

TÉCNICAS DE ANÁLISE DE SUPERFÍCIES⁽¹⁾

Alejandro Torc
Amilton Sinator

1998
Serviço de Bibliotecas
Biblioteca de Engenharia Mecânica, Naval e Oceânica

RESUMO

São apresentados de forma simplificada um conjunto de métodos de avaliação de superfícies os quais são empregados amplamente a nível industrial e de laboratório. A descrição dos métodos experimentais vem precedida da definição de algumas das quantidades a serem medidas, enfatizando-se os parâmetros escalares de uso mais generalizado, e também funções estatísticas clássicas. São apresentados também alguns exemplos e possíveis aplicações da maioria das técnicas, a partir de uma classificação funcional, tanto de equipamentos quanto dos procedimentos de análise dos dados experimentais.

Palavras Chave: Rugosidade, Apalpadores mecânicos, Funções de distribuição, Apalpadores ópticos. Técnicas ópticas

⁽¹⁾Trabalho a ser apresentado no Work Shop Recope "Desafios, Experiências e Expectativas sobre Rugosidade de Chapas para a Indústria Automobilística". São Paulo, 21 de Outubro de 1998.

⁽²⁾ Eng. Mecânico Universidad Nacional de Colombia, Doutorando da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. E-mail: atorob@usp.br

⁽³⁾ Prof. Associado. Departamento. Eng. Mecânica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. E-mail: sinatora@usp.br

semelhante às dimensões da peça. Porém, praticamente todos os equipamentos de medição disponíveis no mercado realizam um processo de filtragem do sinal registrado, e mesmo que usem o critério da área total nula, ao final entregam sempre um perfil com uma linha média totalmente reta. A posição de um ponto no perfil em relação à linha média está definido pela quantidade $y(x)$, que pode ser positiva ou negativa, sendo x a posição na direção horizontal.

Tecnicamente, se entende por *irregularidade* qualquer elevação ou depressão da superfície desde sua linha média, e a amplitude individual de cada irregularidade está dada precisamente pelo valor absoluto da sua altura ou profundidade $|y|$. Os tipos de irregularidades são definidos segundo a normalização DIN¹⁻³ como:

Irregularidades de 1a ordem: São aquelas características da configuração de uma superfície associadas com toda sua extensão; por exemplo, as que têm a ver com erros de usinagem como deflexão da ferramenta ou fixação defeituosa da peça.

Irregularidades de 2a à 5a ordem: São as que podem ser estudadas mediante a análise de uma porção estatisticamente representativa da superfície, usando técnicas mecânicas, eletromecânicas ou ópticas⁴⁻⁶. Essas irregularidades são avaliadas mediante *parâmetros escalares e funções estatísticas* que dão conta de suas magnitudes, de sua forma ou de ambas. Os de maior importância e uso são indicadas a seguir.

1.2. Parâmetros escalares de altura, separação e forma

Os *parâmetros de altura* informam acerca da separação dos pontos do perfil respeito à linha média. São classicamente reconhecidas duas quantidades fundamentais:

- **Rugosidade média (R_a):**

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |y(x)| dx = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |Y_i| \quad (1)$$

- **Rugosidade média quadrática (R_{ms} ou R_q):**

$$R_{ms} = \sigma_h = R_q = \left[\frac{1}{L} \int_0^L y^2(x) dx \right]^{1/2} = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i^2 \right]^{1/2} \quad (2)$$

Mas também são definidos muitos outros parâmetros de altura, por exemplo:

- **Máxima distância individual pico-vale(R_t):** Se define, para um comprimento de amostragem dado (L), como a distância vertical entre o pico mais alto e o vale mais profundo.

$$R_t = R_y = |y_{\max} - y_{\min}| \quad (3)$$

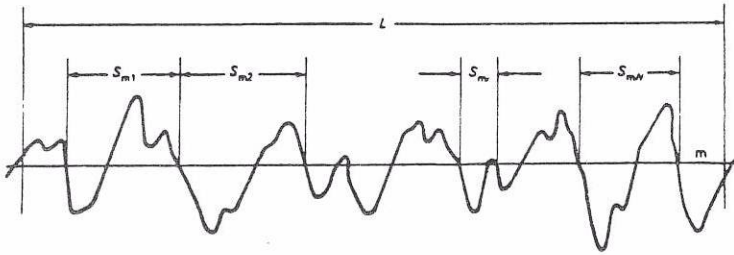
- **Altura de 10 pontos(R_z):** Se define, para um comprimento de amostragem dado, como a média aritmética dos valores absolutos das amplitudes dos 5 maiores picos e os 5 mais profundos vales.

$$R_z = \frac{1}{5} \left[\sum_{i=1}^5 |y_{pi}| + \sum_{i=1}^5 |y_{vi}| \right] \quad (4)$$

Note-se que estes parâmetros podem ser calculados a partir do conhecimento da função contínua $y(x)$ que define o perfil, mas na prática a informação que geralmente se tem é um conjunto de N dados de altura y_i em relação à linha média. Esta forma de cálculo é válida também para todos os outros parâmetros que serão apresentados abaixo.

Por outro lado, os *parâmetros de separação* indicam o “tamanho” das irregularidades na direção horizontal; ou seja, informam acerca dos períodos espaciais característicos das irregularidades, independentemente das suas magnitudes verticais. Entre os mais importantes estão:

- **Ondulação (Waviness).** É o parâmetro usado para descrever a presença de irregularidades de *segunda ordem*; Uma irregularidade é classificada como ondulação quando se repete na superfície em distâncias muito maiores do que sua amplitude. Expressado em termos da teoria de Fourier^{6,7}, é a *irregularidade correspondente às baixas frequências espaciais do perfil*
- **Espaçamento médio entre picos (S_m):** É definido como a média das distâncias entre pares consecutivos de pontos de corte da linha média, com trechos de tangente negativa do perfil. A figura 2 ilustra a forma como S_m é medido.



$$S_m = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S_{m_i} \quad (5)$$

Figura 2. Princípio de medição de S_m

O valor inverso do espaçamento médio (S_m), conhecido como **Densidade de picos (Dc)**, também é muito útil para descrever processos de conformação de peças. A densidade de picos pode ser calculada não somente a partir das interseções do perfil com a linha média, mas também a partir das interseções do perfil com qualquer linha horizontal, definida arbitrariamente pelo experimentador; nesse caso, claramente o valor de Dc não é numericamente igual ao inverso do espaçamento médio entre picos (S_m), já que este último só está definido a partir da linha média.

