

Desenvolvimento de um Rugosímetro a LASER

R. D. Paiva Jr., M. Muramatsu

Laboratório de Óptica, Departamento de Física Geral

Instituto de Física da Universidade de São Paulo

R. do Matão, travessa R, 187, CEP 05508-900, São Paulo, SP, Brasil

Recebido em 24 de Outubro, 2003. Versão revisada aceita para publicação em 07 de Abril, 2004

Neste artigo será relatada a pesquisa realizada para medição de rugosidade utilizando a técnica da Correlação Angular de *Speckle* (CAS), baseada na comparação dos padrões de *speckle* produzidos por uma superfície refletora quando iluminada por luz coerente em diversos ângulos de incidência. Digitalizamos os padrões com uma câmera CCD e os comparamos com um cálculo de correlação realizado por um programa especialmente desenvolvido para este fim. Entre as aplicações para as quais a técnica foi aplicada citamos: chapas de aço laminadas a frio para a indústria automobilística, estudo de modelo de corrosão e superfícies dentais e de materiais utilizados em restaurações e próteses. Serão discutidas as vantagens e limitações desta técnica, bem como melhorias que poderiam ser feitas para aplicações futuras.

This work presents the research for roughness measuring made using the Speckle Pattern Angular Correlation technique, which is based on the comparison of the speckle patterns produced by a reflecting surface when lighted by coherent light in different lighting angles. We digitalize the speckle patterns with a CCD camera and we confront them through a correlation calculus carried out by a software specially developed for this purpose. Among applications the technique has been applied to, we may cite: cold rolled stripes for automobilistic industry, corrosion model study and dental prothesis and dental restoring materials surfaces. Advantages and limitations of this technique will be discussed, as well as improvements that could be implemented for future applications.

1 Introdução

Inúmeros fenômenos estudados para o desenvolvimento da Ciência ou para aplicações tecnológicas sofrem importante influência das características superficiais dos materiais neles envolvidos. Assim, por exemplo, qualquer estudo envolvendo o atrito entre peças, o desgaste de peças em atrito, o uso de lubrificantes para o controle do atrito, o uso do atrito em mecanismos de transporte de materiais, a utilização de adesivos para a união de materiais, a adesividade de materiais de acabamento superficial (como tintas e vernizes), a fixação de materiais de restaurações etc. ficaria incompleto se não incluísse descrições das características superficiais dos materiais nele utilizado.

Certamente a maneira mais completa de se fazer uma descrição das características de relevo das superfícies de materiais incluiria a apresentação de imagens destas superfícies ampliadas de modo a permitir a visualização de suas irregularidades. Há maneiras de se fazer isto, mas esta forma de estudo de superfícies padece de alguns inconvenientes como dificuldade de quantificação, pequena área de cobertura (principalmente quando o aumento necessário é muito grande) e em muitos casos custo elevado e necessidade de condições especiais do ambiente e/ou da peça. No intuito de evitar tais problemas foram definidas diversas maneiras

de se medir e calcular parâmetros de rugosidade, ou seja, números que procuram expressar de uma maneira prática e quantitativa a rugosidade de superfícies [1].

Foram desenvolvidos também inúmeros aparelhos para realizar estas medições como microscópios ópticos, microscópios eletrônicos, perfilômetros mecânicos, perfilômetros ópticos, micro-interferômetros e rugosímetros baseados no espalhamento da luz [2]. No entanto, cada um destes equipamentos apresenta suas vantagens, desvantagens e limitações.

Os microscópios (ópticos ou eletrônicos), por fornecerem imagens da superfície sob estudo estão sujeitos aos inconvenientes citados anteriormente.

Os perfilômetros mecânicos utilizam uma agulha de diamante que “apalpa” a superfície enquanto é deslocada ao longo de uma linha reta. Esta é uma forma bastante simples de obtenção de um perfil da superfície, e por isso muito utilizada. Na verdade, todas as definições de parâmetros de rugosidade e as instruções para sua medição e cálculo que encontramos em normas técnicas estão baseadas em perfis obtidos desta maneira. No entanto, o contato da agulha de diamante com a peça geralmente causa riscos à última, o que pode inutilizá-la. Além disso, devido ao próprio princípio de funcionamento deste tipo de aparelho a medição sempre fornece as alturas da superfície ao longo de uma li-

nha (medição bi-dimensional), cuja distribuição é assumida como boa representação do que ocorre em outras partes da superfície, mas pode ser bastante particular.

Os perfilômetros ópticos evitam o problema do contato com a superfície usando uma “sonda óptica”, mas também fazem medição bi-dimensional. Às vezes procura-se contornar esta restrição realizando a medição de uma série de perfis e montando a partir deles um mapa “tridimensional” da superfície (recurso utilizado também em Microscopia de Força Atômica, por exemplo), mas isto torna a medição muito mais trabalhosa e demorada.

Micro-interferômetros utilizam uma conjugação de microscópio com interferômetro para fazer comparação entre a superfície sob investigação e uma superfície de referência cuja rugosidade é considerada desprezível. Através da interpretação das franjas de interferência obtidas pode-se construir um mapa do relevo da superfície, mas novamente estamos tratando de pequenas áreas de abrangência e, neste caso, também de necessidade de considerável trabalho de processamento de imagens.

Neste cenário, o rugosímetro baseado no espalhamento de luz é uma alternativa extremamente atraente quando se quer medir rugosidades sobre áreas (ao invés de linhas) da superfície. Sua maior limitação refere-se ao fato de estas técnicas não revelarem, em geral, detalhes do micro-relevo da superfície, pois a luz captada em cada posição de observação resulta da composição de quantidades espalhadas por toda a área iluminada. Assim não se forma uma imagem da superfície sob estudo e os valores obtidos referem-se sempre a médias de toda a região iluminada. Outro ponto a ser ressaltado é que estas técnicas precisam que a luz seja espalhada pela superfície, e apenas por ela. Isto faz com que peças opacas ou transparentes sejam facilmente medidas, mas cria dificuldades para a aplicação a peças translúcidas. Em contrapartida, são medições intrinsecamente estatísticas (dado que refletem resultados médios da região iluminada, conforme mencionado a pouco), passíveis de automatização e absolutamente não destrutivas. Dentre as diversas técnicas baseadas no espalhamento de luz existentes (Espalhamento Total Integrado, Espalhamento por Resolução em ângulo, Contraste do Padrão de *Speckle* [3] etc.) apresentaremos aqui resultados obtidos com aquela que utilizamos, a Correlação Angular de *Speckle* [4].

