

ANÁLISE QUANTITATIVA DO MECANISMO DE DESGASTE PREDOMINANTE EM ENSAIOS DE DESGASTE ABRASIVO

MURILO BORGES BARROS¹ e JOSÉ DANIEL BIASOLI DE MELLO²

RESUMO

Neste trabalho, foi desenvolvida uma metodologia para a caracterização dos mecanismos de desgaste abrasivo obtidos nos ensaios de alguns materiais típicos, através de uma rotina computacional, com o intuito de quantificar e dimensionar os eventos (riscos e indentações) presentes na superfície desgastada. A topografia pôde ser analisada e quantificada através de parâmetros que descrevem a distribuição, a forma e a capacidade de suporte dos picos e vales presentes na superfície produzida pela abrasão.

Palavras Chave: rotina computacional, quantificar e dimensionar os eventos, topografia.

QUANTITATIVE ANALYSIS OF THE PREDOMINANT ABRASIVE WEAR MECHANISM OF ABRASIVE WEAR TEST

ABSTRACT

In this work, a methodology was developed to distinguish the mechanism of abrasive wear obtained in the tests of some typical materials, through a computational proceeding, to quantify and measure the events (scratching and indentation) on the wear surface. Through parameters that describe the distribution, the form and capacity of support of the peaks and valleys present on the surface made by the wear, the topography was analysed and quantified.

Keywords: computational proceeding, quantify and measure the events, topography.

Laboratório de Tribologia e Materiais, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Bloco 1R, 38400-902, Uberlândia MG Brasil. 55 34 3239 4273.

1 – Aluno de iniciação científica, PIBIC/CNPq/UFU, murilimbb@yahoo.com.br.

2 – Orientador, ltm-demello@ufu.br.

INTRODUÇÃO

O objetivo principal das atividades relacionadas a este trabalho é a otimização dos parâmetros operacionais de ensaios de desgaste abrasivo, como carga aplicada e o tipo de abrasivo, em função da rugosidade da superfície desgastada.

Inicialmente é apresentada uma breve revisão sobre as classificações dos mecanismos de desgaste abrasivo e sua influência sobre a topografia da superfície desgastada. A topografia pode ser analisada e quantificada através de parâmetros que descrevem a distribuição, a forma e a capacidade de suporte dos picos e vales presentes na superfície produzida pela abrasão.

Está sendo desenvolvida uma metodologia para a caracterização dos mecanismos de desgaste abrasivo, obtidos nos ensaios, através de uma rotina computacional, com o intuito de quantificar e dimensionar os eventos (riscos e indentações) presentes na superfície desgastada. Este programa, feito em Matlab, usa a superfície obtida em interferometria laser com base para o cálculo das dimensões e quantidades dos eventos.

A otimização do processo abrasivo vem sendo alvo constante de estudos científicos, principalmente no sentido de quantificar a

perda de massa de um sistema tribológico, que utiliza abrasivos para remover material.

Estudos recentes [1-13] quantificam a perda de massa no desgaste abrasivo em função dos mecanismos de desgaste atuantes no processo abrasivo. A predominância de um mecanismo de desgaste está relacionada a características físicas do sistema. A alteração da dinâmica do processo de desgaste abrasivo modifica a movimentação das partículas presentes na interface, que controla o tipo e/ou intensidade dos eventos que caracterizam o desgaste das superfícies móveis.

Apesar do caráter sistêmico do desgaste abrasivo, a literatura atual ressalta 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.

1 – Classificações do Desgaste Abrasivo

Uma das classificações mais utilizadas, divide o desgaste abrasivo em duas categoria principais: o desgaste abrasivo a dois corpos, onde as partículas ou asperidades estão rigidamente fixadas em um corpo, possibilitando assim, riscos mais

profundos no primeiro corpo; e o desgaste abrasivo a três corpos, onde as partículas abrasivas estão livres, o que permite o rolamento destas entre os corpos que, conseqüentemente, permanecem apenas parte do tempo atuando no riscamento da superfície. O presente trabalho terá um maior enfoque no desgaste abrasivo a três corpos, que está representado esquematicamente na figura 1.

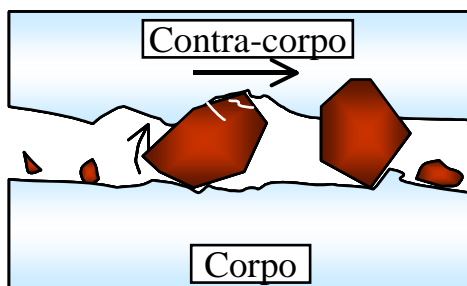


Figura 1 – Representação esquemática do desgaste abrasivo a três corpos.

Dependendo das características do material do contra-corpo utilizado no ensaio a três corpos, como a dureza e a tenacidade, as partículas abrasivas podem engastar na superfície deste, ocasionando apenas riscamento, ou rolares, ocorrendo apenas indentações.

2 – Influência dos Parâmetros Físicos no Mecanismo de Desgaste

O trabalho de Fang e co-autores [2] destaca a importância da forma do abrasivo na determinação do mecanismo de desgaste. Estes autores idealizaram um sistema capaz

de registrar o comportamento de uma única partícula quando inserida entre duas superfícies que possuem movimento relativo. Discute-se sobre os parâmetros que afetam o modelo do movimento de partículas abrasivas com diferentes formas, e propõem um critério para este movimento.

O equipamento utilizado por estes autores permite a observação direta de todo o processo de abrasão em uma vista lateral, onde o movimento da partícula seria arquivado através de sucessivas fotografias [2], como mostra a figura 2.

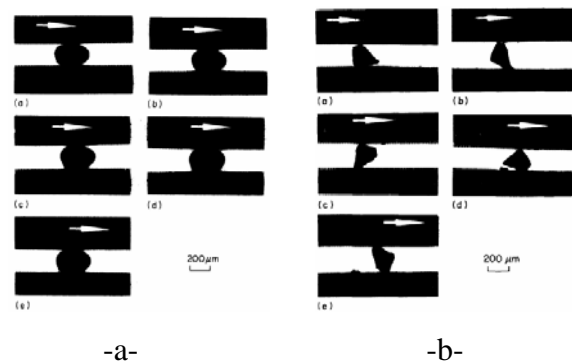


Figura 2 - Fotografias sucessivas mostrando a interferência da forma da partícula sobre o movimento da mesma: a) formato tendendo ao esférico leva ao deslizamento da superfície, b) formato angularo tendendo ao rolamento da partícula [2].

Estes autores concluíram que as partículas com um formato mais próximo ao esférico possuem a tendência de engastar em uma das superfícies e deslizar sobre a outra, enquanto que partículas com um

formato angularo tendem a rolar indentando as superfícies.

Williams e Hyncica [3-4] 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, o ângulo β deve estar entre 45° e 90° e h é a distância de separação das superfícies. As superfícies são planas, lisas, possuem a mesma dureza e são animadas de movimento relativo. A figura 3 representa o modelo proposto por esses autores.