Os *parâmetros de forma*, por outra parte, integram informações adicionais à amplitude e a separação, sendo muito úteis na caracterização de superfícies para aplicações industriais específicas como por exemplo em processos de laminação de chapas metálicas^{7,8,9} ou no controle de qualidade na indústria automobilística¹⁰. Entre os mais importantes se encontram:

- **Assimetria(Rsk):**

$$R_{sk} = \frac{1}{N R_q^3} \sum_{i=1}^N y_i^3 \quad (6)$$

A assimetria permite caracterizar superfícies com *formas diferentes*, mesmo que apresentem valores iguais de parâmetros de altura e/ou separação tais como R_a ou S_m . Graficamente, a assimetria indica o desvio da distribuição estatística de alturas em relação à linha média do perfil. A figura 3 indica algumas possibilidades de uso deste parâmetro.

- Kurtose(K):

$$K = \frac{1}{NR_q^4} \sum_{i=1}^N y_i^4 \quad (7)$$

Este parâmetro (sempre positivo) indica a maior ou menor presença relativa de picos exageradamente grandes ou exageradamente pequenos no perfil. Um exemplo de aplicação é indicado na figura 3.

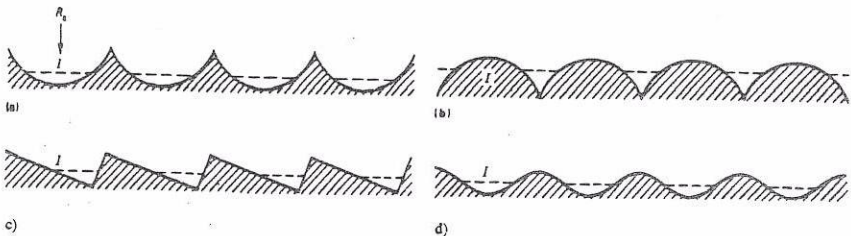


Figura 3. Uso dos parâmetros Obliquidade (R_{sk}) e Kurtose (K). O perfil a) apresenta um valor de $R_{sk} > 0$, enquanto o perfil b) tem $R_{sk} < 0$. Os perfis c) e d) têm $R_{sk} = 0$. Os 4 perfis apresentam igual R_a . Os perfis a) e b) apresentam Kurtose maior do que os perfis c) e d).⁵

1.3. Funções Estatísticas ou de Distribuição

Os parâmetros de altura, separação e forma integram informação fragmentada acerca da superfície, e geralmente, é preciso usar combinações de dois ou mais deles para fazer uma avaliação razoável das alterações superficiais devidas a um processo de conformação, de desgaste, etc. Isto fez com que fossem desenvolvidos "parâmetros" que não são um simples número, mas que são funções que contêm uma quantidade muito maior de informação, como se verá abaixo. A seguir apresentamos algumas das funções mais conhecidas referenciadas na literatura.

- Fração de Contato (Bearing ratio):

A curva de fração de contato é um indicador muito importante para avaliar processos de desgaste, ou em geral para estudar o contato entre superfícies¹¹, mostrando aproximadamente como evolui a área de contato entre dois corpos a medida em que o desgaste ocorre. A fração de contato, também chamada de "curva de Abbot - Firestone" da superfície, pode ser usada também para caracterizar a natureza do contato, elástico ou plástico, entre ela e uma

superfície lisa ideal colocada a uma separação y_i com respeito à linha média (figura 4a, 4b), e é calculada como a relação entre o comprimento do perfil que entra em contato com a superfície lisa e o comprimento total do perfil. Assim, a curva de fração de contato estabelece uma porcentagem de “comprimento de contato” para cada separação entre a superfície real e o plano liso ideal (figura 4c).

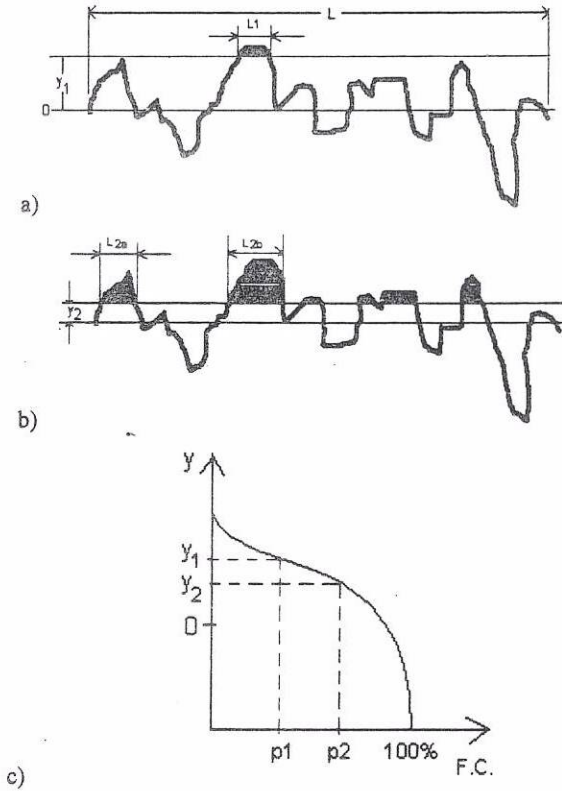


Figura 4. Construção da curva de fração de contato. $P_1=L_1 / L$; $p_2=(L_{2a}+L_{2b}) / L$

• Densidade espectral de potência(PSD(F)):

$$PSD(F) = \lim_{L \rightarrow \infty} \left[\frac{1}{L} \right] \left| \int_0^L y(x) \cdot e^{-2\pi F x} dx \right|^2 \quad (8)$$

A função de densidade espectral de potência integra uma grande quantidade de informação simultaneamente, já que indica, de um lado, as separações típicas entre características repetidas no perfil, as quais estão correlacionadas por exemplo com parâmetros como S_m .

irregularidades é indicado por um pico no espectro de Fourier⁷ (ou seja, o gráfico da função PSD(F)), como pode ver-se na figura 5.

Por outro lado, as magnitudes das irregularidades também são indicadas no gráfico da função PSD, e pode mostrar-se⁶ que a altura dos picos no espectro de Fourier é proporcional à amplitude da irregularidade relacionada.

A figura 5 mostra esquematicamente a forma típica de um espectro de Fourier, ou seja, o gráfico da magnitude da densidade espectral de potência (PSD(F)) em função das diferentes frequências espaciais presentes no perfil. As frequências espaciais são numericamente equivalentes aos inversos dos espaçamentos entre características repetidas do perfil, como será discutido na seção 2.2.1.