O *speckle* é uma figura de aspecto granuloso (o termo é traduzido livremente como granulado óptico), formada por uma alternância de pontos claros e escuros devidos a interferências predominantemente construtivas ou destrutivas da luz coerente espalhada por uma superfície rugosa. As figuras a seguir apresentam um esquema da formação do *speckle*.

2 Teoria

Para a determinação de sua rugosidade, mede-se a correlação entre os padrões de *speckle* produzidos por uma superfície sob diferentes condições de iluminação. Quando

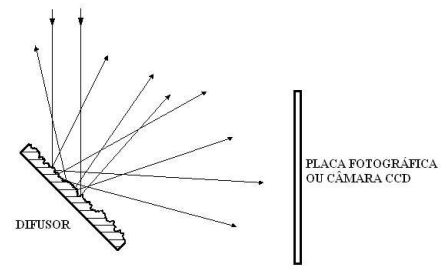


Figura 1. Quando uma superfície rugosa é iluminada, espalha luz em todas as direções.

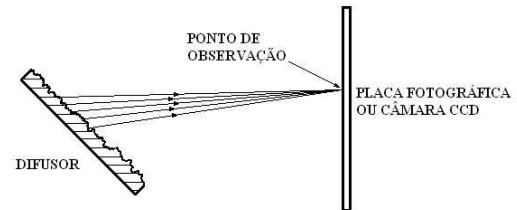


Figura 2. Ao se tomar em particular um determinado ponto sobre um plano de observação, vê-se que sobre ele incide luz proveniente de inúmeros pontos da região iluminada da superfície. Se a maior parte das ondas luminosas que incide sobre tal ponto compõe interferências construtivas ele fica bem iluminado (ponto claro). Se, ao contrário, houver predominância de interferências destrutivas o ponto fica mal iluminado (ponto escuro). Em cada ponto do plano de observação pode acontecer um destes casos ou uma situação intermediária.

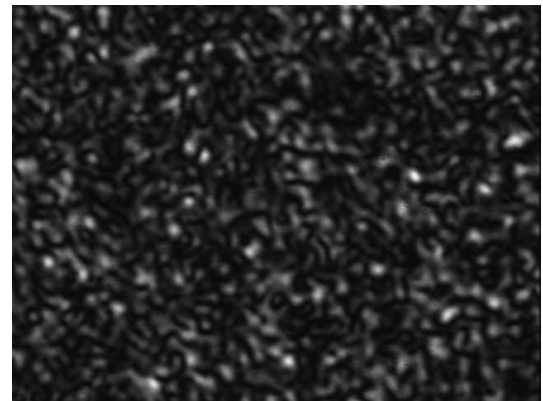


Figura 3. O conjunto de todos os pontos sobre o plano de observação forma um grande número de regiões claras e escuras. O conjunto dos chamados “grãos de *speckle*” forma a figura conhecida como padrão de *speckle*.

o objeto está iluminado segundo a primeira condição forma-se um padrão de *speckle* que é registrado como referência. Quando se altera a condição de iluminação mudam os caminhos ópticos entre cada ponto da superfície examinada e cada ponto do anteparo onde se forma o padrão de *speckle*. Por isto as fases relativas das frentes de onda mudam, alterando interferências entre elas e conseqüentemente o padrão de *speckle*. Isto é percebido como uma mudança da forma e do brilho dos grãos de *speckle* e acontece, para uma dada variação da condição de iluminação, de maneira tanto mais pronunciada quanto mais rugosa for a superfície.

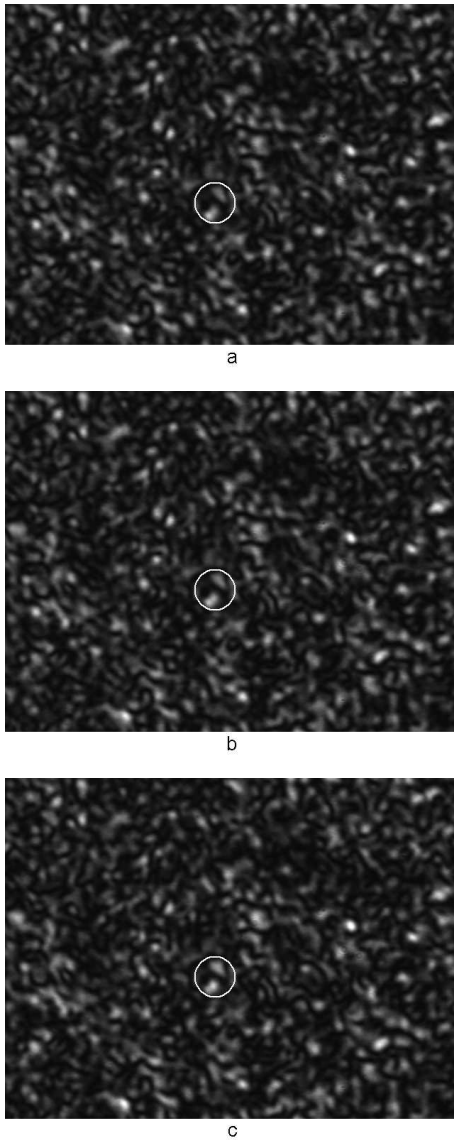


Figura 4. Exemplo de seqüência de padrões de speckle. Os três padrões acima foram obtidos com a mesma amostra. Observe-se a gradual alteração de forma e brilho dos grãos de speckle destacados por um círculo. Na figura (a), tomada como referência, o ângulo de incidência da iluminação era de $22^{\circ}30'$. Na figura (b) este ângulo foi alterado para $22^{\circ}50'$; o coeficiente de correlação entre esta figura e a de referência é de 0,985347. A figura (c) foi obtida com ângulo de incidência de $23^{\circ}30'$, e apresenta correlação de 0,862461 com a figura (a).