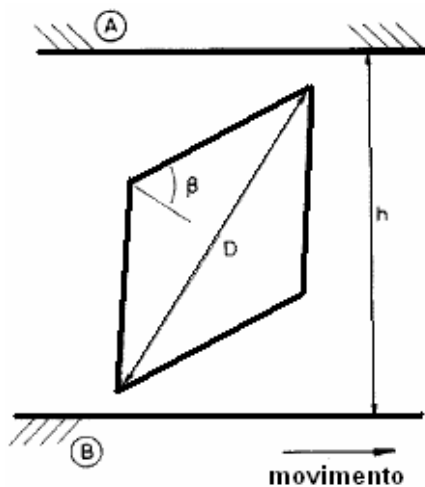


Figura 3 – Partícula abrasiva proposta por Williams e Hyncica.

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 ($D/h > 1$) é provável que esta se prenda, indentando as superfícies. A figura 4 mostra as duas situações.

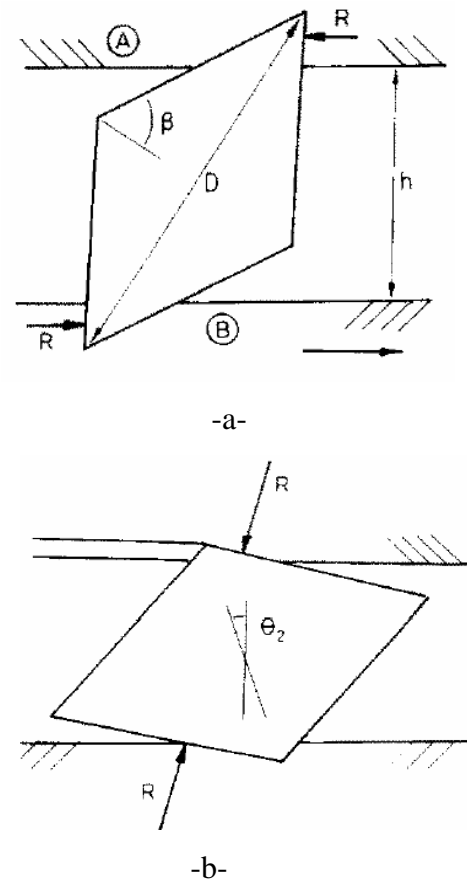


Figura 4 – Situações de desgaste: a) rolamento do abrasivo quando a relação D/h é pequena; b) deslizamento do abrasivo quando a relação D/h aumenta [3-4].

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.

Outra abordagem relevante foi apresentada no trabalho de Pintaúde [5], onde a análise da rugosidade da superfície desgastada determina a profundidade média dos eventos ocorridos no desgaste. 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 Rz. Aliás, os parâmetros de rugosidade relativos à superfícies desgastadas são de suma importância para o entendimento do presente trabalho.

3 – Parâmetros Quantitativos da Topografia de Superfícies

A perda de massa e a variação volumétrica não são os únicos meios de quantificação do desgaste abrasivo. Em processos finais de fabricação, por exemplo, lapidação e polimento, a rugosidade da superfície desgastada é o principal parâmetro avaliado. Nesses processos de acabamento o objetivo é atingir um nível satisfatório de irregularidades na superfície submetida ao contato com partículas abrasivas.

A literatura [1-16] mostra que a forma e a intensidade (ou profundidade) dos eventos produzidos no desgaste abrasivo estão associados à severidade do desgaste. Quanto mais severo o desgaste maior a perda de material, e maiores os níveis de rugosidade.

Os métodos mais comuns de obtenção da topografia da superfície são a ‘perfilometria’ e a ‘interferometria a laser’. Na ‘perfilometria’ usa-se um apalpador de diamante que descreve um perfil linear da topografia da amostra. A obtenção da topografia na ‘interferometria a laser’ ocorre sem que haja contato com a superfície que está sendo avaliada. Um sensor laser é responsável pela medição da posição da superfície durante o movimento linear da amostra. O perfil de rugosidade compõe-se de todas as posições relativas à

superfície medidas ao longo do movimento da amostra, independente do método de medição.

A tecnologia utilizada na ‘interferometria a laser’ é mais recente e viabiliza a execução de perfis em posições paralelas que varrem uma determinada área da amostra. Essa varredura descreve a topografia da amostra tridimensionalmente. Tanto o perfil bidimensional quanto a superfície que representa topografia da amostra podem ser quantificadas usando métodos estatísticos. A figura 5 representa a topografia, através da interferometria laser, de superfícies desgastadas, bi e tridimensionalmente.

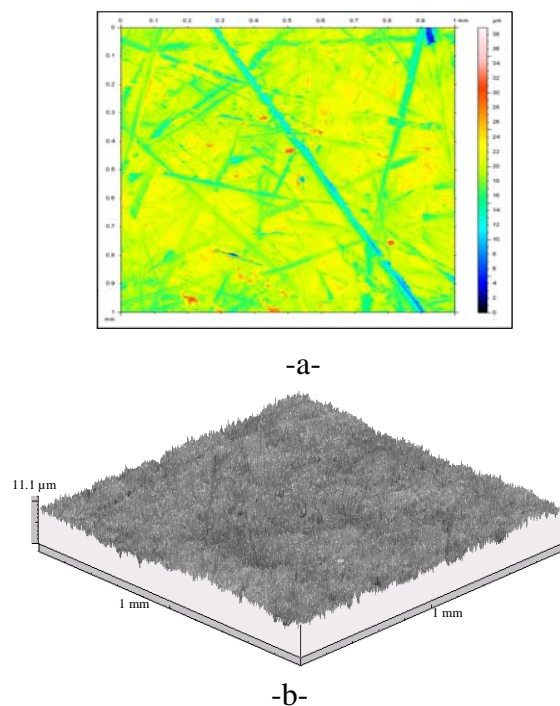


Figura 5 - Interferometria a laser: a) topografia da superfície desgastada; b) topografia em perspectiva.

Existem parâmetros que quantificam a rugosidade da superfície [14-17]:

- Rugosidade Média (Ra):

Segundo Gadelmawla e co-autores [14] a média aritmética do perfil, também conhecido como linha média central (CLA), é o parâmetro de rugosidade mais usado para controle de qualidade em geral.

Esse parâmetro pode ser definido como a média absoluta das alturas das irregularidades ao longo do perfil, e pode ser representado como a linha média de todo o perfil, como mostrado na figura 6.

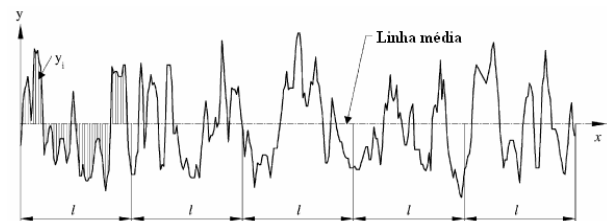


Figura 6 – Definição da média aritmética do perfil (Ra).