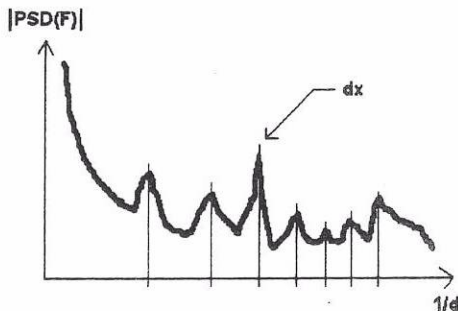


Figura 5. Esquema da forma típica de um espectro de Fourier. A posição de cada pico no espectro corresponde a uma frequência espacial dada(dx), na qual alguma característica do perfil é repetida periodicamente (uma ranura que aparece sequencialmente, picos repetidos, etc.). A amplitude de cada pico no espectro de Fourier depende da magnitude da irregularidade correspondente no perfil.

- **Autocorrelação (AC(τ)):**

A função de autocorrelação indica de maneira global as características de espaçamento do perfil, e permite diferenciar superfícies com parâmetros de altura semelhantes (por exemplo R_a ou R_q muito parecidas), mas com formas diferentes, associadas com os processos de usinagem ou de conformação em geral. A função de autocorrelação AC(τ) é definida assim:

$$AC(\tau) = \frac{C(\tau)}{R_q^2} \quad (8)$$

Onde $C(\tau)$ chama-se a autocovariância do perfil, a qual é calculada como a transformada de Fourier da função densidade espectral de potência PSD, ou seja:

$$C(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} [PSD(F)] e^{2\pi i F \tau} dF = \left(\frac{1}{N-j} \right) \sum_{i=1}^{N-j} [y(i)][y(i+j)] \quad (9)$$

Ou, numa forma intuitivamente mais simples, a autocorrelação $AC(\tau)$ se entende como a área em baixo da função que resulta de multiplicar o perfil por ele mesmo deslocado uma distância variável τ .

$$C(\tau) = \frac{1}{L} \int_0^L y(x)y(x+\tau)dx \quad (10)$$

A figura 6 mostra algumas aplicações da função de autocorrelação na caracterização de superfícies de chapas galvanizadas com diferentes processos de polimento.

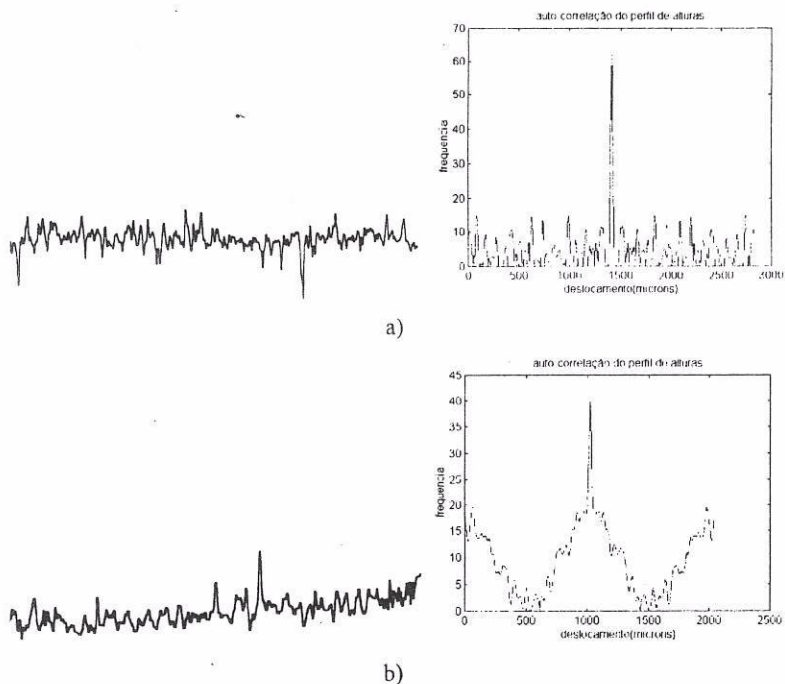


Figura 6. Curvas de autocorrelação de duas amostras com níveis de Ra semelhantes, mas com distribuição de irregularidades diferente. Note que o perfil a) têm uma menor separação média entre picos, o qual produz um gráfico de $AC(\tau)$ com muitos picos simétricos. O perfil b), por outro lado, têm uma maior separação entre picos, e além disso apresenta um erro de forma (inclinação) o qual faz com que a curva $AC(\tau)$ mude drasticamente sua forma

2. Análise de superfícies mediante apalpadores mecânicos

Os apalpadores mecânicos são os instrumentos mais usados para medir superfícies em engenharia, e registram as características da rugosidade dos objetos mediante o contato físico com eles. Esta técnica pode ser muito poderosa especialmente se os dados adquiridos são processados usando ferramentas como a análise de Fourier^{6,7}; Porém, apresenta varias deficiências^{4,5}, entre elas:

- As medições sempre são feitas ao longo de uma linha (unidimensionais), de maneira que a descrição da superfície (bidimensional) é produto de uma superposição de resultados lineares correlacionados mediante critérios arbitrários.
- O nível de precisão depende diretamente do tamanho e material da ponta de contato, e para alguns níveis de polimento muito fino, a resolução é baixa.
- A medição exige inevitavelmente o contato com a superfície, com as possíveis conseqüências nocivas que isso pode ter para ela.

2.1. Princípio de Medida e Componentes do Sistema de Medição

O princípio de medida de um apalpador mecânico varia dependendo do tipo de elemento transdutor, o qual converte o movimento da agulha (em contato com a superfície) em um sinal elétrico proporcional ao deslocamento a uma superfície de referência. A figura 7 mostra esquematicamente um dos princípios de funcionamento mais comuns, no qual, a variação na posição da agulha gera uma variação na indutância num circuito RL, e por tanto é produzido um sinal de voltagem diferencial

Também são muito usados transdutores do tipo piezelétricos, nos quais o sinal de voltagem é gerado quando o sensor (o cristal piezelétrico) é deformado pela ação da agulha. Existem ainda outros sensores mais complexos, conhecidos como LVDT (Linear Variable Differential Transformer), nos quais o sinal é corrigido eletronicamente mediante uma seqüência de processos em circuitos elétricos.