As alterações da condição de iluminação podem ser realizadas pela mudança do comprimento de onda utilizado [5] [6], pela mudança do índice de refração do meio onde a luz se propaga ou pela mudança do ângulo de incidência do feixe. Neste trabalho utilizamos a técnica baseada na mudança do ângulo de incidência, a qual é chamada de Correlação Angular de Speckle (que passaremos a abreviar por CAS). Na CAS, após o registro do padrão de speckle de referência (condição de iluminação inicial), fazemos sucessivas mudanças do ângulo de incidência e registramos os padrões de speckle obtidas para cada uma delas. Para comparação com a imagem de referência é calculada

a correlação de cada uma das imagens de padrão de speckle com a imagem inicial. Ao final do processo temos uma coleção de valores de correlação correspondentes às diversas mudanças de ângulo de incidência, que podem ser plotados em um gráfico ao qual é feito o ajuste de uma curva teórica.

O registro das imagens é feito através de uma digitalização realizada por uma câmara CCD conectada a um microcomputador através de uma placa digitalizadora. Cada imagem digitalizada (seja inicial ou uma das obtidas após uma mudança do ângulo de incidência do feixe laser) é convertida em uma tabela de valores de tons de cinza (uma escala que vai de 0 a 255). Para a comparação entre a tabela correspondente à imagem de referência e cada uma das outras utilizamos o conceito de correlação usual em estatística, definido, por exemplo, por Vanin et al. [7], e calculado por

$$C = \frac{\sum_{i=1}^N (r_i - \bar{r})(x_i - \bar{x})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (r_i - \bar{r})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}} \quad (1)$$

onde C é a correlação entre as imagens, r_i são os valores de tom de cinza correspondentes aos pontos da imagem de referência (cujas médias é \bar{r}) e x_i são os valores de tom de cinza correspondentes aos pontos da imagem do padrão alterado (cujas médias é \bar{x}).

Calculada desta maneira, a correlação de duas imagens idênticas resulta 1 e a de duas imagens em que uma seja o negativo da outra resulta -1. Se as imagens são muito parecidas (ou seja, se os valores de tom de cinza da maioria dos pontos de uma são muito próximos aos valores de tom de cinza dos pontos correspondentes na segunda) o resultado do cálculo de correlação entre elas é próximo de 1, como mostrado no caso das figuras 4 (a) e (b). Já se as imagens são muito diferentes, sua correlação é próxima de zero.

Para estabelecer a relação entre a rugosidade da superfície e a correlação entre os padrões de speckle partimos de uma equação deduzida por Rebollo [8] et al. [9] a partir do trabalho de Goodman [10] a respeito das propriedades estatísticas dos padrões de speckle e dos estudos de Beckmann et Spizzichino [11] sobre o espalhamento de ondas eletromagnéticas por superfícies rugosas e de Lèger [12] et al. [13] sobre a medição de rugosidade usando a técnica de correlação de speckle.

A dedução de Rebollo é iniciada com a expressão de Beckmann para a distribuição de amplitudes observada em determinada direção para uma onda plana coerente espalhada por uma superfície rugosa

$$A(\theta_2) = \frac{A_0}{2L} \int \exp[ikx(\sin\theta_1 - \sin\theta_2) + k\xi(x)(\cos\theta_1 + \cos\theta_2)] dx \quad (2)$$

onde $A(\theta_2)$ é a distribuição de amplitudes observada sob o ângulo de espalhamento θ_2 ; A_0 é a amplitude da onda plana coerente incidente; $2L$ é o tamanho da pupila iluminada sobre a superfície (Rebollo trabalha no caso unidimensional); $k(= 2\pi/\lambda)$ é o número de onda da luz incidente; x é a coordenada no plano da superfície; θ_1 é o ângulo de incidência

da luz sobre a superfície rugosa; $\xi(x)$ é a distribuição de alturas da superfície rugosa.

A partir desta distribuição de amplitudes pode-se demonstrar [9] que a correlação entre tais amplitudes obedece a

$$C_A(\theta_2, \theta_2 + \delta\theta_2) = \text{sinc}(\Delta v_x L) e^{-\frac{\sigma^2}{2} \Delta v_z^2} \quad (3)$$

onde σ é o desvio padrão da distribuição de alturas $\xi(x)$ (esta é a medida de rugosidade que obteremos); $\delta\theta_2$ é a alteração do ângulo de observação do padrão de *speckle* efetuada e

$$\Delta v_x = k[\text{sen}\theta_1(\cos\delta\theta_1 - 1) - \text{sen}\theta_2(\cos\delta\theta_2 - 1) + \cos\theta_1 \text{sen}\delta\theta_1 + \cos\theta_2 \text{sen}\delta\theta_2] \quad (4)$$

e

$$\Delta v_z = k[\cos\theta_1(1 - \cos\delta\theta_1) + \cos\theta_2(1 - \cos\delta\theta_2) + \text{sen}\theta_1 \text{sen}\delta\theta_1 + \text{sen}\theta_2 \text{sen}\delta\theta_2]. \quad (5)$$

Usando o fato de que os deslocamentos angulares realizados durante a medição são pequenos, as expressões acima podem ser bastante simplificadas. Se além disto impusermos a condição

$$\text{sinc}(\Delta v_x L) = 1 \quad (6)$$

para que a correlação não dependa do tamanho do diafragma, teremos

$$\begin{aligned} \Delta v_x &= 0 \\ \Rightarrow \delta\theta_2 &= \frac{\cos\theta_1}{\cos\theta_2} \delta\theta_1. \end{aligned} \quad (7)$$

Assim obtemos a expressão

$$C_A(\theta_2, \theta_2 + \delta\theta_2) = e^{-\frac{\sigma^2}{2} \left[k \frac{\text{sen}(\theta_1 + \theta_2)}{\cos\theta_2} \delta\theta_1 \right]^2}. \quad (8)$$

Esta equação expressa a correlação entre as distribuições de amplitudes espalhadas por uma superfície rugosa sob dois ângulos de incidência ligeiramente diferentes da iluminação. Os meios de detecção da luz habitualmente utilizados registram a intensidade luminosa e assim precisamos conhecer a correlação entre as distribuições de intensidades espalhadas pela superfície. Lèger [12] mostra que

$$C_I(\theta_2, \theta_2 + \delta\theta_2) = [C_A(\theta_2, \theta_2 + \delta\theta_2)]^2 \quad (9)$$

o que em nosso caso conduz a

$$C_I(\theta_2, \theta_2 + \delta\theta_2) = e^{-\sigma^2 \left[k \frac{\text{sen}(\theta_1 + \theta_2)}{\cos\theta_2} \delta\theta_1 \right]^2}. \quad (10)$$