Esse parâmetro fornece uma boa descrição geral dos valores da altura das irregularidades. Entretanto, esse cálculo não informa sobre o comprimento de onda do perfil, e não é sensível a pequenas variações no perfil. A definição matemática, e implementação digital do parâmetro ‘rugosidade média’ estão mostradas nas equações abaixo:

$$Ra = \frac{1}{l} \int_0^l |y(x)| dx \quad Ra = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i|$$

onde Y_i é a altura do perfil no ponto i .

- Rugosidade Quadrática Média (Rq):

Esse parâmetro também é conhecido como RMS ('Root Mean Square'), e representa o desvio padrão da distribuição das alturas da superfície. Esse é um importante parâmetro que descreve a rugosidade da superfície usando um método estatístico. O Rq é mais sensível a grandes variações da linha média que o Ra [14].

As equações que se seguem mostram a definição matemática e implementação digital do parâmetro Rq [14]:

$$Rq = \sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l \{y(x)\}^2 dx} \quad Rq = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2}$$

onde Y_i é a altura do perfil no ponto i .

Graficamente, rugosidade quadrática média (Rq) é a linha que divide o perfil de forma que a soma do quadrado da distância do perfil até essa linha é igual a zero [14].

- Distância Máxima Entre Pico e Vale (Rz):

O Rz é definido como a distância entre o pico mais alto e o vale mais profundo de cada seção de amostragem do perfil de rugosidade [14]. A figura 7 mostra essa definição.

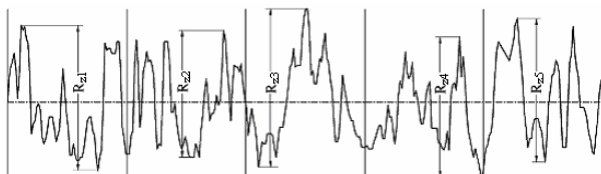


Figura 7 - Definição do parâmetro distância máxima entre picos e vales (Rz).

O 'comprimento de amostragem' padrão para os cálculos dos parâmetros de rugosidade ("cut-off") é dividido em cinco seções. Em cada seção é calculada a distância vertical entre o maior pico mais alto e o vale mais profundo, compondo cinco valores de distância por 'comprimento de amostragem' ($R_{z1} \dots R_{z5}$). O Rz é então calculado como a média dessas distâncias adquiridas ao longo do perfil de rugosidade [14].

- Coeficiente de Simetria ('Skewness - R_{sk}):

Define-se o coeficiente de simetria (ou 'Skewness') como o terceiro momento central da curva da função densidade probabilidade, medido ao longo do perfil [14-15]. Esse coeficiente é usado para medir a simetria do perfil em relação a linha média. São apresentados dois perfis de rugosidade com coeficientes de simetria diferentes na figura 8.

Esse parâmetro é sensível a ocasionais vales profundos e altos picos. Por exemplo, uma distribuição (curva densidade probabilidade) simétrica de alturas contendo a mesma quantidade de picos e vales, possui o coeficiente de simetria igual a zero. Perfis com picos removidos ou riscos profundos possuem coeficiente de simetria negativo (figura 8-b). O coeficiente de simetria é positivo em perfis com vales preenchidos ou altos picos (figura 8-a) [14].

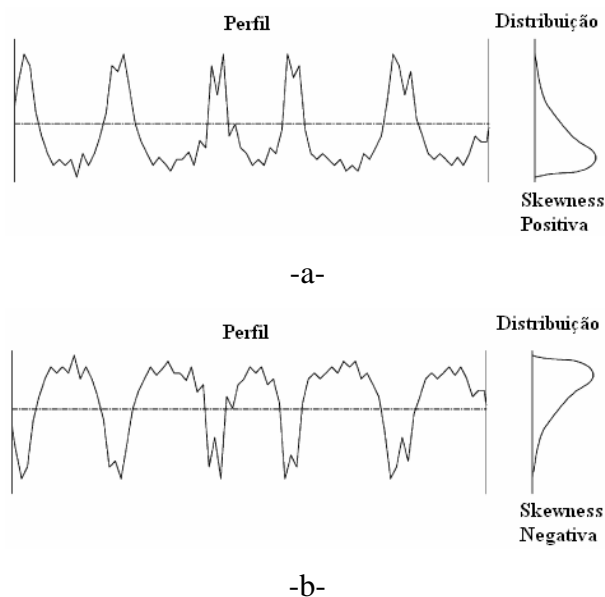


Figura 8 - Definição de coeficiente de simetria ('Skewness - R_{sk} ') em relação a curva da distribuição da amplitude [14]: a) Skewness positiva; b) Skewness negativa.

A formulação matemática e numérica usada para o cálculo desse parâmetro esta mostrada nas equações abaixo [14-15]:

$$R_{sk} = \frac{1}{R_q^3} \int_{-\infty}^{+\infty} y^3 p(y) dy \quad R_{sk} = \frac{1}{NR_q^3} \left(\sum_{i=1}^N Y_i^3 \right)$$

onde R_q é rugosidade quadrática média (RMS) e Y_i é a altura do perfil no ponto i .

O coeficiente de simetria pode ser usado para distinguir entre dois perfis contendo o mesmo valor de R_a ou R_q , mas com diferentes formatos.

A figura 8 mostra que o valor do coeficiente de simetria depende se o volume do material se encontra acima (Simetria negativa) ou abaixo (Simetria positiva) da linha média do perfil [14].

- Coeficiente de Achatamento ('Kurtosis - R_{ku} ')

O coeficiente de achatamento ('Kurtosis') é o quarto momento central do perfil da função densidade probabilidade, medido ao longo do perfil. Esse coeficiente descreve o achatamento da curva de densidade probabilidade [14-15]. A figura 9 mostra dois perfis com achatamentos diferentes.

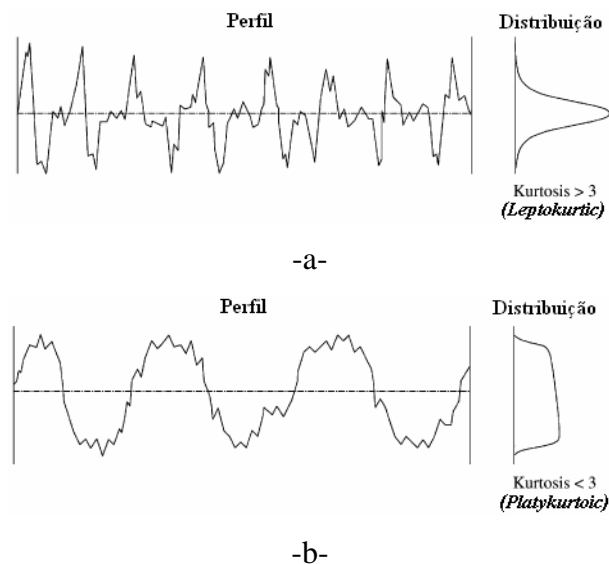


Figura 9 – Definição do coeficiente de achatamento ('Kurtosis - R_{ku} ') [14]: a) Kurtosis >3; b) Kurtosis <3.