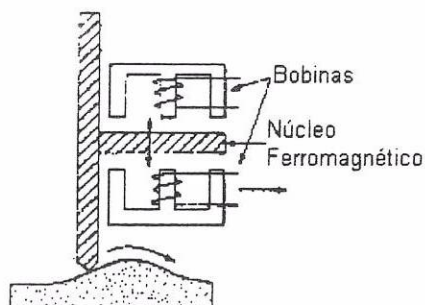


Figura 7. Princípio de funcionamento de um apalpador mecânico com transdutor indutivo⁵

É freqüente também encontrar apalpadores com guia de referência (skid), o qual permite determinar mecanicamente a superfície que vai servir de referência no registro das alturas da superfície; ao mesmo tempo, o guia funciona como um filtro passa-alto, já que as irregularidades de primeira ordem ficam eliminadas do sinal. O processo de filtragem acontece porque o perfil que é definido pelo transdutor vai depender da superfície descrita pelo guia, a qual está “suavizada” de acordo com as variações mais “grossas” da superfície, usualmente chamadas de “componentes de baixa freqüência” e que podem ser caracterizadas mediante parâmetros como a ondulação (waviness). A figura 8 mostra duas possíveis configurações para o uso do guia de referência (skid).

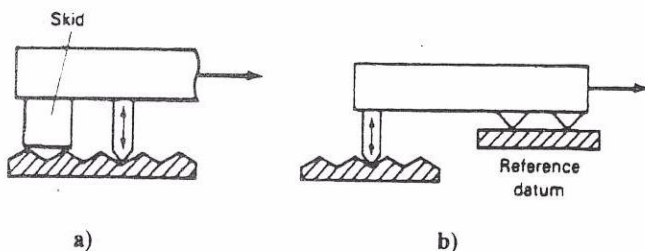


Figura 8. a) Guia de referência junto com a base do rugosímetro; neste caso o skid atua como filtro de passa-alto. b) Guia de referência posicionado numa superfície externa à superfície de medição⁵.

No processo de medição usando apalpadores mecânicos, algumas considerações são particularmente importantes:

2.1.1. Tamanho da ponta: O efeito do tamanho do apalpador é mais significativo sobre as características de espaçamento e sua forma do que sobre os parâmetros de altura típicos como *Ra*, *Ra* e *Rt*. A razão para isto consiste em que uma ponta maior age como um filtro passa-

baixo no perfil, ou seja, elimina uma grande quantidade de pequenas flutuações da superfície, como pode ver-se por exemplo na figura 9. O parâmetro Rt , ainda, é substancialmente pouco sensível às variações do tamanho do apalpador, enquanto o parâmetro Sm varia de maneira brusca com pequenas mudanças nele.

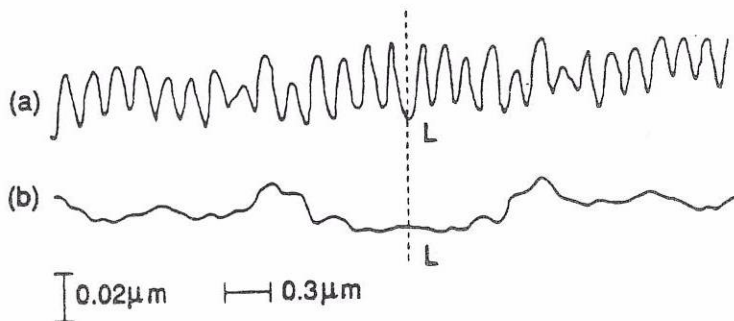


Figura 9. Efeito do tamanho da ponta do apalpador no registro de dados do perfil. a) ponta de raio $0.05\mu\text{m}$, b) ponta de raio $0.5\mu\text{m}$. Carga e comprimento de amostragem iguais nos dois casos⁵.

2.1.2. Carga de Trabalho: O efeito da carga de trabalho é mais importante ainda do que o efeito do tamanho do apalpador, porque o uso de uma carga inadequada, além de determinar um registro de dados incorreto, pode gerar danos na superfície, como se mostra na figura 10.

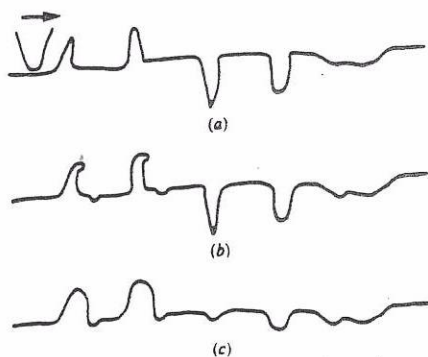


Figura 10. Efeito do uso de uma carga incorreta no registro de um perfil com apalpador mecânico⁵.

Em sentido estrito, é impossível evitar que o apalpador mude a forma da superfície, mesmo usando cargas muito baixas ou medindo em materiais muito duros. A eficácia do método vai depender da resolução de que se disponha e o nível permitido de qualidade da peça analisada. Em elementos ópticos danos às superfícies são bastante críticos, e por tanto os apalpadores

mecânicos não são usados para avaliar a qualidade de lentes, espelhos ou outros elementos semelhantes.

2.1.3. Comprimento de amostragem: Cada vez que se faz uma medição, o apalpador percorre sobre a superfície uma distância total L , chamada *comprimento de amostragem*, que deve ser selecionada corretamente para evitar um registro inadequado dos dados. O comprimento de amostragem ótimo está determinado pela magnitude das irregularidades do perfil (geralmente se usam tabelas para determinar L em função da R_a que “se espera encontrar” na superfície). Um valor errado de L induz uma filtragem não controlada sobre os dados do perfil, a qual é feita eletronicamente pelo equipamento (rugosímetro) para ajustar a apresentação gráfica do perfil. Em geral, os rugosímetros comerciais “dividem” o comprimento de amostragem em 5 segmentos iguais, e calculam os parâmetros pedidos em cada um deles, para entregar como resultado final a média aritmética dos cinco valores de cada parâmetro.

1.1. Processamento da informação dada pelo perfilômetro

Depois que o processo de medição é realizado, os dados de altura do perfil da superfície estudada devem ser submetidos a uma análise que permita extrair informações além dos valores dos parâmetros típicos como R_a e S_m . A seguir são apresentadas muito brevemente duas técnicas usadas para este propósito; uma delas, a teoria de Fourier, tem sido classicamente empregada numa grande quantidade de problemas de análise de sinais, e a outra, a análise fractal, é uma alternativa recente que oferece possibilidades tecnológicas e teóricas bastante interessantes.