Rebollo leva em consideração que realiza as medições tomando o padrão de *speckle* espalhado na direção de reflexão (ou seja, usando $\theta_1 = \theta_2$). Argumenta ainda que por girar a amostra para fazer variar o ângulo de incidência deve-se considerar

$$\delta\theta_2 = 2\delta\theta_1. \quad (11)$$

Assim chega à expressão

$$\rho_I = e^{-\sigma^2 k^2 (4 \text{sen}\theta \delta\theta)^2} \quad (12)$$

onde ρ_I é a correlação entre os padrões de *speckle* tomados com alteração de $\delta\theta$ do ângulo de incidência.

Todavia, verificamos que com os primeiros dados experimentais obtidos, a expressão (12) acima dava resultados incoerentes, o que nos conduziu à sua revisão. Nesta revisão encontramos um equívoco na argumentação que conduziu à equação (11), que corrigida ficaria

$$\delta\theta_2 = \delta\theta_1 \quad (13)$$

conduzindo a seguir a

$$\rho_I = e^{-\sigma^2 k^2 (2 \text{sen}\theta \delta\theta)^2} \quad (14)$$

expressão que passamos a utilizar desde então, com muito maior sucesso. Observe-se que, exceto σ , todas as variáveis do lado direito da expressão (14) estão determinadas pela montagem experimental. Assim, para ajustá-la aos dados obtidos em uma medição temos de variar o parâmetro σ . Deste modo, o valor que fornece o melhor ajuste é tomado como valor da rugosidade da superfície sob exame.

3 Materiais e Métodos

Para a realização das medições montamos o sistema ilustrado nas figuras 5 (foto) e 6 (esquema).

As características e funções dos componentes são:

1. Fonte de laser (632,8nm) de 10mW. Seu feixe ilumina um círculo de aproximadamente 2mm de diâmetro sobre a superfície a ser medida.
2. Polarizadores para controle da intensidade do feixe laser.
3. Diafragma íris para minimizar a incidência de laser espalhado por outros componentes sobre a amostra.
4. Mesa giratória de goniômetro para controle do ângulo de incidência do feixe sobre a amostra e do ângulo de observação do padrão de *speckle*.
5. Porta-amostras sobre deslocadores horizontais, para posicionamento da região de interesse da amostra sobre o eixo de rotação da mesa giratória e sob o feixe laser.
6. Câmara CCD utilizada para captação dos padrões de *speckle*.
7. Microcomputador com placa digitalizadora utilizado para o registro dos padrões de *speckle* e para realização dos cálculos de correlação e de ajuste da curva teórica aos pontos experimentais.

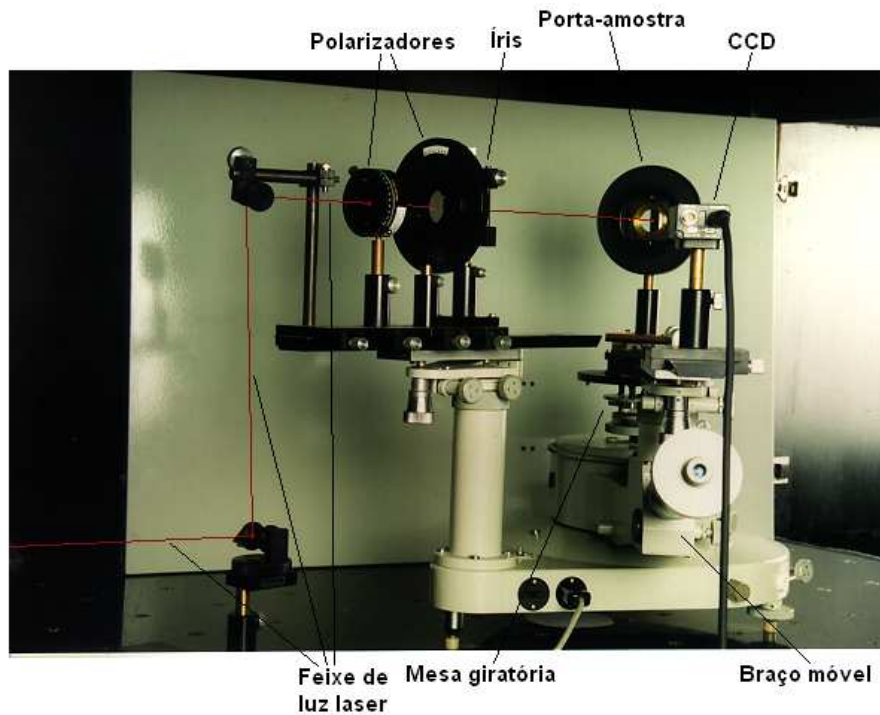


Figura 5. Foto do arranjo experimental para medição de rugosidade por CAS.

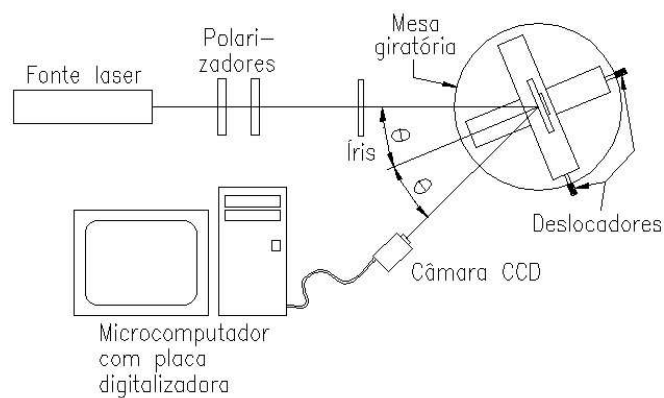


Figura 6. Esquema do arranjo experimental da figura 5.