Se $R_{ku} < 3$ a curva de distribuição se apresenta achatada devido à presença relativa de poucos picos altos e vales profundos (figura 9-b). Se o $R_{ku} > 3$ a curva de distribuição se apresenta afinada em torno da média (figura 9-a). Nesse caso existe, relativamente, a presença de muitos picos altos e vales profundos [14].

As equações que se seguem mostram a formulação matemática e numérica usada para o cálculo da Kurtosis [14]:

$$R_{sk} = \frac{1}{R_q^4} \int_{-\infty}^{+\infty} y^4 p(y) dy \quad R_{sk} = \frac{1}{NR_q^4} \left(\sum_{i=1}^N Y_i^4 \right)$$

onde R_q é rugosidade quadrática média (RMS) e Y_i é a altura do perfil no ponto i .

Assim como a simetria ('Skewness'), o achatamento ('Kurtosis') também pode ser usado para diferenciar duas superfícies com topografias diferentes e que possuem o mesmo valor de R_a , como mostrado na figura 2.9 [14].

Existem também os parâmetros de rugosidade 3D que são extrapolações dos parâmetros 2D. Os parâmetros 3D são definidos em comparação com o plano médio da superfície, calculado através do nivelamento usando método de mínimos quadrados aplicados a superfície medida. Dessa forma tem-se:

- Rugosidade Superficial Média (S_a):

Altura do plano médio da superfície.

$$S_a = \frac{1}{NM} \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{M-1} |z_{x,y}|$$

onde N é a quantidade de pontos de cada perfil, e M a quantidade de perfis paralelos que compõem a superfície.

- Rugosidade Superficial Quadrática Média (S_q):

Nesse caso a rugosidade quadrática média (S_q) é o plano que divide a superfície de forma que a soma do quadrado da distância da superfície até esse plano é igual a zero [14].

$$S_q = \sqrt{\frac{1}{NM} \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{M-1} z_{x,y}^2}$$

onde N é a quantidade de pontos de cada perfil, e M a quantidade de perfis paralelos que compõem a superfície.

Esse parâmetro também é conhecido como o RMS da superfície.

- Distância Máxima entre Pico e Vale (S_z):

É uma extrapolação do parâmetro R_z , o S_z é definido como a distância entre o pico mais alto e o vale mais profundo de cada seção de amostragem do perfil de rugosidade.

Nesse caso cada área de amostragem é dividida em cinco seções, sendo obtido o valor do pico mais alto e o do vale mais profundo para cada seção ($S_{z1}...S_{z5}$). O S_z é calculado como a média de todas as distâncias entre pico e vale, adquiridas na superfície medida.

- Simetria Superficial ('Skewness' Superficial - S_{sk}):

Esse parâmetro mostra a simetria da curva de distribuição das alturas referentes a superfície rugosa.

$$S_{sk} = \frac{1}{NMS^3} \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{M-1} z_{x,y}^3$$

onde N é a quantidade de pontos de cada perfil, e M a quantidade de perfis paralelos que compõem a superfície.

- Achatamento Superficial ('Kurtosis' superficial - S_{ku}):

Esse parâmetro traduz o nível de achatamento da curva de distribuição das alturas da superfície rugosa.

$$S_{ku} = \frac{1}{NMS^4} \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{M-1} z_{x,y}^4$$

onde N é a quantidade de pontos de cada perfil, e M a quantidade de perfis paralelos que compõem a superfície.

Observa-se que um único parâmetro de rugosidade não define completamente a topografia da superfície analisada. Superfícies com o mesmo S_a ou S_q podem apresentar diferentes distribuições de picos e vales ao longo do perfil. Entretanto, alguns parâmetros fornecem informações parciais sobre a superfície, que podem ser utilizada para fins específicos.

MATERIAL E MÉTODOS

1 – Ensaio de Desgaste Abrasivo

Através do ensaio de desgaste abrasivo, obtém-se a superfície que servirá de referência para a simulação. O tipo de ensaio escolhido permite a rotação das partículas entre as superfícies e foi executado em um equipamento conhecido como 'abrasômetro a três corpos LTM', cujo princípio de funcionamento está esquematizado na figura 10.

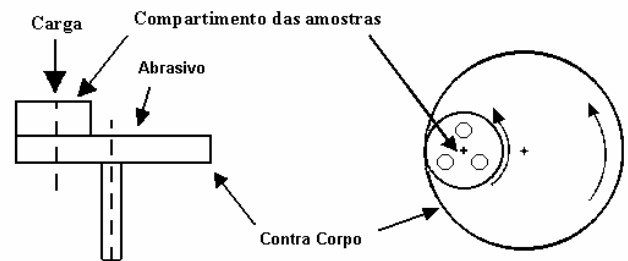


Figura 10 – Esquema de funcionamento do 'abrasômetro a três corpos LTM'.

Nesse tipo de equipamento, um motor elétrico aciona um disco (contra-corpo) fazendo-o girar. São colocadas três amostras sobre o disco em um compartimento especial, que garante a equidistância delas ao centro do compartimento e, dessa forma a carga é distribuída uniformemente sobre as três amostras. O sistema é alimentado por um fluxo contínuo e uniforme de abrasivo, de modo que a rotação do contra-corpo garanta a renovação desse abrasivo na interface de

contato. O ensaio é realizado a seco. A figura 11 mostra o equipamento abrasômetro a três corpos e seus principais componentes.



-a-



-b-

Figura 11 – a) Abrasômetro a três corpos; b) Compartimento das amostras.

A superfície de referência foi obtida, utilizando-se uma amostra de aço ferramenta, de dureza 700HV. O abrasivo utilizado foi um pó de carbetto de silício (SiC) de granulometria 220 mesh e o carregamento foi de 4,116 N. O ensaio foi realizado utilizando um contra corpo de ferro fundido (ASTM 532IIIA) temperado e revenido a 250° C por 1h, com dureza 751HV.

Feito o ensaio, a impressão de desgaste na superfície da amostra é analisada através de um interferômetro óptico a laser marca ‘UBM Microfocus Expert IV’ e do programa ‘UBM Measurement Analysis System’. Para ser feita essa análise, determina-se uma área de varredura e também uma alta resolução. Esta varredura de alta resolução descreve a topografia da impressão de desgaste, e a partir dessa topografia, são obtidos os parâmetros de rugosidade relativos àquela superfície.

São feitas também, fotografias da superfície desgastada, via microscopia ótica e eletrônica. Essas fotografias permitem uma melhor visualização dos mecanismos de desgaste predominante na superfície da amostra de referência.

Em outras palavras, a análise da topografia da superfície desgastada, via 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. Os parâmetros de rugosidade estão relacionados à quantidade e profundidade dos eventos (riscos e/ou indentações) ocorridos na superfície da amostra. 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 no ensaio.

