram dois deslizamentos paralelos com distância definida entre eles, e então um terceiro deslizamento paralelo é realizado na posição média dos deslizamentos anteriores. Eles encontraram que o mecanismo de desgaste mudou de microsulcamento e formação de cunha no deslizamento isolado para microcorte quando deslizamentos interagem.

No presente artigo, testes laboratoriais instrumentados e muito bem controlados são usados para apresentar uma nova metodologia de simulação do desgaste abrasivo, com a aplicação particular a deslizamentos paralelos. Foi

desenvolvido um novo equipamento instrumentado capaz de reproduzir a atuação de uma partícula abrasiva. Neste trabalho, uma superfície abrasonada, produzida em um teste de desgaste tipo roda de borracha<sup>(9)</sup> foi utilizada como referência para a simulação. A topografia da referência foi acessada usando interferometria laser e microscopia eletrônica de varredura, evidenciando a ocorrência de deslizamentos paralelos decorrentes do deslizamento direcional das partículas. Para simular essa dinâmica foi adotada a configuração deslizamento paralelo na simulação. Informações relativas à superposição de deslizamentos paralelos foram utilizadas como base para a interpretação da topografia nos testes de simulação. Parâmetros topográficos médios medidos na superfície da referência foram correlacionados às variáveis de controle da simulação.

## 2 METODOLOGIA

A superfície de referência foi produzida em um teste de desgaste abrasivo do tipo roda de borracha,<sup>(9)</sup> mostrado na Figura 1.

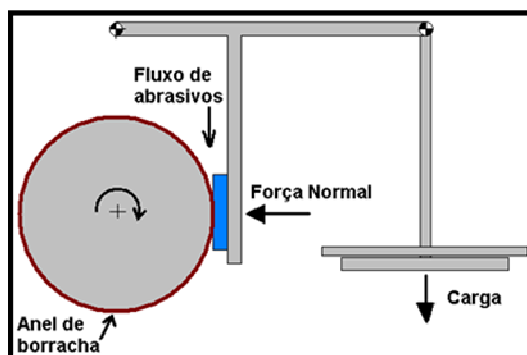


Figura 1. Esquema do teste de desgaste abrasivo roda de borracha.

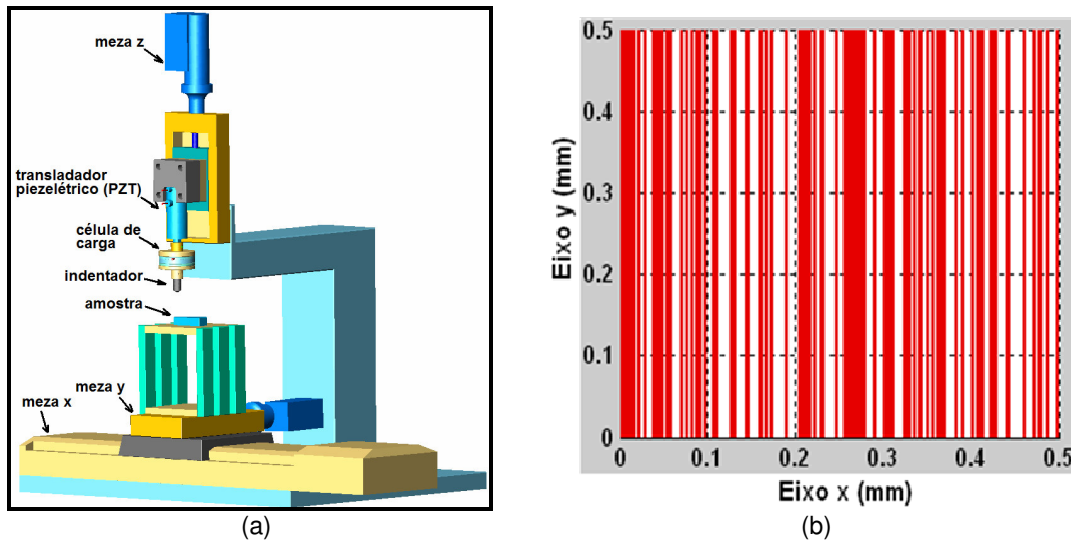
A força normal de 18,75 N foi aplicada através de um sistema de alavanca. O teste é alimentado por um fluxo contínuo de abrasivo ( $\text{SiO}_2$  – tamanho: 0,3 mm – 0,6 mm). O contra-corpo foi um disco metálico coberto com um anel de borracha (estireno-butadieno, com dureza 60 Shore A). A rotação do contra-corpo foi de 100 rpm, e a duração de cada teste foi de 30 minutos.

As amostras são de aço ferramenta tipo M2 com dureza de 6.800 MPa, retificadas nas dimensão 60 x 25 x 12 mm.

A topografia da referência produzida no ensaio roda de borracha foi acessada utilizando interferometria laser (IL – UBM Microfocus Expert IV) usando uma resolução lateral de 1000 pontos por mm. O mecanismo de desgaste foi observado via microscopia eletrônica de varredura (MEV – Leo 940 A - Zeiss).