2.2.1. Análise de Fourier: A análise de Fourier é uma ferramenta que permite obter informações tais como forma do perfil e a direcionalidade da topografia da superfície⁷, as quais não são usualmente fornecidas pelos rugosímetros durante o processo de medição. Além disso, uma inspeção do espectro de Fourier (seção 1.3) permite também calcular parâmetros usuais de espaçamento como S_m ou a *densidade de picos*. No espectro de Fourier ficam registrados todos os períodos espaciais do perfil, correspondentes às distâncias nas quais uma característica dada do perfil se repete. É entendida como “característica do perfil” qualquer região (conjunto de pontos do perfil) onde há uma variação de alturas significativa resneito à

linha média (picos, vales, ranhuras, riscos, etc.); o nível de precisão nas variações detectadas no espectro depende da resolução durante a aquisição dos dados, mas também do método de cálculo empregado para manipular esses dados.

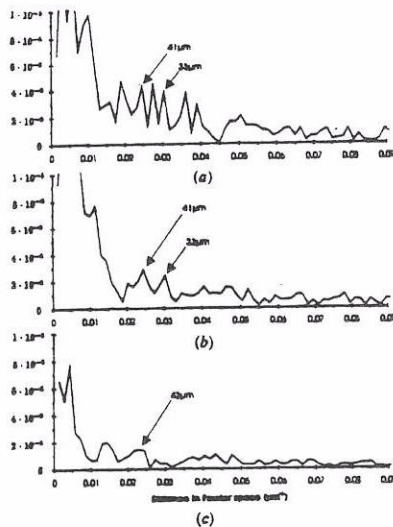


Figura 11. Espectros de Fourier (Gráficos da função PSD(F) de uma chapa de Alumínio laminada, em diferentes etapas do processo de laminação. a) estado inicial, b) após primeiro passe, c) após segundo passe. A direção de medida é a transversal ao sentido de laminação⁷.

A figura 11 mostra um exemplo do uso do espectro de Fourier para avaliar a evolução de uma superfície; os espectros apresentados correspondem a uma chapa laminada, em três diferentes estágios do processo⁷. São tomados como referência dois picos, correspondentes a distância no perfil de 41µm e 33µm; ou seja, no perfil existem características geométricas que se repetem periodicamente a cada 41µm ou 33µm (não necessariamente são picos que estão separados essas distâncias, mas podem ser marcas dos cilindros de laminação, por exemplo). Antes de começar o processo de laminação, os picos no espectro têm uma amplitude grande; isto significa que, seja qual for a natureza das irregularidades superficiais que estão se repetindo, sua magnitude é grande. Pode ver-se claramente que os passes de laminação fazem com que essas características iniciais da superfície diminuam sua magnitude, e inclusive cheguem quase a desaparecer; esta mudança na textura da superfície pode não estar associada diretamente a mudanças em parâmetros típicos como Ra ou Sm, já que é possível que a estatística média do perfil não sofra alterações significativas.

2.2.2. Análise Fractal: Os perfis de superfícies reais podem em muitos casos serem tratados como estruturas fractais, devido a algumas propriedades geométricas que eles apresentam e que são uma fonte alternativa de informação sobre a superfície estudada. As mais importantes destas propriedades são conhecidas como *auto-semelhança* e *auto-afinidade*. Uma curva plana qualquer, é auto-semelhante quando mantém sua aparência sem importar o nível de aumentos empregados na sua observação. A figura 12 mostra esquematicamente o conceito de auto-semelhança.

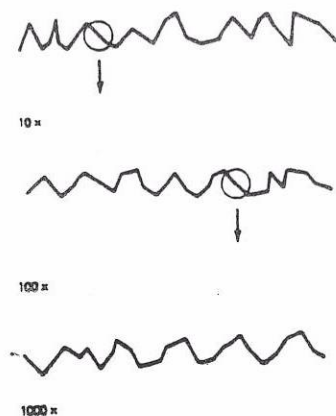


Figura 12. Curva que apresenta a propriedade de auto-semelhança

Uma curva que não seja auto-semelhante pode também manter sua aparência se são usadas escalas de diferentes aumentos em direções preferenciais. Por exemplo, um perfil pode apresentar sempre a mesma forma se for ampliado na direção horizontal o dobro do que na direção vertical. Uma curva que exiba esta propriedade se diz *auto-afim*.

Diversos trabalhos^{4,12} têm mostrado que um conceito próprio da geometria fractal, conhecido como a "*dimensão fractal*", pode ser correlacionado com parâmetros de análise de superfícies, tais como R_a ou S_m , oferecendo vantagens na interpretação da informação do perfil devido à versatilidade no cálculo numérico. A *dimensão fractal* (D) de uma curva plana (como um perfil obtido usando um rugosímetro mecânico ou óptico) é um número adimensional com valor entre 1 e 2; perfis correspondentes a superfícies mais rugosas têm dimensões fractais maiores, e relações particulares entre R_a e D podem ser feitas experimentalmente.

Por outro lado, uma superfície tem associada uma dimensão fractal cujo valor se encontra entre 2 e 3, e esse valor também é maior quanto mais rugosa seja a superfície. A dimensão fractal de uma superfície pode calcular-se então a partir dos dados de uma série de perfis dela obtidos mediante uma amostragem conveniente.

3. Análise de Superfícies mediante dispositivos ópticos

A partir da década dos anos 60, graças ao grande avanço no conhecimento da óptica de radiação coerente, têm-se desenvolvido novas técnicas de inspeção superficial, cujas características principais são precisamente aquelas ausentes nas técnicas da perfilometria mecânica. Entre os principais métodos desenvolvidos pode-se fazer uma primeira classificação global: *Métodos de área e Métodos de Ponto*. Os primeiros informam acerca das características de uma região bidimensional, sem traçar perfis nem fazer varreduras, e os segundos atuam como perfilômetros que constroem perfis a partir de informações obtidas ponto a ponto, mas com a diferença que não há contato com a superfície, pois o sinal é luminoso. Os métodos de área mais importantes são a *análise de speckle* e a *análise de padrões de interferência*, enquanto os métodos de ponto podem ser agrupados na categoria de *apalpadores ópticos*. Existe, além do anterior, uma técnica de grande utilidade no estudo de superfícies de fratura ou de desgaste, que poderia ser classificada também como método de ponto, *chamada microscopia confocal*, a qual será comentada abaixo. Uma outra técnica usada para peças de grande tamanho e quando não se precisa alta resolução, é a *análise de franjas de Moiré*, cujo princípio de medida é explicado brevemente também.

3.1. Métodos de ponto: apalpadores ópticos

Existe a possibilidade de obter perfis das superfícies a partir de varreduras realizadas sobre elas usando feixes luminosos, de uma forma análoga às varreduras feitas pelas agulhas dos sensores mecânicos convencionais. Neste caso, porém, uma vantagem é evidente: nenhum elemento entra em contato com as amostras, e por tanto os valores obtidos não são afetados por erros induzidos por deformações ou cortes durante a medição. Em contrapartida, os apalpadores ópticos são mais caros do que os apalpadores mecânicos e apresentam limitações devidas à resolução.