2 – Quantificação dos Eventos da Abrasão

Através de uma rotina computacional, é possível quantificar e dimensionar os eventos (riscos/sulcos e indentações) presentes na superfície desgastada. Este programa será feito em Matlab e usará a superfície produzida no ensaio e na interferometria laser com base para o cálculo das dimensões e quantidades dos eventos.

Houve a preocupação inicial de simular uma superfície desgastada ideal, que servirá como base para a quantificação dos eventos produzidos.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

1 – Superfície de Referência

A figura 12 mostra a topografia da superfície de referência, obtida no ensaio de desgaste abrasivo, que foi adquirida via interferometria laser.

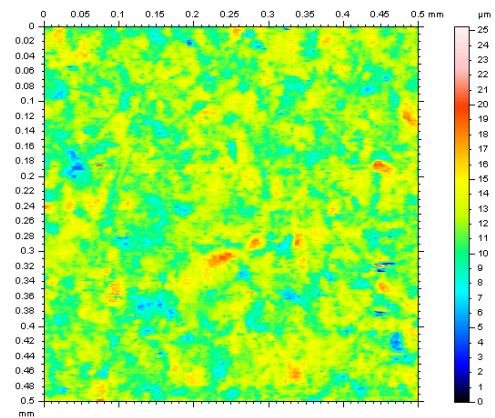


Figura 12 – Interferometria laser da superfície de referência.

Os parâmetros de rugosidade referentes à superfície desgastada estão apresentados na tabela 1:

Tabela 1 – Parâmetros de rugosidade da superfície de referência

Parâmetro de rugosidade	Valor
Sa	1,4 µm
Sq	1,84 µm
Sz	19,4 µm
S _{sk}	-0,174
S _{ku}	3,9

4.2 – Simulação

Primeiramente, foi implementado um programa para se obter apenas uma indentação unitária. A figura 13 mostra a indentação unitária simulada.

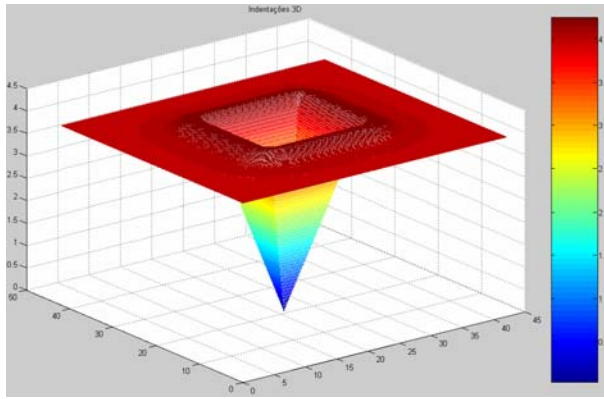


Figura 13 – Indentação unitária simulada.

Verifica-se na figura 13 que a indentação simulada para um penetrador de forma piramidal. Foi inserida na superfície, uma área de deformações plásticas em torno da indentação, com o intuito de se reproduzir com mais fidelidade o que ocorre em indentações reais.

Posteriormente a indentação unitária, foi implementada uma rotina para se obter uma superfície com diversas indentações. A figura 14 representa uma superfície com quatro indentações.

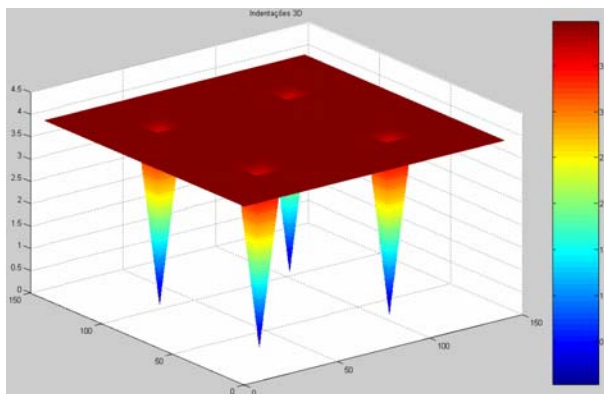
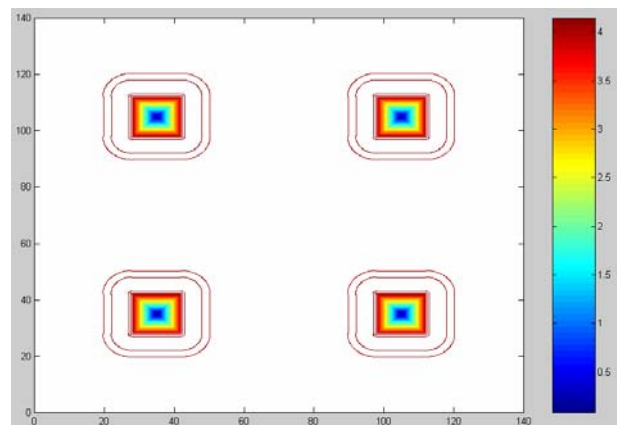


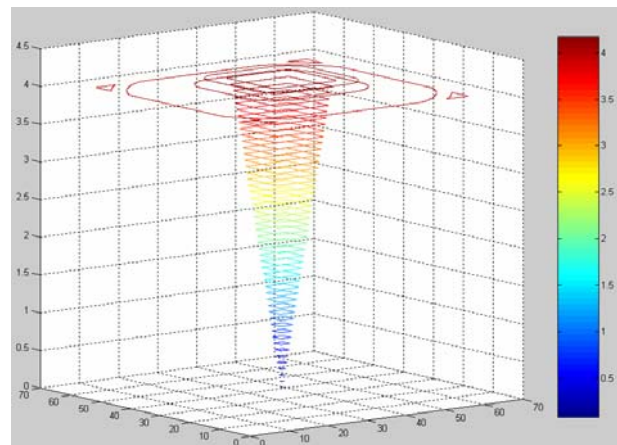
Figura 14 – Superfície com diversas indentações.

Tem-se no anexo 1, o programa implementado para se obter a superfície de indentações.

Foi realizado, posteriormente, um programa que traça as curvas de nível das superfícies simuladas. A figura 15, mostra a vista superior das curvas de nível da superfície de indentações.