O micro-simulador, desenvolvido para reproduzir a ação de uma partícula abrasiva, está apresentado na Figura 2a.

Um sistema de mesas coordenadas de alta resolução (0,1  $\mu\text{m}$ ) que movimenta a amostra no plano horizontal e o indentador no eixo vertical. Adicionalmente, o movimento do indentador é controlado por um atuador piezelétrico de alta resolução (5 nm). Uma célula de carga tridimensional é utilizada para controlar a intensidade da força normal da interação e para medir as forças e momentos nas direções x, y e z. A resolução da célula de carga é de 0,001 N e a carga máxima permitida é de 18 N. Foi desenvolvida uma interface de comunicação e controle desse equipamento utilizando a plataforma Labview®.



**Figura 2.** a- Esquema do micro-simulador; b- Configuração de posicionamento dos deslizamento paralelos sobre a amostra.

Antes do ensaio de simulação, a superfície destinada a simulação passou por um processo de lixamento e polimento até a pasta de diamante 3  $\mu\text{m}$ .

A simulação consiste de uma seqüência de interações executadas sobre a superfície de uma amostra usando um indentedor Vickers. São possíveis cinco configurações de posicionamento das interações. A Figura 2b mostra o esquema da configuração deslizamento paralelo, onde somente a coordenada x é aleatoriamente escolhida. Essa configuração representa o deslizamento das partículas abrasivas com forte direcionalidade.

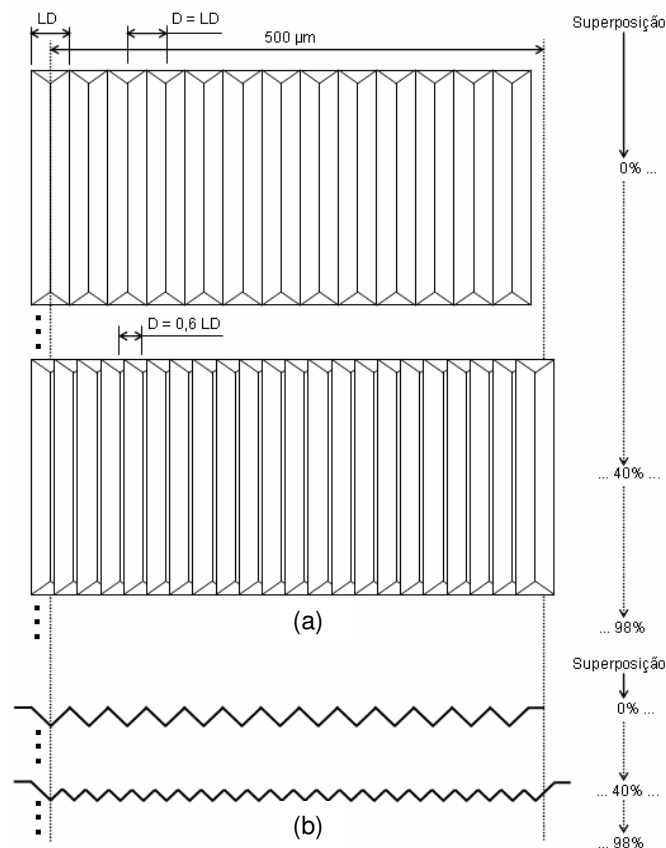
O teste de desgaste abrasivo roda de borracha produz uma superfície com a presença de riscos/sulcos paralelos, mostrando que o deslizamento paralelo é a dinâmica predominante das partículas abrasivas na interface de desgaste nesse tipo de ensaio. Assim, a configuração mostrada na Figura 2b foi escolhida para os testes de simulação. O parâmetro rugosidade quadrática média da superfície ( $S_q$ ) foi escolhido para quantificar a profundidade média dos riscos/sulcos encontrados na referência.

Para definir a profundidade efetiva dos riscos/sulcos durante a simulação, é necessário encontrar a relação entre a profundidade da interação e a força. Assim, foram realizados deslizamentos isolados em dez cargas diferentes. A profundidade de cada deslizamento isolado foi medida usando interferometria laser.

Inicialmente a posição dos deslizamentos paralelos em relação ao eixo x foi aleatoriamente definida (Figura 2b). Foi desenvolvido um algoritmo especial para definir a quantidade de deslizamentos necessária para cobrir a área de simulação. Entretanto, essa configuração de teste resultou que a simulação reproduz a rugosidade da superfície de referência, mas não reproduz a morfologia. Então, outro parâmetro foi escolhido para representar a superfície de referência, o parâmetro híbrido bidimensional  $\lambda_q$ , que representa a raiz quadrática média do comprimento de onda do perfil <sup>(10)</sup>. Para um perfil medido na direção perpendicular ao deslizamento das partículas, o comprimento de onda médio pode ser comparado à largura dos deslizamentos isolados. Portanto, usando testes de deslizamento isolado, foi encontrada a relação entre força normal e largura do deslizamento. Considerando os valores de força normal máxima, mínima e média em um algoritmo gerador de

números aleatórios, um conjunto de valores aleatórios foi gerado e adotado para controlar a força normal das interações durante o processo de simulação.