O procedimento de medição pode ser descrito de maneira sucinta através dos seguintes passos:

- a) registro da imagem inicial (imagem de referência) do padrão de *speckle*;
- b) aplicação de rotação de um pequeno ângulo ($\delta\theta$), da ordem de $10'$, à amostra;
- c) rotação da câmera CCD de um ângulo ($2\delta\theta$) em torno do eixo de rotação da amostra;
- d) registro de nova imagem do padrão de *speckle*;
- e) cálculo da correlação entre a nova imagem e a imagem de referência;

f) repetição das etapas b) a e) até que se obtenha outros pontos experimentais para o ajuste da expressão teórica;

g) ajuste da curva teórica aos dados experimentais, determinando o parâmetro de rugosidade.

Atualmente, as medições são realizadas com movimentação manual do goniômetro para realização das alterações de ângulos de incidência e de observação do padrão de *speckle*. Isto as torna relativamente demoradas e sujeitas a erros de operação. Dependendo da quantidade de pontos experimentais tomada (geralmente entre cinco

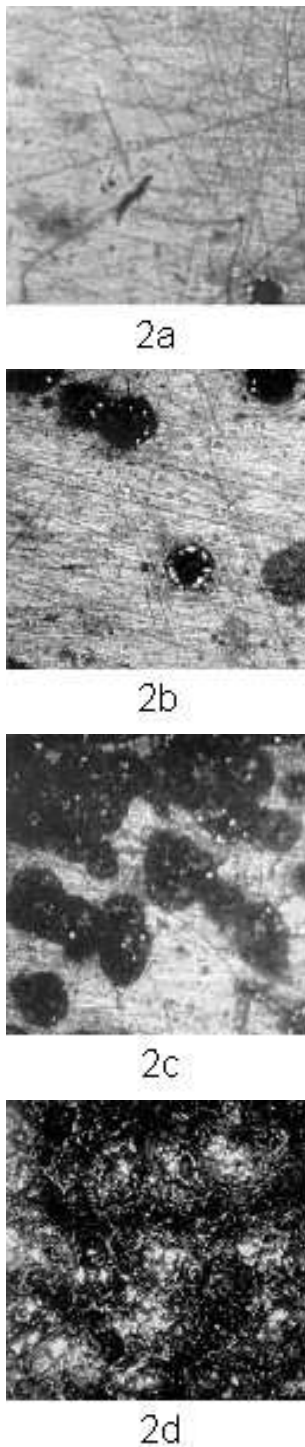


Figura 7. Fotos de amostras obtidas por eletro-erosão com diferentes graus de corrosão. 2a: 1%; 2b: 10%; 2c: 60%; 2d: 100%.

e quinze), a aquisição pode demorar de vinte minutos a uma hora, aproximadamente. Pretendemos melhorar sensivelmente este tempo através da construção de nova montagem experimental na qual os deslocamentos angulares sejam realizados de forma automatizada, utilizando sistema de motor de passo e controlada pelo computador. Com isto esperamos reduzir o tempo médio de aquisição para aproximadamente cinco minutos.

4 Resultados

Uma das situações às quais aplicamos a CAS foi o estudo da usinagem por eletro-erosão como modelo de ataque de superfícies por corrosão (pitting corrosion) [14].

Preparamos amostras especialmente para este fim, com diferentes tempos e diversas correntes de aplicação de eletro-erosão, de modo a simular variados graus de corrosão.

Medindo-as através da CAS pudemos mostrar que com o aumento do grau de corrosão das superfícies havia um aumento de suas rugosidades.

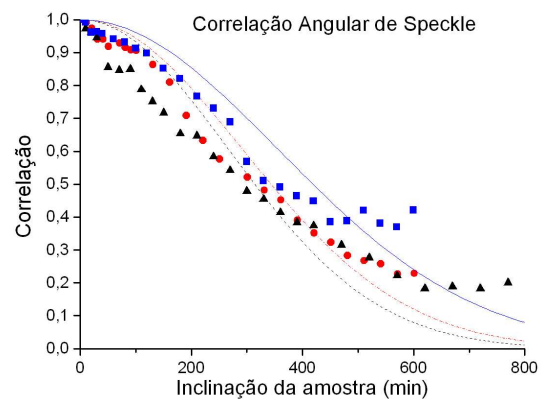


Figura 8. Correlação de intensidades de *speckle* vs. inclinação da amostra para superfícies com 0 a 5% de corrosão (quadrado = 0%, círculo = 1% e triângulo = 5%). As linhas representam as curvas teóricas que melhor aproximam os pontos experimentais.

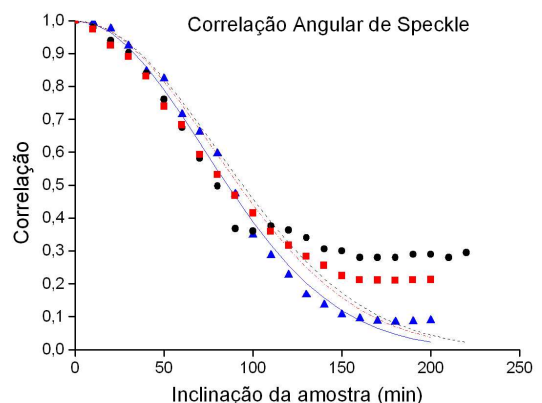


Figura 9. Correlação de intensidades de *speckle* vs. inclinação da amostra para superfícies com 10 a 40% de corrosão (círculo = 10%, quadrado = 20% e triângulo = 40%). As linhas representam as curvas teóricas que melhor aproximam os pontos experimentais.

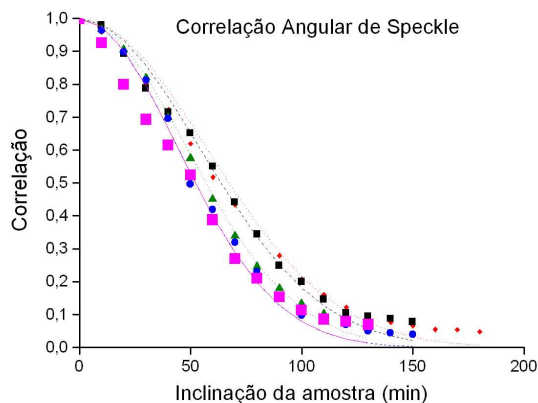


Figura 10. Correlação de intensidades de *speckle* vs. inclinação da amostra para superfícies com 50 a 100% de corrosão (losango = 50%, quadrado menor = 60%, triângulo = 80%, círculo = 100% e quadrado maior = 100%). As linhas representam as curvas teóricas que melhor aproximam os pontos experimentais.