-a-

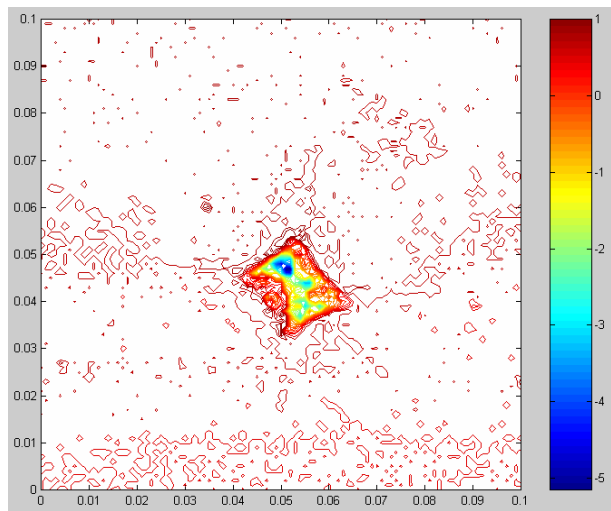


-b-

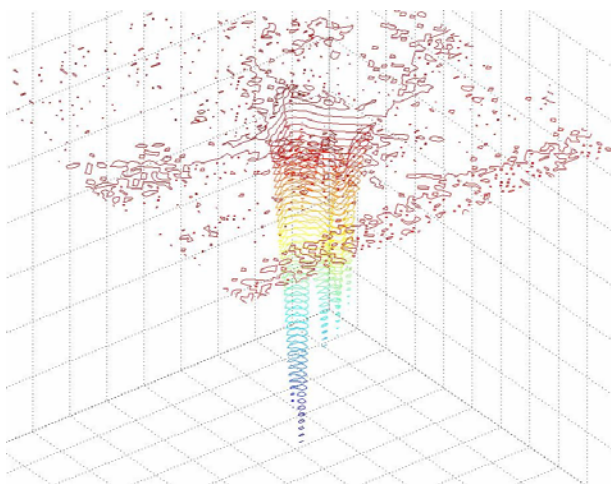
Figura 15 – Curvas de nível da superfície de indentações: a) vista superior e b) curvas de nível em 3D.

A partir dos dados obtidos pela interferometria laser, é possível, através dos programas implementados, traçar as curvas

de nível de superfícies indentadas reais. A figura 16 mostra as curvas de nível de uma indentação real.



-a-



-b-

Figura 16 – Curvas de nível de uma indentação real: a) vista superior e b) curvas de nível em 3D.

A análise das curvas de nível permite identificar a posição dos eventos de indentação, assim como sua profundidade relativa ao plano da superfície.

A figura 17 representa a vista superior das curvas de nível de uma superfície com quatro indentações reais.

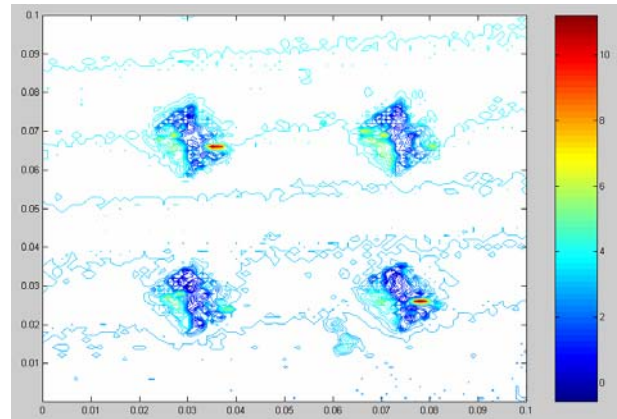


Figura 17 - Curvas de nível da superfície de indentações reais.

A análise das curvas de nível, aplicada à superfície produzida nos ensaios realizados em laboratório, identificam e quantificam os eventos presentes nessa superfície.

O programa calcula, ainda, os parâmetros de rugosidade tanto da superfície de referência, quanto da superfície simulada.

CONCLUSÕES

Dos resultados obtidos até o presente momento, referentes ao trabalho, conclui-se:

→ A metodologia apresentada permite a avaliação do desgaste abrasivo em função da topografia das superfícies desgastadas;

→ Os parâmetros de rugosidade guardam relação com a intensidade do desgaste, pois permite a observação precisa da profundidade e posição dos eventos.

6 – Referências Bibliográficas

[1] 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.

[2] 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.

[3] Williams, J. A. and Hyncica, A. M., “Mechanisms of abrasive wear in lubricated contacts”, *Wear*, volume 152, pp 57-74, 1992.

[4] Williams, J. A. and Hyncica, A. M., “Abrasive wear in lubricated contacts”, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, volume 25, pp A81-A90, 1992.

[5] Pintaúde, G., “Análise dos regimes moderado 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.

[6] 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.

[7] Gates, J. D., “Two-body and three-body abrasion: A critical discussion”, *Wear*, volume 214, pp 139 – 146, 1998.

[8] Buijs, M. and Korpel-van Houten, K., “A model for lapping of glass”, *Journal of Materials Science*, volume 28, pp 3014 – 3020, 1993.

[9] 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.

[10] Da Silva, W. M., Binder, R. e de Mello, J. D. B., “Abrasive Wear of Steam Treated Sintered Iron”, para publicação na revista *Wear*, 2004.

[11] Adachi, K., Hutchings, I. M., “Wear mode mapping for the micro-scale abrasion test”, *Wear*, volume: 255, pp 23 – 29, 2003.

[12] Buijs, M. and Korpel-van Houten, K., “Three-body abrasion of brittle materials as studied by lapping”, *Wear*, volume 166, pp 237 – 245, 1993.

[13] Stachowiak, G. W. and Batchelor, A. W., “Engineering tribology”, Butterworth – Heinemann, 2ª edition, 744 p, 2001.

[14] Gadelmawla, E. S., Koura, M. M., Maksoud, T. M. A., Elewa, I. M., Soliman, H. H., “Roughness Parameters”, *Journal of Materials Processing Technology*, volume 123, pp 133 – 145, 2002.

[15] de Mello, J. D. B., “Structures Metallurgiques et Caracterization de L’abrasion des Fontes Blanches au Chrome”, Tese de Doutorado, Institut Polytechnique de Grenoble, França, 141p, 1983.

[16] Zum Gahr, K. L., “Microstructure and wear of materials”, Tribology Series, Volume 10, Elsevier Science Publishers B. V., 560 p, 1987.

[17] Hutchings, I. M., “Tribology: Friction and wear of engineering materials”, CRC Press Inc., Boca Raton, USA, 273 p, 1992.

ANEXO

1 - Este programa calcula os planos de uma indentação piramidal e plota várias indentações com espaçamento entre elas

```
close all
clear all
%clc

p=4; %input('Entre com a profundidade de penetração (µm):');
a=136; %input('Entre com o ângulo de ponta do penetrador (em graus):');
mi=2; %input('Entre com o número de indentações em uma linha:');
percent=100; %input('Entre com o percentual de deformação (% em volume):');
c=3; %input('multiplicador do L - distancia entre indentaç~oes:');
ml=mi;%input('Entre com o numero de linhas:');

res=100; %resolução da curva - quantidade de pontos no vetor

%calcula a diagonal da indentação

Ld=2*p*tan(a*pi/360); %diagonal da área da indentação
L=Ld/sqrt(2); %lado da indentação

x=[0:L/res:c*L]; %vetor x
y=[0:L/res:c*L]; %vetor y
n=length(x);
z=0;

%volume da pirâmide (µm³)

volref=L*L*p/3; %volume de referência um terço da área da base vezes a altura

%retas condicionais yI=x e yII=-x+L
yI=x; %reta 1
yII=-x+L; %reta 2

%gera os planos da indentação

for ii=1:n
    for jj=1:n
        if x(ii)<=yII(jj) %coord x menor que a reta 2
            if y(jj)>=yI(ii) %coord y maior que reta 1
                z(ii,jj)=-(2*p/L)*x(ii)+p; % aplica a equação do plano 1
            else
                z(ii,jj)=-(2*p/L)*y(jj)+p; % aplicar a equação do plano 4
            end
        else
            % coord x maior que a reta 2
            if y(jj)>=yI(ii) %coord y maior que reta 1
                z(ii,jj)=(2*p/L)*y(jj)-p; % aplica a equação do plano 2
            end
        end
    end
end
```

```

        else
            z(ii,jj)=(2*p/L)*x(ii)-p; % aplica a equação do plano 3
        end
    end
end
if z(ii,jj)>p
    z(ii,jj)=p;
end
end
end
end
end