Existe no mercado um número considerável de apalpadores ópticos que operam sob diversos princípios de funcionamento, mas a maior parte deles têm em comum o fato de usar fontes de radiação laser e sistemas ópticos compactos^{6,13}. A seguir, são comentadas de uma forma bem simplificada algumas das possíveis montagens empregadas para apalpadores ópticos. Uma apresentação detalhada destes temas pode ser encontrada na referência 6.

3.1.1. Apalpador de Ângulo Crítico: Este apalpador relaciona a altura de um ponto sobre a superfície com a distância necessária para conseguir uma imagem focalizada dele. Quando o ponto observado na superfície se encontra na posição focal **B** (ver figura 13) da lente objetiva, os raios que emergem dessa lente são todos paralelos, e o feixe chama-se de “onda plana”. O prisma **P** está colocado num ângulo específico (ângulo crítico), de tal forma que quando a onda plana chega nele é refletida totalmente em direção aos fotodetetores **F1** e **F2**, os quais estão dispostos simetricamente e por tanto vão registrar, neste caso, intensidades iguais. Quando o ponto na superfície não se encontra na posição focal (por exemplo em **A** ou **C**), a onda que sai da lente objetiva não é plana, a reflexão no prisma não é simétrica, e os sinais nos fotodetetores não são iguais. A diferença de sinais elétricos nos fotodetetores é uma medida da altura do ponto observado com relação a uma referência que pode ser estabelecida em qualquer lugar da amostra. Enquanto a lente objetiva vai sendo transladada sobre a amostra, a conversão do sinal dos fotodetetores vai gerando um perfil de alturas em função da posição horizontal, o qual é equivalente aos perfis obtidos usando apalpadores mecânicos.

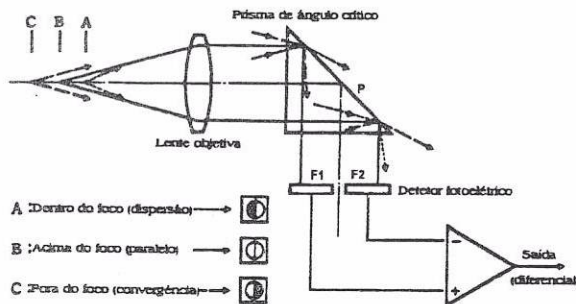


Figura 8.1 Método do ângulo crítico

Figura 13. Esquema de funcionamento do apalpador de ângulo crítico⁶

A resolução obtida por esta técnica é limitada pelo tamanho da área iluminada, mas em geral é maior do que a resolução obtida com apalpadores mecânicos. A conversão do sinal elétrico em altura da superfície geralmente se faz a partir de interpolações lineares, mas a partir de determinados níveis de altura, a linearidade diminui significativamente e o método perde validade.

3.1.2. Interferômetro Heteródino: É uma técnica que apresenta resolução muito alta tanto em direção lateral como em profundidade. Via de regra são empregados os Interferômetros heteródinos para avaliar a qualidade de elementos ópticos mais do que peças mecânicas, porém, em casos especiais podem ser feitos ajustes para aplicações especiais. A figura mostra esquematicamente o princípio de medida da técnica:

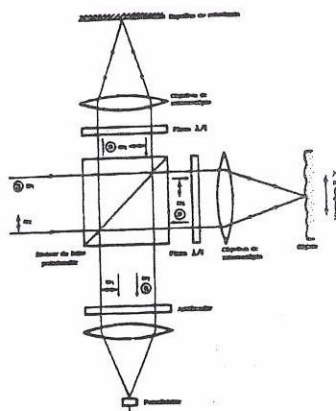


Figura 14. Esquema do apalpador óptico baseado no Interferômetro heteródino⁸

Um feixe composto de duas luzes com frequências diferentes chega à um divisor de feixes polarizador (elemento óptico que divide um raio de luz em dois raios com planos de polarização ortogonais, e que ao mesmo tempo viajam em direções ortogonais entre si) e dos feixes resultantes é focalizado sobre a superfície estudada (mediante um sistema de lentes objetivas), enquanto que o outro feixe é obrigado a fazer um caminho óptico fixo. Os feixes são unidos de novo e é produzido um sinal de interferência modulado pela diferença de caminhos ópticos e pelo controle dos estados de polarização dos feixes. A análise das diferenças de fase no sinal de interferência permite conhecer as diferenças de caminhos ópticos dos dois feixes, e por tanto a altura na superfície estudada. O controle da polariza-

dos feixes aumenta a resolução nas medidas em comparação aos interferômetros clássicos (tipo Michelson, por exemplo), nos quais não é medida a fase senão que é analisado diretamente o padrão de franjas gerado pelo sistema óptico. Finalmente, o perfil de alturas numa direção sobre a superfície é feito mediante a movimentação do feixe de luz sobre a amostra usando um sistema de varredura eletromecânico; nesta técnica, a vibração tem muito influência, e por tanto o sistema de varredura geralmente é bastante sofisticado.

3.2. Análise de speckle

Quando um feixe de radiação coerente, (por exemplo de luz laser) incide numa superfície rugosa, as ondas que emergem dela (se for opaca, como uma superfície metálica) ou as que a atravessam (se for transparente, como um vidro esmerilhado) se superpõem em todo o espaço depois de passar pela superfície gerando-se regiões onde a interferência é construtiva e regiões onde é destrutiva. O resultado físico é que sob qualquer plano depois da superfície se observa um padrão de "motas" ou "manchas" (em inglês "speckle") brilhantes e escuras distribuídas aleatoriamente. A figura 15 apresenta um padrão de speckle típico de uma superfície metálica.

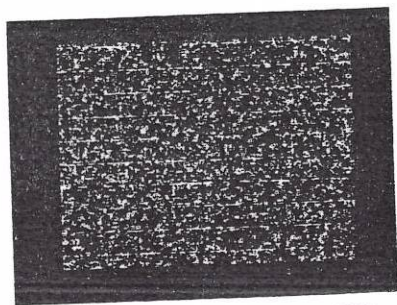


Figura 15 Padrão de speckle de uma amostra de aço AISI1020 usinado com fresa frontal.
 $R_a=0.11 \mu\text{m}$, Laser He-Ne, $\lambda=632.8 \text{ nm}$.