Os valores do parâmetro σ (desvio padrão das alturas) obtidos pelo ajuste das curvas aos pontos experimentais nos gráficos acima estão na tabela 1.

Tabela 1. Rugosidade (σ) vs. razão da superfície eletro-erodida (s).

s	$\sigma [\mu m]$
0	$0,90 \pm 0,05$
$0,010 \pm 0,001$	$1,10 \pm 0,05$
$0,050 \pm 0,005$	$1,2 \pm 0,1$
$0,10 \pm 0,01$	$4,0 \pm 0,2$
$0,20 \pm 0,02$	$4,1 \pm 0,2$
$0,40 \pm 0,04$	$4,4 \pm 0,3$
$0,50 \pm 0,05$	$5,6 \pm 0,3$
$0,60 \pm 0,04$	$5,9 \pm 0,3$
$0,80 \pm 0,02$	$6,6 \pm 0,3$
1	$7,2 \pm 0,4$

Analisando os resultados obtidos foi possível propor um modelo para descrição da superfície, no qual sua rugosidade como um todo é dada pela equação (15):

$$\sigma^2 = \sigma_0^2 + (1 - s)\sigma_1^2 + s\sigma_2^2 \quad (15)$$

na qual s é a razão entre a área eletro-erodida e a área total; σ_1 é a rugosidade da área não erodida; σ_2 é a rugosidade da área erodida e σ_0 é calculada através de

$$\sigma_0 = p\sqrt{s(1 - s)} \quad (16)$$

onde p representa a profundidade das crateras erodidas.

Usando os dados da tabela 1 obtivemos o gráfico abaixo.

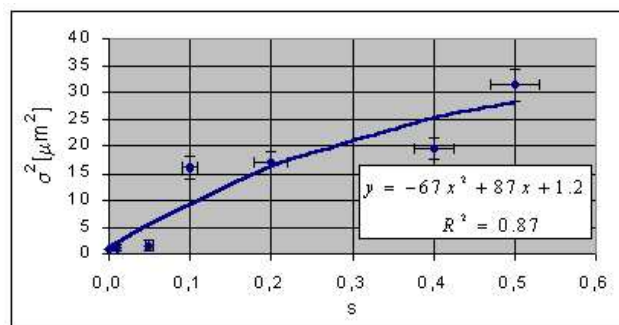


Figura 11. Rugosidade ao quadrado vs. fração da área eletro-erodida. Os losangos indicam os pontos experimentais e a linha indica a curva a eles ajustada.

Da parábola ajustada aos dados pudemos deduzir os parâmetros:

$$p = (8,2 \pm 0,5)\mu m$$

$$\sigma_1 = (1,1 \pm 0,1)\mu m$$

$$\sigma_2 = (4,6 \pm 2)\mu m.$$

Tais valores estão em muito bom acordo com os valores estimados para a profundidade das crateras (p), para a rugosidade inicial da chapa com acabamento industrial (σ_1) e para a rugosidade resultante no interior das crateras erodidas (σ_2).

Aplicamos também a CAS para o monitoramento do desgaste de cilindros de laminação através da medição da rugosidade resultante nas chapas por eles laminadas. A idéia era verificar através da rugosidade resultante nas chapas o momento em que o desgaste dos cilindros provocasse diminuição de sua rugosidade, indicando necessidade de re-trabalho de sua superfície.

Na laminação a frio ocorrem deformações na estrutura cristalina do metal, que tem seus grãos distorcidos e fragmentados. A superfície do material também é alterada e normalmente é perceptível a olho nu uma orientação que denuncia a direção de laminação. Sendo assim, as amostras laminadas com as quais trabalhamos afastavam-se substancialmente da hipótese utilizada no desenvolvimento teórico da CAS, segundo a qual as alturas da superfície espalhadora obedeceriam a uma função densidade de probabilidade gaussiana. Acreditamos que esta tenha sido a causa da divergência que pudemos observar entre alguns de nossos conjuntos de pontos experimentais e as curvas teóricas que melhor os ajustavam. Apesar disto, para algumas das amostras do mesmo lote, o ajuste dos pontos experimentais às curvas teóricas foi muito bom, como pode ser visto nos gráficos da Fig. 12.

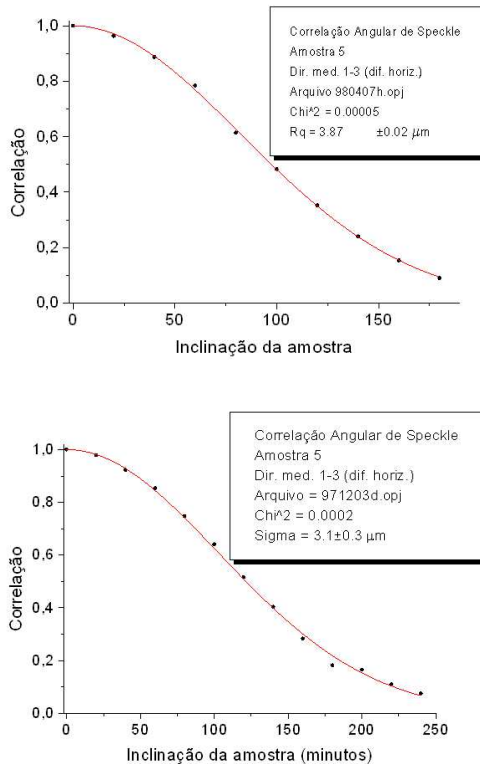


Figura 12. Para algumas das amostras de chapas cuja rugosidade foi medida por CAS os pontos experimentais ficaram bastante próximos das curvas teóricas que melhor os ajustam.

Apresentamos abaixo uma tabela com os resultados das medições de rugosidade obtidas através da CAS e a rugosidade R_q medida com um perfilômetro mecânico Surtronic 3+, da Rank Taylor Robson, para algumas das chapas laminadas.

Tabela 2. Resultados de medições de desvio padrão das alturas através da CAS e rugosidade R_q medida com perfilômetro mecânico, de algumas amostras de chapas laminadas a frio.