Novamente, os resultados obtidos no processo de simulação não se mostraram satisfatórios em termos de reprodução da morfologia da superfície de referência. Nota-se que a superfície da referência apresenta efeitos de interação entre os deslizamentos. Assim, testes de simulação foram adaptados com o objetivo de avaliar a interação e a superposição dos deslizamentos paralelos. A razão entre a distância entre deslizamentos e a largura do deslizamento isolado define o valor de superposição. A largura do deslizamento isolado (LD) foi medida usando microscopia óptica. O grau de superposição destes testes foi obtido controlando a distância entre deslizamentos (D). A Figura 3 mostra um esquema do posicionamento dos ensaios de superposição dos deslizamentos paralelos e a Tabela 1 apresenta a quantidade de interações por área de cada nível de superposição estudada.

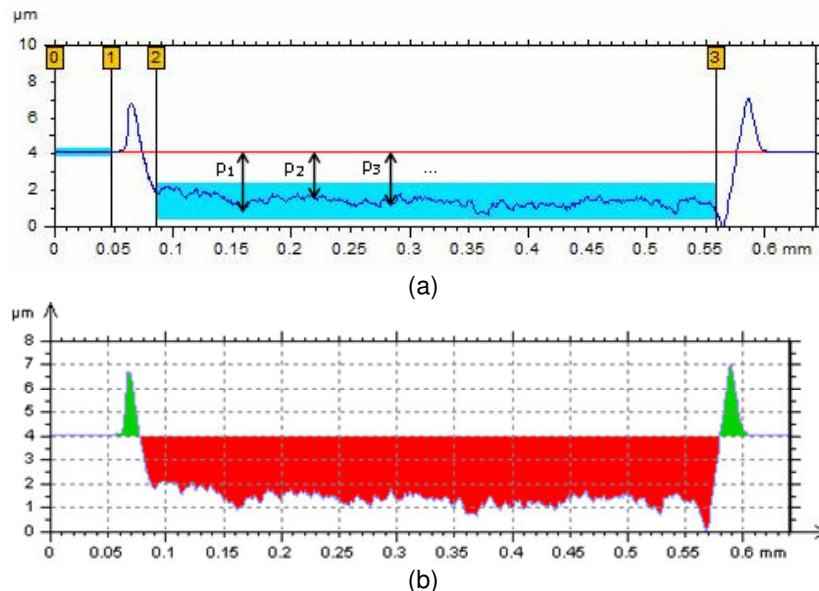


**Figura 3.** Representação esquemática da seqüência de riscos/sulcos; a- Vista superior; b- Perfil médio.

No teste de simulação com superposição definida, o perfil médio foi considerado representativo da profundidade média dos riscos/sulcos que compõem a superfície de referência. As bordas do perfil médio foram utilizadas como base de cálculo, representando a superfície não deformada da amostra. A Figura 4a mostra a metodologia usada para medir a profundidade média ( $p_1$ ,  $p_2$ ...) dos deslizamentos superpostos, e a Figura 4b mostra as áreas deformadas acima e abaixo da superfície da amostra.

**Tabela 1.** Condições dos testes de superposição: Quantidade (N) e distância entre deslizamentos paralelos (D).

Força Normal (N)		Grau de superposição								
		0%	20%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	98%
0,5	N							206	413	2063
	D (μm)							2,42	1,21	0,24
5,9	N	13	16	22	26	33	44	65	131	654
	D (μm)	38,2	30,6	22,9	19,1	15,3	11,5	7,6	3,8	0,76
11,8	N							47	95	475
	D (μm)							10,5	5,3	1,05



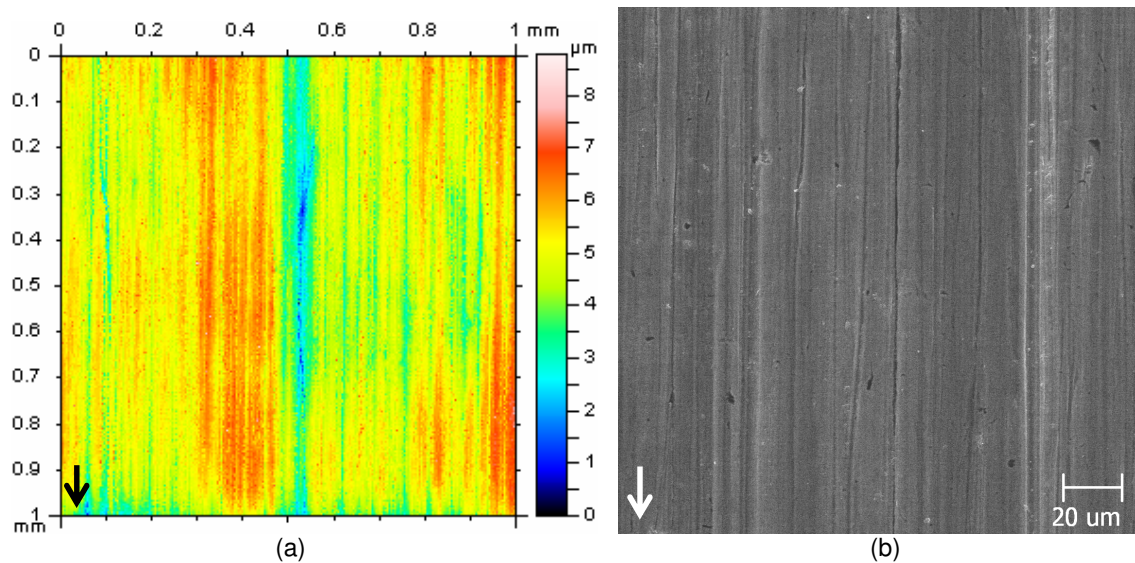
**Figura 4.** a- Representação do método de cálculo da profundidade média quando ocorre superposição. b- Áreas deformadas acima e abaixo da superfície da amostra.