A distribuição de intensidades no padrão de speckle depende das características da superfície, do tipo de radiação usada e da geometria do sistema. Um desenvolvimento detalhado da relação entre a rugosidade de uma superfície e o padrão de speckle gerado por ela ao ser iluminada com radiação coerente escapa ao propósito de este texto, mas pode encontrar-se um tratamento preciso do tema em, por exemplo, as referências 13-17. Existem

... técnicas de análise dos padrões de speckle para medir parâmetros de

rugosidade de superfícies: o método de contraste e o método de correlação, os quais são descritos brevemente a seguir:

3.2.1. Método de Contraste: A análise teórica dos padrões de speckle, baseia-se no fato de que as diferenças de intensidades no plano de difração (plano de Fraunhofer, onde se observa o padrão de speckle) dependem das variações de fase das ondas que se superpõem, e estão relacionadas com as variações de altura na superfície da que provêm essas ondas, como o indica a equação^{14,15}

$$\sigma_{\theta}^2 = \left(\frac{4\pi}{\lambda} \right)^2 \sigma_h^2 \quad (11)$$

Onde

σ_{θ}^2 = Variança da fase no plano de difração

σ_h^2 = Variança das alturas no perfil da superfície, se associa diretamente com a rugosidade média quadrática R_{ms} (ver equação (2)) e indiretamente com a rugosidade média R_a (equação (1)).

A figura 16 ilustra a disposição de os elementos para a geração e captura dos padrões de speckle de superfícies refletoras.

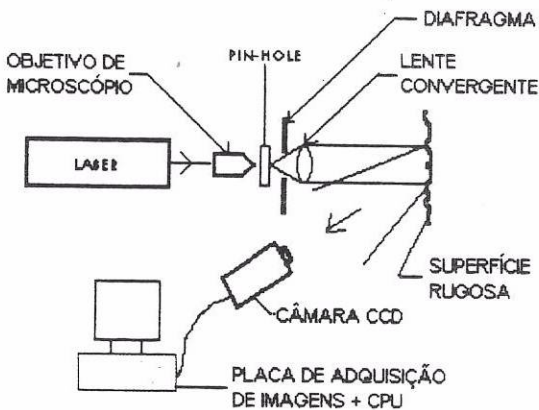


Figura 16. Montagem experimental para obtenção dos padrões de speckle de superfícies opacas

Um parâmetro que pode ser medido de maneira fácil, e que indica diretamente a distribuição da fase no padrão de speckle é o *contraste* da imagem obtida, o qual é calculado segundo a expressão^{14,15}

$$C = \frac{\sigma_I}{\langle I \rangle} \quad (12)$$

Onde σ_I representa o desvio padrão da distribuição de intensidades na imagem digitalizada, enquanto que o valor médio de tal distribuição está dado por $\langle I \rangle$. C sempre toma valores entre 0 e 1.

Desta forma, uma medição de intensidades, feita usando uma câmara CCD ou um arranjo de foto-diodos, pode indicar algumas características importantes da superfície estudada. Uma superfície com alta rugosidade tem associados parâmetros como Ra e Rq altos (uma alta variância na distribuição de alturas), e por tanto terá um padrão de speckle com alto contraste. Superfícies espelhadas ou muito polidas em geral, apresentam contrastes de speckle com valores próximos a zero.

3.2.2. Método de Correlação: Uma outra forma de usar as técnicas de speckle consiste em analisar a correlação entre diferentes padrões de speckle de uma mesma superfície, obtidos ao variar o ângulo de incidência da onda plana, como se mostra na figura 17.

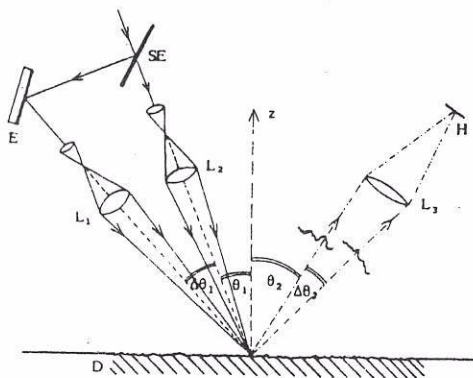


Figura 17. Esquema da montagem para medir Ra de superfícies usando o método de correlação de speckle¹⁵.

Na medida em que a mudança de ângulo de incidência entre os diferentes padrões se maior, a correlação entre esses padrões diminui, segundo uma lei matemática que tem a forma de uma função exponencial. Por outro lado, a correlação é uma função da geometria da montagem, do tipo de radiação utilizada e da magnitude das irregularidades na superfície, seja, de parâmetros como R_a e R_q . Da mesma forma que no caso da medição do contraste pode ser calculado e medido em termos de intensidades, seja mediante técnicas fotográficas ou em tempo real usando câmara CCD ou foto-diodos. A figura 18 indica como pode ser extraída a informação da superfície mediante as "curvas de correlação". Para cada nível de rugosidade, a curva de decréscimo da correlação em função do ângulo de incidência é única, e com o número suficiente de dados a medição é bastante confiável.

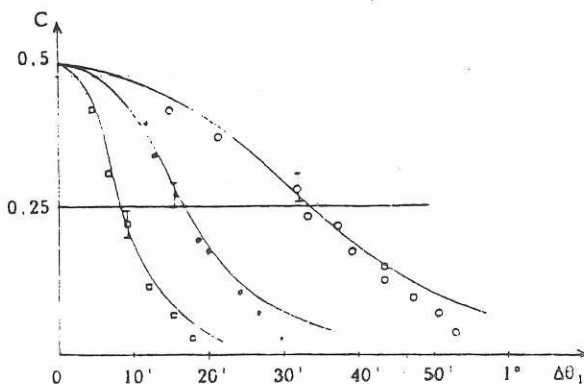


Figura 18. Curvas de correlação de speckle de superfícies com diversas rugosidades. Cada curva corresponde de maneira unívoca a um valor de R_a ¹⁵.

3.4. Microscopia Confocal

Esta técnica permite analisar a topografia de superfícies com níveis de rugosidade altos, como *peças desgastadas, produtos intermediários ou finais de processos de conformação de superfícies de fratura*. Estritamente, um microscópio confocal não é um apalpador óptico porque a informação que entrega não é simplesmente um perfil de alturas, mas é uma imagem onde estão indicadas características laterais e de profundidade na superfície estudada.

O princípio de funcionamento de um microscópio confocal é mostrado esquematicamente na figura 19.