```

```

xtemp=[0:L/res:(c-1)*L];
ytemp=[0:L/res:(c-1)*L];

```

```

ztemp=ones(n,length(ytemp))*p;
z=[ztemp z];
x=[xtemp (x+((c-1)*L))];

```

```

n=length(x);
ztemp=ones(length(xtemp),n)*p;
z=[ztemp
    z];
y=[ytemp (y+((c-1)*L))];

```

%calcula vetores de deformação nas bordas

%primeira curva - próxima de zero:

$$d(x)=p_6*x^6+p_5*x^5+p_4*x^4+p_3*x^3+p_2*x^2+p_1*x+p_0$$

% p6 = -4.223e-009;

% p5 = 3.848e-007;

% p4 = -1.323e-005;

% p3 = 0.0002138;

% p2 = -0.001675;

% p1 = 0.005793;

% p0 = 0.003612;

e10=0.003612;

e11=0.005793;

e12=-0.001675;

e13=0.0002138;

e14=-0.00001323;

e15=0.0000003848;

e16=-0.000000004223;

a0=e10;

a1=e11;

a2=e12;

a3=e13;

a4=e14;

a5=e15;

a6=e16;

```

%coeficientes da segunda equação:
d(x)=p6*x^6+p5*x^5+p4*x^4+p3*x^3+p2*x^2+p1*x+p0
% p6=-0.00000007925;
% p5=0.000008085;
% p4=-0.0003205;
% p3=0.006159;
% p2=-0.05729;
% p1=0.2067;
% p0=0.005349;

e20=0.005349;
e21=0.2067;
e22=-0.05729;
e23=0.006159;
e24=-0.0003205;
e25=0.000008085;
e26=-0.00000007925;

%numero de curvas - para a interação

num=50;

%incremento (d) de cada coeficiente

d0=(abs(e20-e10))/num;
d1=(abs(e21-e11))/num;
d2=(abs(e22-e12))/num;
d3=(abs(e23-e13))/num;
d4=(abs(e24-e14))/num;
d5=(abs(e25-e15))/num;
d6=(abs(e26-e16))/num;

%deformação horizontal (µm)
defh=20;

% vetores
defx=[0:L/res:defh];
defy2=[0:L/res:defh];
n2=defh;
n3=length(defx);

volaux=(percent/100)*volref;
volaux2=(percent/100)*volref;

for iii=1:num %grande loop que varre várias curvas até encontrar a curva com o volume
mais próximo da referência
    if iii>1
        a0=a0-d0;
        a1=a1+d1;

```

```

a2=a2-d2;
a3=a3+d3;
a4=a4-d4;
a5=a5+d5;
a6=a6-d6;
defy=a6*defx.^6+a5*defx.^5+a4*defx.^4+a3*defx.^3+a2*defx.^2+a1*defx+a0;
else
a0=a0;
a1=a1;
a2=a2;
a3=a3;
a4=a4;
a5=a5;
a6=a6;
defy=a6*defx.^6+a5*defx.^5+a4*defx.^4+a3*defx.^3+a2*defx.^2+a1*defx+a0;
end

%insere deformações na borda das indentações unitárias
zaux=zeros(n,n);
zaux2=zeros(n,n);
for ii=1:n
aux=0;
for jj=1:n
if x(jj)>=c*L & x(jj)<=(c*L+n2) & y(ii)>=((c-1)*L) & y(ii)<=(c*L)
aux=aux+1;
if aux<=length(defy)
z(ii,jj)=(p+defy(aux));
zaux(ii,jj)=(p+defy(aux));
end
end
end
zaux=fliplr(zaux);
for jj=1:n
aux=0;
for ii=1:n
if y(ii)>=c*L & y(ii)<=(c*L+n2) & x(jj)>=((c-1)*L) & x(jj)<=(c*L)
aux=aux+1;
if aux<=length(defy)
z(ii,jj)=(p+defy(aux));
zaux2(ii,jj)=(p+defy(aux));
end
end
end
zaux2=flipud(zaux2);
desloc=((c-1)*L)-n2;
for ii=1:n
for jj=1:n
if x(jj)>=desloc & x(jj)<(desloc+n2) & y(ii)>=((c-1)*L) & y(ii)<=(c*L)

```

```

        z(ii,jj)=zaux(ii,jj);
    end
    if y(ii)>=desloc & y(ii)<(desloc+n2) & x(jj)>=((c-1)*L) & x(jj)<=(c*L)
        z(ii,jj)=zaux2(ii,jj);
    end
end
end

% gera a matriz do canto da deformação
zrot=0;
zrot2=0;
zrot3=0;
zrot4=0;
for ii=1:n3
    for jj=1:n3
        drot=sqrt((defx(ii)^2+defy2(jj)^2));
        zrot(ii,jj)=(a6*drot^6+a5*drot^5+a4*drot^4+a3*drot^3+a2*drot^2+a1*drot+a0)+p;
        if zrot(ii,jj)<p
            zrot(ii,jj)=p;
        end
    end
end
zrot2=flipud(zrot);
zrot3=fliplr(zrot2);
zrot4=flipud(zrot3);

%insere na matriz a deformação de canto
auxj=1;
for ii=1:n
    auxi=1;
    for jj=1:n
        if x(jj)>c*L & x(jj)<(c*L+n2) & y(ii)>(c*L) & y(ii)<(c*L+n2) % posição da area 'zrot'
            auxi=auxi+1;
            if auxi==n3
                auxj=auxj+1;
            end
            if auxi<=length(defy)
                z(ii,jj)=zrot(auxi,auxj);
            end
        end
    end
end
end
desloc2=((c-1)*L)-n2;
auxj=1;
for ii=1:n
    auxi=1;
    for jj=1:n
        if x(jj)>desloc2 & x(jj)<(desloc2+n2) & y(ii)>(c*L) & y(ii)<(c*L+n2) % posição da
area 'zrot2'
            auxi=auxi+1;