Para uma nova abordagem, foi obtido o perfil médio da superfície de referência. Este perfil foi dividido em 1.001 pontos eqüidistantes. A posição destes pontos em relação ao eixo x foi assumida como posição fixa para os riscos/sulcos no processo de simulação, e a respectiva magnitude de cada posição foi assumida como a profundidade média dos riscos/sulcos. Na seqüência, usando a relação entre força normal e profundidade média encontrada no estudo de superposição dos riscos/sulcos, os respectivos valores de força normal foram calculados.

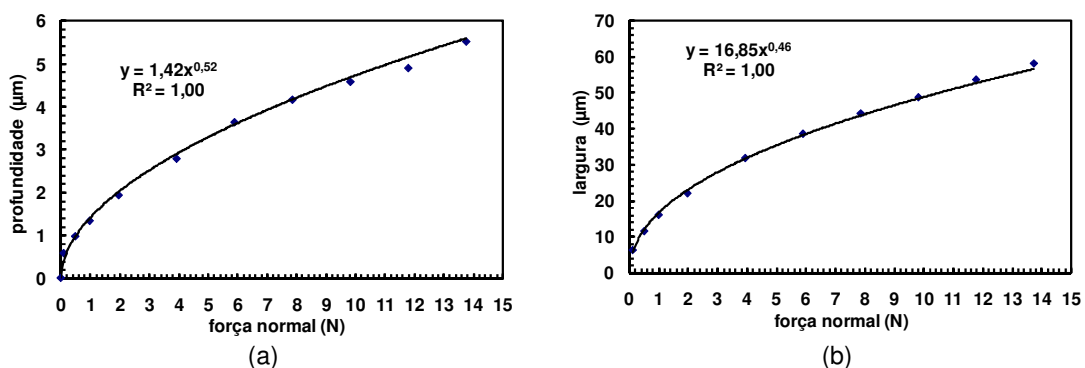
### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A referência obtida no teste roda de borracha está apresentada na Figura 5, onde o deslizamento das partículas abrasivas levou a formação de riscos/sulcos paralelos distribuídos sobre a superfície desgastada. O valor de  $S_q = 0,83 \mu\text{m}$  foi obtido usando IL (Figura 5<sup>a</sup>).

O gráfico da Figura 6a apresenta os resultados de profundidade medidos na seção transversal, obtido via IL, de dez deslizamentos isolados, que permitiram o caçulo da relação entre força normal e profundidade do deslizamento. Usando a função de transferência mostrada nesse gráfico, a profundidade média dos riscos/sulcos encontrados na referência ( $S_q = 0,83 \mu\text{m}$ ) podem ser obtidos através da força normal 0,36 N.

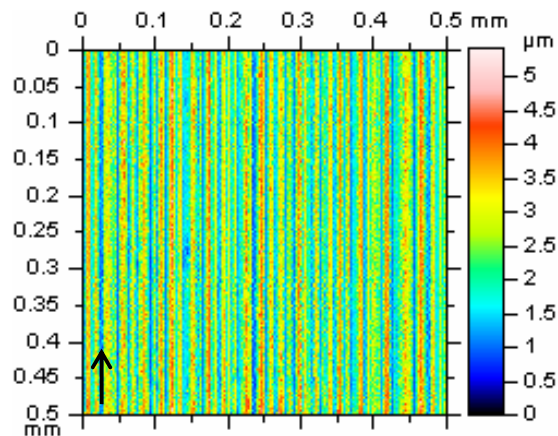


**Figura 5.** Superfície de referência obtida do ensaio roda de borracha. a- LI; b- MEV.



**Figura 6.** Influência da força normal em deslizamentos isolados: a- profundidade e b- largura.

A Figura 7 mostra uma superfície produzida na simulação usando força normal constante de 0,36 N.