Número da amostra	Direção de medição	Resultado CAS [μm]	R_q [μm]
4	transv.	2,87 ± 0,15	2,90 ± 0,17
	long.	3,09 ± 0,15	3,05 ± 0,14
5	transv.	3,87 ± 0,04	2,75 ± 0,33
	long.	4,87 ± 0,25	2,78 ± 0,16
6	transv.	3,24 ± 0,06	2,79 ± 0,16
	long.	3,72 ± 0,06	2,91 ± 0,25
7	transv.	3,53 ± 0,08	2,74 ± 0,19
	long.	3,93 ± 0,06	2,96 ± 0,30
8	transv.	2,84 ± 0,17	2,68 ± 0,22
	long.	3,18 ± 0,15	2,72 ± 0,15
9	transv.	3,56 ± 0,11	2,60 ± 0,21
	long.	3,64 ± 0,09	2,87 ± 0,21

Os resultados mostraram que a rugosidade não sofreu variação significativa com a evolução da campanha do cilindro. Apesar disto, pudemos verificamos que os diferentes

métodos de medida de rugosidade apresentaram a mesma tendência com o estágio de campanha do cilindro.

Uma outra aplicação que fizemos da CAS foi numa pesquisa na área da Odontologia. Tratou-se da avaliação da rugosidade de restaurações dentais realizadas, no caso de nosso estudo, com ligas metálicas (amalgamas de prata) [15]. Ainda que não pareça óbvio imediatamente, a rugosidade das superfícies da cavidade oral desempenha importante papel para a saúde bucal. Superfícies rugosas propiciam maior facilidade para a adesão e estagnação de bactérias, as quais formam placas bacterianas que são a principal causa do início e do desenvolvimento de doenças periodontais.

No início do desenvolvimento deste trabalho passamos grandes dificuldades experimentais para a realização das medições. As principais referiam-se à não estabilidade dos padrões de *speckle* observados. Quando se aplica a CAS é necessário registrar um padrão de *speckle* inicial de referência, com o qual são comparados outros padrões registrados após a mudança do ângulo de incidência da iluminação sobre a amostra, conforme explicamos anteriormente. Mas quando não se realiza qualquer alteração na condição de iluminação o padrão de *speckle* é estático. Com as amostras de amalgama com as quais trabalhávamos tal não ocorria, senão após longos períodos em que elas ficassem em posição de medição, já sob incidência do feixe laser. Depois de diversas tentativas de mudanças na forma de fixação dos corpos de prova descobrimos que montando-os sobre uma placa de acrílico com furos, ao invés de bases de resina que havíamos utilizado até então, o problema praticamente desaparecia.

As medições buscaram comparar a rugosidade resultante do uso de algumas ligas e de alguns tratamentos para acabamento das superfícies distintos. Foram comparadas três ligas de prata para amalgama, listadas na tabela 3.

Cada um dos corpos de prova foi amalgamado (“misturado”), condensado em um furo de 5mm de diâmetro por 3mm de profundidade preparado na placa de acrílico, esculpido e brunido. Para as amostras de controle este foi o final da preparação. Um segundo grupo de amostras (de cada uma das ligas) foi submetido, 24h após a preparação, a polimento com Amalgloss (Dentsply). Finalmente um terceiro grupo (também para cada uma das ligas) foi submetido, também 24h após a preparação, a polimento com pasta fina de pedra pomes (PASOM - Indústria e Comércio de Materiais Restauradores).

Em cada um dos três grupos havia nove corpos de prova de cada um dos três materiais utilizados, totalizando 81 amostras. Realizamos medições em três pontos de cada uma delas, perfazendo 243 medições. O resumo dos resultados pode ser visto na tabelas 4 e 5 abaixo.

Tabela 3. Ligas para amálgama utilizadas no trabalho.

Material	Tipo	No. do lote	Fabricante	Composição
Dispersalloy	liga do tipo mistura	990426	Dentsply-Caulk	Ag, Sn, Cu, Zn
Permite C	liga do tipo mistura	000418301	Southern Dental Industries (SDI), Melbourne, Australia	Ag, Cu, Zn, Sn, In
GS 80	liga do tipo mistura	990908301	Southern Dental Industries (SDI), Melbourne, Australia	Ag, Sn, Cu, Zn

Tabela 4. Médias dos resultados das diferentes ligas para amálgama (P = Permite C; D = Dispersalloy; G = GS 80) e a probabilidade obtida pelo teste de Tukey ao nível de 95% de confiança. Não há diferença estatisticamente significativa entre as médias das ligas.

Amálgama	P	D	G
Médias [μm]	$3,6 \pm 1,7$	$3,9 \pm 1,3$	$4,1 \pm 1,9$
P		0,69	0,35
D			0,83

Tabela 5. Médias dos resultados dos diferentes tratamentos (B = brunimento apenas; BP = brunimento seguido de polimento com pasta fina de pedra pomes; BA = brunimento seguido de polimento com Amalgloss) e a probabilidade obtida pelo teste de Tukey ao nível de 95% de confiança. A diferença de rugosidade do tratamento de brunimento (B) para os demais é estatisticamente significativa, mas não há diferença estatisticamente significativa entre as médias dos dois outros tratamentos.

Tratamento	B	BP	BA
Médias [μm]	$5,2 \pm 1,5$	$2,9 \pm 1,4$	$3,5 \pm 1,1$
B		0,05*	0,05*
BP			0,32

5 Conclusão

A CAS mostrou ser uma técnica promissora para a medição de rugosidade (e corrosão) de uma grande gama de superfícies, e a variedade de situações aplicadas permite afirmar que, através de mais algum aperfeiçoamento, ela poderá tornar-se uma importante ferramenta para a caracterização da microtopografia para inúmeras aplicações.

No procedimento de medição da CAS, a superfície in-terage apenas com o feixe de laser que a atinge, o que faz com que não ocorram os danos causados pelas medições realizadas com perfilômetros de agulha de diamante. Isto faz dela uma alternativa muito interessante nos casos em que o material a ser medido é susceptível a riscos.