```

```

        if auxi==n3
            auxj=auxj+1;
        end
        if auxi<=length(defy)
            z(ii,jj)=zrot2(auxi,auxj);
        end
    end
end
end
auxj=1;
for ii=1:n
    auxi=1;
    for jj=1:n
        if x(jj)>=desloc2 & x(jj)<(desloc2+n2) & y(ii)>=desloc2 & y(ii)<(desloc2+n2)
%posição da area 'zrot3'
            auxi=auxi+1;
            if auxi==n3
                auxj=auxj+1;
            end
            if auxi<=length(defy)
                z(ii,jj)=zrot3(auxi,auxj);
            end
        end
    end
end
end
auxj=1;
for ii=1:n
    auxi=1;
    for jj=1:n
        if x(jj)>c*L & x(jj)<=(c*L+n2) & y(ii)>=desloc2 & y(ii)<(desloc2+n2) %posição da
area 'zrot4'
            auxi=auxi+1;
            if auxi==n3
                auxj=auxj+1;
            end
            if auxi<=length(defy)
                z(ii,jj)=zrot4(auxi,auxj);
            end
        end
    end
end
end

%plota
figure(1);
set(1,'position',[50 250 900 280]);
mesh(x,y,z);
colorbar
title('procurando...');
drawnow;
%pause(0.3);

```

```

    vol(iii)=funcintegrald(x,y,z)+volref-(x(length(x))*y(length(y))*p); % volume só da
deformação
    dif=abs(vol(iii)-volaux2); % compara o volume calculado na integral com o % do volume
de referencia
    dif2(iii)=dif;
    if dif<volaux %com o menor volume os coeficientes são guardados
        r0=a0;
        r1=a1;
        r2=a2;
        r3=a3;
        r4=a4;
        r5=a5;
        r6=a6;
        volaux=dif;
        volumeot=vol(iii);
    end
end

defy=r6*defx.^6+r5*defx.^5+r4*defx.^4+r3*defx.^3+r2*defx.^2+r1*defx+r0;

%insere deformações na borda das indentações unitárias
zaux=zeros(n,n);
zaux2=zeros(n,n);
for ii=1:n
    aux=0;
    for jj=1:n
        if x(jj)>=c*L & x(jj)<=(c*L+n2) & y(ii)>=((c-1)*L) & y(ii)<=(c*L)
            aux=aux+1;
            if aux<=length(defy)
                z(ii,jj)=(p+defy(aux));
                zaux(ii,jj)=(p+defy(aux));
            end
        end
    end
end
zaux=fliplr(zaux);
for jj=1:n
    aux=0;
    for ii=1:n
        if y(ii)>=c*L & y(ii)<=(c*L+n2) & x(jj)>=((c-1)*L) & x(jj)<=(c*L)
            aux=aux+1;
            if aux<=length(defy)
                z(ii,jj)=(p+defy(aux));
                zaux2(ii,jj)=(p+defy(aux));
            end
        end
    end
end
zaux2=flipud(zaux2);

```

```

desloc=((c-1)*L)-n2;
for ii=1:n
    for jj=1:n
        if x(jj)>=desloc & x(jj)<(desloc+n2) & y(ii)>=((c-1)*L) & y(ii)<=(c*L)
            z(ii,jj)=zaux(ii,jj);
        end
        if y(ii)>=desloc & y(ii)<(desloc+n2) & x(jj)>=((c-1)*L) & x(jj)<=(c*L)
            z(ii,jj)=zaux2(ii,jj);
        end
    end
end
end

%gera a matriz do canto da deformação
zrot=0;
zrot2=0;
zrot3=0;
zrot4=0;
for ii=1:n3
    for jj=1:n3
        drot=sqrt((defx(ii)^2+defy2(jj)^2));
        zrot(ii,jj)=(r6*drot^6+r5*drot^5+r4*drot^4+r3*drot^3+r2*drot^2+r1*drot+r0)+p;
        if zrot(ii,jj)<p
            zrot(ii,jj)=p;
        end
    end
end
end
zrot2=flipud(zrot);
zrot3=fliplr(zrot2);
zrot4=flipud(zrot3);

%insere na matriz a deformação de canto
auxj=1;
for ii=1:n
    auxi=1;
    for jj=1:n
        if x(jj)>c*L & x(jj)<(c*L+n2) & y(ii)>(c*L) & y(ii)<(c*L+n2) %posição da area 'zrot'
            auxi=auxi+1;
            if auxi==n3
                auxj=auxj+1;
            end
            if auxi<=length(defy)
                z(ii,jj)=zrot(auxi,auxj);
            end
        end
    end
end
end
desloc2=((c-1)*L)-n2;
auxj=1;
for ii=1:n
    auxi=1;

```



```

    for jj=1:n
        if x(jj)>desloc2 & x(jj)<(desloc2+n2) & y(ii)>(c*L) & y(ii)<(c*L+n2) %posição da
area 'zrot2'
            auxi=auxi+1;
            if auxi==n3
                auxj=auxj+1;
            end
            if auxi<=length(defy)
                z(ii,jj)=zrot2(auxi,auxj);
            end
        end
    end
end
auxj=1;
for ii=1:n
    auxi=1;
    for jj=1:n
        if x(jj)>=desloc2 & x(jj)<(desloc2+n2) & y(ii)>=desloc2 & y(ii)<(desloc2+n2)
%posição da area 'zrot3'
            auxi=auxi+1;
            if auxi==n3
                auxj=auxj+1;
            end
            if auxi<=length(defy)
                z(ii,jj)=zrot3(auxi,auxj);
            end
        end
    end
end
auxj=1;
for ii=1:n
    auxi=1;
    for jj=1:n
        if x(jj)>c*L & x(jj)<=(c*L+n2) & y(ii)>=desloc2 & y(ii)<(desloc2+n2) %posição da
area 'zrot4'
            auxi=auxi+1;
            if auxi==n3
                auxj=auxj+1;
            end
            if auxi<=length(defy)
                z(ii,jj)=zrot4(auxi,auxj);
            end
        end
    end
end
end

%%%repete indentação, formando uma linha de indentações%%%
x2=x;
y2=y;
z2=z;

```

```

for ii=1:(mi-1)
    x2=[x2,(x+(ii*((2*c)-1)*L))];
    z2=[z2,z];
end

%repete linhas, formando um plano de indentações
x3=x2;
y3=y2;
z3=z2;
for jj=1:(ml-1)%repete
    y3=[y3,(y2+(jj*((2*c)-1)*L))];
    z3=[z3
        z2];
end

%plota
figure(1);
set(1,'position',[50 250 900 280]);
mesh(x3,y3,z3);
colorbar
title('Indentações 3D');

contour(x3,y3,z3,50);
colorbar

%parametros de rugosidade

sizez3=size(z3);

disp('A rugosidade média é:');
Ra=(sum(sum(z3,1),2))/(sizez3(1)*sizez3(2))

disp('A rugosidade quadrática média é:');
Rq=std(std(z3))

```