**Figura 7.** Simulação usando deslizamento paralelo a força normal constante de 0,36 N, IL.

O parâmetro Sq calculado nessa superfície foi 0,87  $\mu\text{m}$ , valor próximo ao encontrado na superfície de referência (0,8  $\mu\text{m}$ , Figura 5a). Entretanto a morfologia

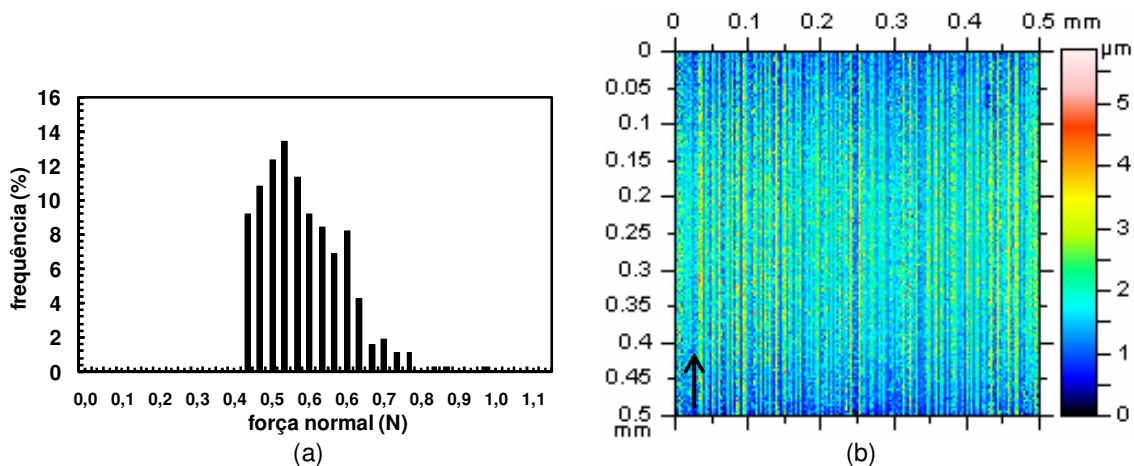
dessa superfície é diferente da encontrada na superfície. Isto mostra que na simulação onde a profundidade dos deslizamentos obtida por força normal fixa, definida pelo parâmetro  $S_q$  da referência, a rugosidade da superfície obtida é reproduzida, mas não sua morfologia.

Dois aspectos diferentes da superfície produzida na simulação chamam atenção para a análise: i- O uso de força normal constante gera deslizamentos com aproximadamente o mesmo tamanho, o que difere do observado na topografia da referência, onde a superfície desgastada foi gerada por abrasivos com tamanhos diferentes – diferente força por partícula. Claramente, os riscos/sulcos observados na referência foram causados por interações com diferentes intensidades para cada partícula abrasiva. No processo de simulação, a intensidade da interação foi controlada através da força normal. Portanto, para reproduzir a variação do tamanho dos riscos/sulcos observados na superfície de referência, a intensidade dos deslizamentos na simulação deve ser variável. ii- O parâmetro rugosidade média da superfície desgastada ( $S_q$ ) representa uma variação média da altura das irregularidades,<sup>(11)</sup> mas não fornece informações sobre os aspectos morfológicos. Este fato sugere que a superfície da referência pode ser melhor representada por um parâmetro que contemple a distribuição lateral das irregularidades da superfície, como o parâmetro híbrido bidimensional  $\lambda_q$ , que representa o comprimento de onda quadrático médio do perfil.<sup>(10)</sup> Considerando que o  $\lambda_q$  está associado com a largura dos riscos/sulcos, foi encontrada uma relação entre força normal e largura do deslizamento, como mostrada na Figura 6b.

Para usar força normal variável durante os experimentos, foi calculado o valor máximo, mínimo e médio do  $\lambda_q$  de todos os perfis que compõem a superfície de referência, como mostrado na Tabela 2. Estes valores foram utilizados em um gerador de números aleatórios para calcular a distribuição de força normal utilizada no teste, como mostrada na Figura 8a.

**Tabela 2.** Força normal equivalente em função do comprimento de onda quadrático médio.

	$\lambda_q$ ( $\mu\text{m}$ )	Força normal equivalente (N)
<b>Mínimo</b>	10,8	0,38
<b>Médio</b>	11,7	0,46
<b>Máximo</b>	17,5	1,08



**Figura 8.** a- Distribuição de força normal definida por valores de  $\lambda_q$ ; b- Resultado da simulação usando a distribuição de força normal, IL.



A Figura 8b mostra a superfície obtida no ensaio de simulação que usou a distribuição de carga apresentada na Figura 8a, que se apresenta morfologicamente diferente da referência. Os valores de  $\lambda_q$  da superfície obtida na simulação e da referência são diferentes: 11,7  $\mu\text{m}$  e 7,5  $\mu\text{m}$ , respectivamente. Isso indica que o uso da força normal definida pelo  $\lambda_q$  como variável de controle não é suficiente para definir a morfologia da superfície. De fato, é possível que a interação entre deslizamentos afete a topografia resultante. Portanto, foi introduzido o conceito de superposição dos deslizamentos isolados.

A Figura 9 mostra o valor das áreas deformadas acima e abaixo da superfície da amostra em função do nível de superposição dos deslizamentos. Os valores de área acima e abaixo são bastante próximos até o nível de superposição 80%. Nessa região, provavelmente o material deformado nos deslizamentos foi transferido para a lateral das marcas das interações. Para níveis de superposição maior que 80%, a área abaixo da superfície da amostra aumentou rapidamente, sugerindo que o material foi removido devido à intensa deformação plástica. A ocorrência de remoção de material é confirmada pela presença de fragmentos de desgaste como mostrado na Figura 10.