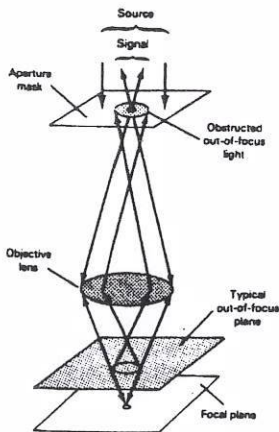


Figura 19. Princípio de funcionamento de um microscópio confocal⁴

A característica principal do microscópio confocal consiste em impedir a chegada ao detetor da luz proveniente de planos diferentes ao plano focal, como se mostra na figura 19; desta forma, cada vez que se forma uma imagem no detetor, ela corresponde a uma pequena área do objeto totalmente focalizada. A obtenção da informação de uma região maior da superfície é feita mediante a varredura do feixe luminoso sobre a superfície, ou vice-versa. Uma versão recente do microscópio confocal é o CLSM (Confocal Laser Scanning Microscope), cujo esquema se mostra na figura 20.

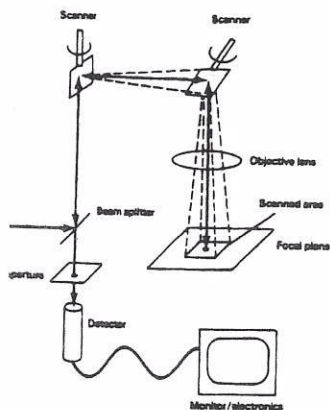


Figura 20. Esquema de funcionamento de um microscópio confocal por varredura laser (Confocal Laser Scanning Microscope-CLSM)⁴

Neste equipamento é usada uma fonte laser para melhorar a resolução nas imagens, ao tempo que a varredura é feita mediante galvanômetros que garantem um passo muito fino na movimentação do feixe sobre a superfície; apesar da sofisticação, o CLSM funciona sob o mesmo princípio de obstrução dos raios de luz provenientes de planos não focalizados no objeto.

3.5. Métodos de Moiré:

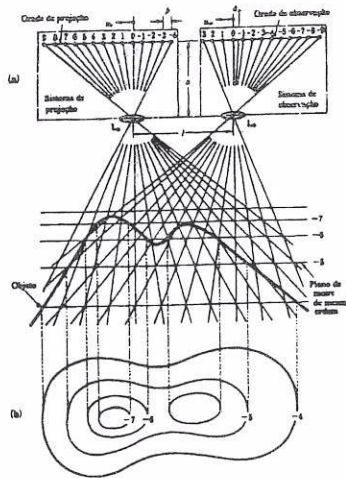


Figura 21. Esquema do princípio de medida da técnica de análise de franjas de Moiré⁶

Os métodos de Moiré fazem uso dos interessantes efeitos geométricos que aparecem quando duas grades são superpostas num mesmo plano de observação. O princípio do método consiste em fazer com que uma das grades esteja afetada pela forma da superfície a medir, de tal forma que quando a superposição seja feita, as figuras formadas (franjas de Moiré) contêm a informação da superfície. A figura 21 mostra uma possibilidade de aplicação do método: Uma grade é projetada sobre a superfície, e sua reflexão é registrada num detetor, mas através de uma outra grade, de tal forma que a distribuição de intensidades registrada corresponde à superposição das duas grades. Pode-se mostrar que o novo padrão de linhas formado – as franjas de Moiré – corresponde exatamente às curvas de nível da superfície, o que constitui uma informação muito importante quando estão sendo estudados, por exemplo, erros de forma em componentes industriais, ou deformações superficiais em peças que não podem ser tocadas.

4. Referências

1. **Deutsche Normen 4760.** "Definitions used in the Assessment of Surface Configuration". DIN, 1960.
2. **Deutsche Normen 4761.** "Definitions, Denominations and Symbols for the character of Surface". DIN, 1960.
3. **Deutsche Normen 4762.** "Assessment of 2nd to 5th Order Irregularities of Surface Configuration by means of Sections of Surfaces. Definitions relating to Reference System and Dimensions". DIN, 1960.
4. **Withenton, E.P.** "Surface Topography and Image Analysis". ASM Metals Handbook, Volume 18: Friction, Lubrication and Wear Technology, 1992.
5. **Song, J.F.; Vorburger, T.V.;** "Surface Texture". ASM Metals Handbook, Volume 18: Friction, Lubrication and Wear Technology, 1992.
6. **Yatagai, T.;** "Introdução à Metrologia Óptica". Universidad de Tsukuba, Japão. Tradução ao Português: Oswaldo Horikawa, Depto. Eng. Mecânica - USP, 1998.
7. **Gjonnes, L.** "Quantitative Characterization of the Surface Topography of Rolled Sheets by Laser Scanning Microscopy and Fourier Transformation". Metallurgical and Materials Transactions A, Volume 27A, 1996. Pp. 2338-2346.
8. **Gjonnes, L.** "Development of a Surface Topography During Cold Rolling of Twin-Roll Cast Aluminium". WEAR 192, 1996. Pp. 216-227.
9. **Cortes Sarmento, E. et al.** "Controle de Rugosidade em Laminadores a Frio". Seminário da ABM sobre Laminação de Produtos Planos e Não Planos, Volta Redonda, RJ. 28 a 30 de Setembro de 1983.
10. **Dos Santos, José Carlos, et al.** "Tendência e Exigência de Novas aplicações de Materiais Laminados Utilizados em Pâneis de Carrocerias na General Motors de Brasil". XXXI Seminário de Laminação-ABM. Juiz de Fora, MG. 23 a 25 de Novembro de 1994
11. **Hutchings, I.M.** "Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials". Ed. Edward Arnold, London, 1992.
12. **Church, E.L.** "Fractals Surface Finish" Applied Optics 27(8), 1988. Pp. 1518-1526.
13. **Wahl, F.; So, S.; Wong, W.;** "A Hybrid Optical-Digital Image Processing Method for Surface Inspection". IBM Journal of Research Development, vol. 27 No. 4, Julio de 1983.
14. **Dainty, J.C.** "Laser Speckle and Related Phenomena". Springer-Verlag, 2a. ed., 1984.
15. **Sicre,** "Metrologia Speckle". Centro de Investigaciones Ópticas de La Plata, La Plata, Argentina, 1989.

Patrocínio

RECOPE



FINEP - Financiadora de Estudos e Projetos

arotec

Mahr

DESAFIOS, EXPERIÊNCIAS E EXPECTATIVAS
Sobre
RUGOSIDADE DE CHAPAS PARA A
INDÚSTRIA AUTOMOBILÍSTICA



621.7.015
W892d
19

ESCOLA POLITÉCNICA - USP
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
LABORATÓRIO DE FENÔMENOS DE SUPERFÍCIE