Ficou demonstrada a possibilidade de se estender as aplicações da CAS além da simples caracterização de rugosidade, pois processos que envolvam alterações de superfícies podem ser monitoradas através dela. No exemplo citado, a técnica mostrou ser capaz de detectar corrosões já a partir de 1% de área atingida.

Ao realizarmos as medições de chapas laminadas, além do bom acordo com as medições realizadas através de perfilômetros mecânicos, observamos que os padrões de *speckle* e os conjuntos de dados experimentais apresentaram características diferenciadas, inspirando a expectativa de obtenção de informações adicionais sobre as superfícies.

O trabalho de medição da rugosidade de restaurações dentárias de ligas de amálgama permitiu mostrar a viabilidade de se utilizar a CAS para comparação de diferentes materiais e tratamentos, inclusive em situações nas quais métodos convencionais de medição esbarrariam em dificuldades como o pequeno tamanho das amostras.

A maioria dos parâmetros de rugosidade habitualmente utilizados foram definidos a partir do perfil de rugosidade. Sendo assim, sua concepção já parte de uma descrição simplificada, pois uma superfície que é na realidade tridimensional passa a ser representada de forma bidimensional (através de alturas e distâncias que compõe o perfil) e a partir desta representação é que são calculados os parâmetros. Por isso, quando se pretende conseguir uma descrição mais completa, é necessário realizar uma série de medições, traçando perfis em pelo menos duas direções perpendiculares. No caso da CAS ocorre algo diferente. Como o próprio fenômeno da formação do *speckle* envolve as características tridimensionais da superfície espalhadora, uma única medição carrega informação de toda a região atingida pela luz coerente. Isto faz com que esta técnica possa ser utilizada com grande vantagem nos casos em que o interesse é a caracterização da superfície de maneira global.

Acreditamos que agora, para que se estabeleça a utilidade prática do método, é fundamental sua utilização intensiva em variadas aplicações. Somente assim poderão ser estabelecidos paradigmas e uma noção intuitiva do significado dos valores obtidos através das medições por CAS, uma vez que as escalas de medição de rugosidade têm naturezas muito diversas e complexas, as quais não permitem simples comparações diretas ou conversões usando fatores de escala. Será necessário, então, realizar muitas medições e a partir dos resultados obtidos estabelecer empiricamente faixas de valores adequados para cada aplicação. Certamente este tipo de trabalho também poderá nortear o estabelecimento de normas para procedimentos de medição da CAS.

6 Agradecimentos

RDPJ agradece ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro concedido através de bolsa do programa RHAÉ. Os autores agradecem às importantes discussões, críticas, sugestões e participações nos procedimentos experimentais prestados pelo Prof. Néstor Gustavo Gaggioli (CNEA - Argentina), pelo Prof. Amilton Sinátora (LFS - Depto. de Engenharia Mecânica da EPUSP) e pela Profa. Cláudia Maria Coelho Alves (Depto. de Odontologia - UFMA).

Referências

- [1] Whitehouse, D. J. *Handbook of Surface Metrology*. Bristol, UK, Institute of Physics Publishing Ltd., 1994.
- [2] Bennett, J. M.; Mattson, L. *Introduction to Surface Roughness and Scattering*. Washington, D. C., USA, Optical Society of America, 1989.
- [3] Kadono, H.; Hoshino, S.; Toyooka, S. Generation of contrast-enhanced speckle field and its application to surface roughness measurement. Proc. SPIE, vol. 3729, p. 359-364, Selected Papers from International Conference on Optics and Optoelectronics '98 (1999).
- [4] Paiva Jr., R. D. *Desenvolvimento de um rugosímetro a laser*. São Paulo, Instituto de Física da Universidade de São Paulo, 2002. Dissertação de mestrado.
- [5] Prazak, D.; Ohlidal, M. Laser speckle spectral correlation and surface roughness. Proc. SPIE, vol. 4356, p. 339-346, 12th Czech-Slovak-Polish Optical Conference on Wave and Quantum Aspects of Contemporary Optics (2001).
- [6] Patzelt, S.; Ciossek, A.; Lehmann, P.; Schoene, A. Parametric optical surface roughness measurement by means of polychromatic speckle autocorrelation. Proc. SPIE, vol. 3426, p. 124-133, Scattering and Surface Roughness II (1998).
- [7] Vanin, V. R.; Gouffon, P.; Helene, O. A. *Tópicos Avançados em Tratamento Estatístico de Dados em Física Experimental - Notas de aula*. São Paulo, Laboratório do Acelerador Linear, Instituto de Física da Universidade de São Paulo, 1998.
- [8] Rebollo, M. A. *Estudio de Superficies Rugosas, Mediante el Analisis del Valor Medio de la Intensidad Dispersada y la Correlacion de Speckles*. La Plata, Argentina, Universidad Nacional de La Plata, 1995. Tesis de Doctorado.
- [9] Rebollo, M. A. *et al.* Medicion de la Rugosidad de Superficies por Medio de la Correlacion Digital de Speckles. In: REUNIN DE LA ASOCIACION FISICA ARGENTINA, 76a. *Anales de la...* Tucuman, Argentina, 1991. p. 181-184.
- [10] Goodman, J. W. Statistical Properties of Laser Speckle Patterns. In: Dainty, J. C. (ed.) *Laser Speckle and Related Phenomena*. Berlin, Germany, Springer-Verlag, 1984.
- [11] Beckmann, P.; Spizzichino, A. *The scattering of electromagnetic waves from rough surfaces*. London, Pergamon Press, 1963.
- [12] Léger, D. *Deux Methodes de Mesure de Rugosités par correlation de Speckles*. Paris, França, Université de Paris-SUD, 1976. Tese de Doutorado.
- [13] Léger, D.; Mathieu E.; Perrin J. C. Optical Surface Roughness Determination Using Speckle Correlation Technique. *Applied Optics*. **14**, no. 4, p. 872-877 (April 1975).
- [14] Paiva Jr., R. D. *et al.* Study of the electro-erosion process by the analysis of speckle correlation. *Insight*. **43**, p. 235-240 (April 2001).
- [15] Alves, C. M. C. *Estudo "In Vitro" da Rugosidade Superficial de Três Ligas de Amálgama Através do Método de Correlação Angular de "Speckle"*. São Paulo, Faculdade de Odontologia da Universidade de São Paulo, 2001. Tese de doutorado.