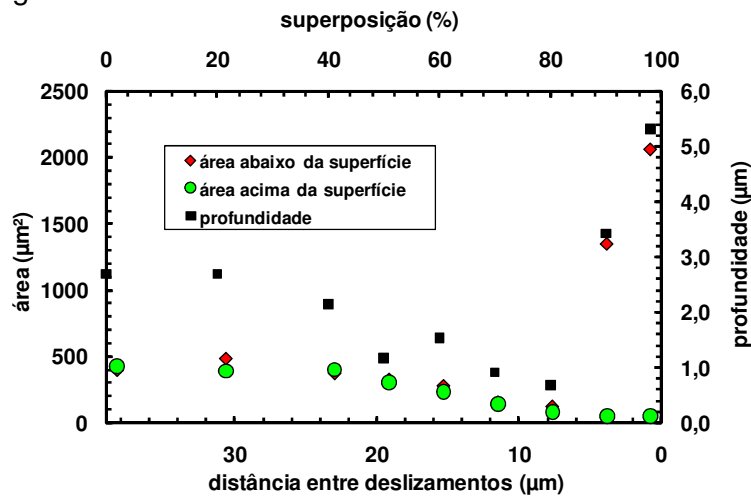


Figura 9. Superposição de deslizamentos paralelos. Força normal 5,9 N.

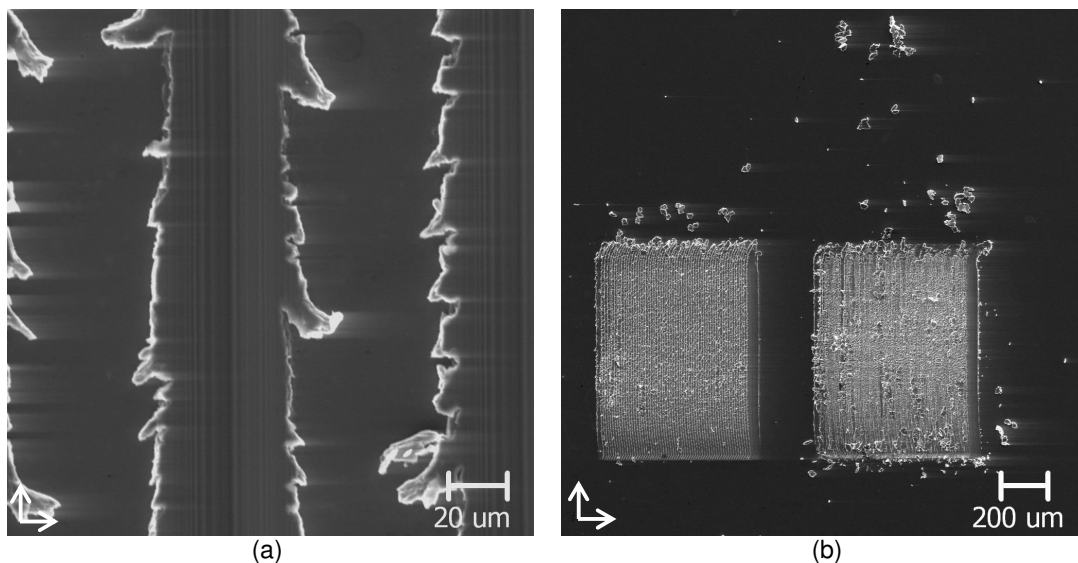


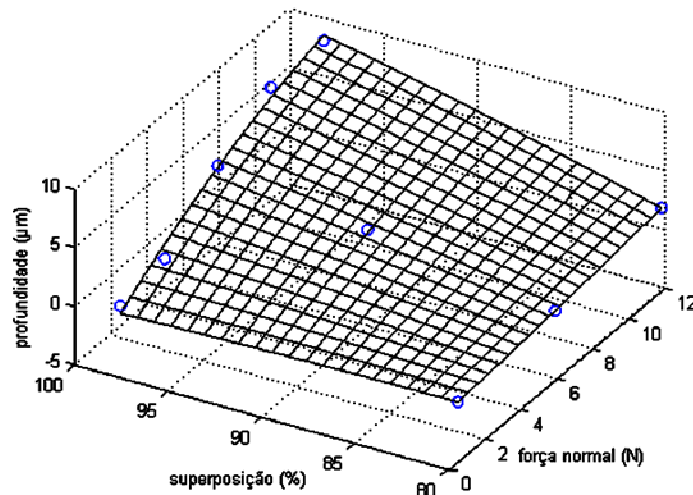
Figura 10. a- Morfologia da superfície obtida na simulação com superposição -100% e força normal 5,9 N; b- Fragmentos formados em torno da área de teste nível de superposição 85% e 95%.

Outros autores<sup>(6-8)</sup> encontraram que a proximidade dos deslizamentos paralelos promoveu a transição de microsulcamento para microcorte. Esse fato é atribuído às interações do material deformado por deslizamentos vizinhos. A Figura 10a mostra a que a mistura de microsulcamento e microcorte ocorre em um baixo nível de superposição. Com o aumento da superposição, Figura 10b, as interações entre deslizamentos são intensificadas, levando a um novo tipo de mecanismo de desgaste caracterizado pelo destacamento lateral do material deformado pelo deslizamento anterior. A figura 9 indica que acima de 80% de superposição a interação entre material deformado é suficientemente intensa para causar desgaste. Assim, o efeito de superposição dos deslizamentos se mostra relevante para a simulação do desgaste abrasivo.

A Figura 11 e a Equação 1 mostram a relação entre a profundidade média dos deslizamento superpostos e a força normal (FN) para simulações usando um nível de superposição (S) maior que 80%.

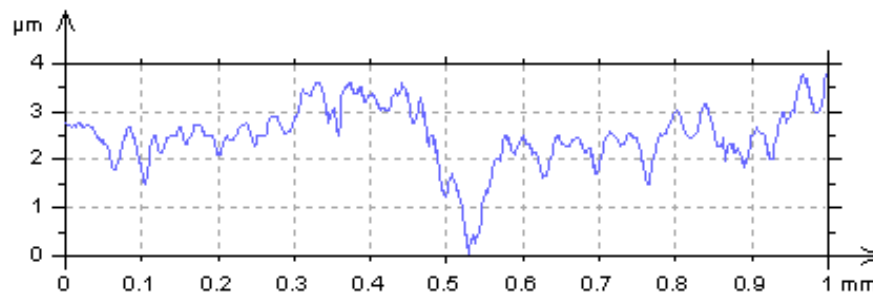
$$profundida\ de = -4,48 - 4,83 FN + 0,151 S + 0,062 S.FN + 0,082 FN^2 - 1,2 \cdot 10^{-3} S^2 - 1,2 \cdot 10^{-5} FN^2 \cdot S^2 \quad (1)$$

$$R^2 = 0.964$$



**Figura 11.** Relação entre força normal, grau de superposição e profundidade média dos deslizamentos encontrada nos ensaios com superposição fixa.

A Figura 12 mostra o perfil médio da superfície de referência (Figura 5), calculada na direção perpendicular aos riscos/sulcos. Usando os valores de profundidade média dos deslizamentos na Equação 1, os respectivos valores de força normal foram calculados para níveis de superposição maiores que 80%. Conhecendo a posição e a força normal dos deslizamentos um perfil de força normal foi calculado, como mostrado na Figura 13.



**Figura 12.** Perfil médio da superfície de referência.

A superfície resultante da simulação que usa o mapa apresentado na Figura 13 esta apresentada na Figura 14. Em comparação com a superfície da referência, Figura 5, ambas as superfícies são morfologicamente semelhantes e apresentam o mesmo mecanismo de desgaste.

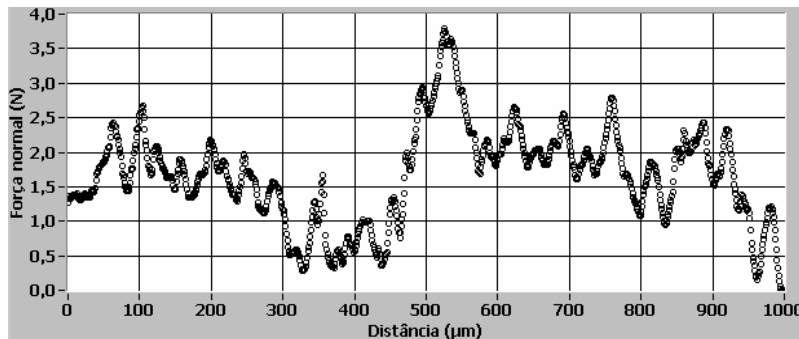


Figura 13. Mapa de força normal para 1.001 deslizamentos eqüidistantes ao longo do eixo x.

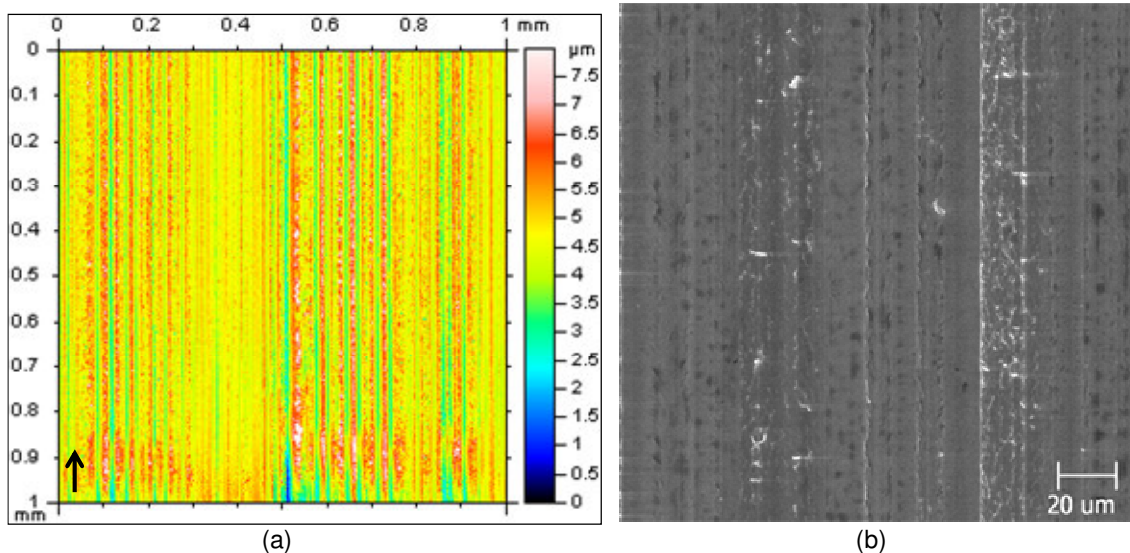


Figura 14. Superfície obtida na simulação usando o mapa de força normal; a- IL b- MEV.

A Tabela 3 apresenta a comparação entre os parâmetros topográficos  $S_q$  e  $\lambda_q$  calculados para a superfície de referência e superfície de simulação usando o mapa de força normal. Estes valores são similares para a referência e superfície obtida na simulação, em particular o  $S_q$ .

Tabela 3. Parâmetros topográficos para a referência e superfície da simulação.

	$S_q$ ( $\mu\text{m}$ )	$\lambda_q$ ( $\mu\text{m}$ )
Referência	0,80	11,7
Simulação	0,83	10,9

A comparação morfológica e topográfica valida o método de simulação para o deslizamento das partículas abrasivas. Os presentes autores consideram que essa nova metodologia é capaz de reproduzir o desgaste abrasivo além de permitir o armazenamento da posição de cada interação e das forças atuantes associadas. Estas informações abrem uma grande possibilidade para a simulação computacional do desgaste abrasivo.

## 4 CONCLUSÃO

A simulação do desgaste abrasivo foi realizada usando testes bem controlados, onde o deslizamento das partículas atuantes no sistema de desgaste foi representado por deslizamentos paralelos. Os resultados obtidos mostraram que:

1. para simulações usando tanto carga constante quanto carga variável, o processo de simulação usando deslizamentos paralelos aleatoriamente posicionados ao longo do eixo x produziu uma superfície morfologicamente dissimilar a referência;
2. a superposição intensifica drasticamente a formação de fragmentos. Níveis de superposição maiores que 80% causam significativa remoção de material; e
3. usando o mapa de força normal calculado a partir do perfil médio da superfície de referência o processo de simulação produziu uma superfície morfológica e topograficamente similar à superfície de referência.

## Agradecimentos

Aos programas Capes e CNPq pelo apoio financeiro.

## REFERÊNCIAS

- 1 ADACHI, K.; HUTCHINGS, I. M. Wear mode mapping for the micro-scale abrasion test, *Wear*, v. 255, p. 23-29, 2003.
- 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 DA SILVA, W. M.; BINDER, R.; DE MELLO, J. D. B. Abrasive wear of steam treated sintered iron, *Wear*, v. 258, p. 166-177, 2005.
- 4 BUIJS, M.; KORPEL-VAN HOUTEN, K. Three-body abrasion of brittle materials as studied by lapping, *Wear*, v. 166, p. 237-245, 1993.
- 5 KITSUNAI, H.; KATO, K.; HOKKIRIGAWA, K.; INOUE, H. The transitions between microscopic wear modes during repeated sliding friction observed by a scanning electron-microscope tribosystem, *Wear*, v. 135(2), p. 237-249, 1990.
- 6 WILLIAMS, J. A.; XIE, Y. The generation of wear surfaces by the interaction of parallel grooves, *Wear*, v. 155(2), p. 363-379, 1992.
- 7 WILLIAMS, J. A. Wear modelling: analytical, computational and mapping: a continuum mechanics approach, *Wear*, v. 225-229, p. 1-17, 1999.
- 8 MEZLINI, S.; KAPSA, Ph.; HENON, C.; GUILLEMENET, J. Abrasion of aluminium alloy: effect of subsurface hardness and scratch interaction simulation, *Wear*, v. 257(9-10), p. 892-900, 2004.
- 9 ASTM G 65, Standard test method form measuring abrasion using the dry sand/rubber wheel apparatus, Annual Book of ASTM Standards 03.02, ASTM, Philadelphia, PA, pp. 247-259, 1991.
- 10 ISO 4287, Surface texture: profile method – terms, definitions and surface texture parameters, international standard ISO 4287, first edition, published in april 1th of 1997.
- 11 STOUT, K.J.; BLUNT, L.; DONG, W.P.; MAINSAH, E.; LUO, N.; MATHIA, T.; SULLIVAN, P.J.; ZAHOUANI, H. Development of methods for the characterisation of roughness in three dimensions, BUTTERWORTH-HEINEMANN, ISBN 1857180232, chapter 12, 2000.