

ESTUDO DA TOPOGRAFIA DE SUPERFÍCIES COMO UM PROCESSO ALEATÓRIO NÃO-ESTACIONÁRIO

Marcelo Silva Guimarães
Carlos Henrique da Silva
Linilson R. Padovese
Amilton Sinatora

Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, Departamento de Engenharia Mecânica, Laboratório de Fenômenos de Superfície, Av. Professor Mello Moraes, nº 2231, CEP 05508-900, São Paulo, SP, Brasil.

E-mail: marcsg@usp.br carloshs@usp.br lrpadove@usp.br sinatora@usp.br

Resumo

A caracterização das superfícies de engenharia é importante para o estudo dos fenômenos tribológicos. A literatura mostra que a topografia das superfícies é descrita por um processo aleatório não-estacionário, sendo portanto necessário considerar o comprimento amostral como um parâmetro de análise. Este artigo estuda a dependência de alguns parâmetros de rugosidade em função do comprimento amostral e propõe o parâmetro $\ln(Rz)/\ln(Sm)$ para analisar superfícies.

Palavras-chave: rugosidade, tribologia, análise de sinais.

1. INTRODUÇÃO

Um fenômeno é classificado como aleatório quando, a princípio, não é possível descrevê-lo através de leis físicas bem definidas.

As topografias das superfícies naturais e de engenharia podem ser classificadas como sinais aleatórios devido a características encontradas nos processos que geram estas superfícies e nos processos de medição.

A formação das superfícies naturais é função do histórico da interação da superfície com o meio, realizadas por processos como erosão, desgaste, ruptura do material e reações químicas, que ocorrem de forma não controlada.

A geração das superfícies de engenharia se deve aos processos de fabricação, que de certa maneira reproduzem os mesmos processos naturais, mas de forma controlada. Contudo este controle é limitado a uma determinada escala, sendo possível monitorar o processo de fabricação até uma determinada resolução. Além disso, sabe-se que quanto maior é esta resolução mais difícil é mantê-la por regiões muito grandes.

Na maioria dos casos a medição de perfis das superfícies é realizada com um rugosímetro. O posicionamento da ponta do rugosímetro sobre a superfície não é feito com o mesmo grau de

resolução que o da medida realizada, impedindo de maneira geral a reprodutibilidade do sinal de rugosidade.

Devido a estes fatores não há modelos matemáticos determinísticos para a topografia das superfícies, necessitando uma modelagem estocástica.

No estudo de sinais aleatórios e em particular em perfis de rugosidade, é importante verificar a estacionariedade do sinal, pois isto influenciará na escolha das metodologias a serem utilizadas na análise (Bendat & Piersol, 1971).

Se dois perfis de rugosidade consecutivos na mesma direção e sentido forem resultados de um processo estacionário, então apresentarão as mesmas propriedades estatísticas. Neste caso diz-se que as leis probabilísticas que regem o processo são invariantes no espaço (Karlin & Taylor, 1975).

No sentido estrito, a estacionariedade ocorre em um processo se todos os seus momentos estatísticos não são função da posição espacial em que foram amostrados.

No sentido amplo pode se considerar estacionário todos os processos cuja média e a função de autocorrelação não variam em função da posição espacial (Gardner, 1986).

A estacionariedade do processo aleatório está muito ligado, ao fato do sistema que gera o sinal estar trabalhando em regime permanente ou transitório. Em muitos casos sistemas em regime permanente são estacionários enquanto que no transitório o sistema é não-estacionário (Bendat & Piersol, 1971). No caso das superfícies reais a não-estacionariedade pode ser evidenciada, por características como as ondulações e os erros de forma, que acabam gerando variações nas propriedades estatísticas do sinal em escalas diferentes.

Os estudos de Sayles e Thomas (1978) concluem que a topografia das superfícies é resultado de um processo não-estacionário. Uma propriedade encontrada por este estudo mostra que a variância das alturas do perfil é função do comprimento amostral. Neste texto pretende-se discutir as propriedades das superfícies encontradas nos estudos realizados por Sayles e Thomas (1978) no caso específico de corpos torneados e retificados.

2. EXPERIMENTO

2.1 Descrição do corpo-de-prova

Os corpos-de-prova utilizados neste experimento são discos de aço com 100mm de diâmetro, como está mostrado, na Figura 1.

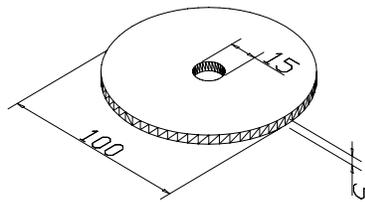


Figura 1. Descrição da geometria dos corpos-de-prova (medidas em mm).

Foram preparados quatro discos com acabamentos diferentes em suas faces, que serão as su-

perfícies estudadas, como pode ser visto na Tabela 1. Por uma inspeção visual e táctil verificou-se que o refinamento do acabamento superficial cresce do disco 1 para o disco 4.

Tabela 1. Descrição dos processos de fabricação das superfícies dos corpos-de-prova.

Corpo-de-prova	Processamento
disco 1	Torneado
disco 2	Torneado
disco 3	Retificado
disco 4	Retificado

2.2 Procedimento de medição e equipamentos utilizados

Para se realizar a aquisição dos perfis foi utilizado um rugosímetro Surtronic 3+. Este rugosímetro se caracteriza por possuir um perfilômetro constituído por uma ponta de diamante e um patim. Portanto o perfilômetro apoia em dois pontos da superfície. Tal configuração funciona como um filtro mecânico de baixas frequências.

O disco foi dividido em quatro regiões (Figura 2A). Fez-se cinco medidas em cada região. A agulha percorreu o disco do centro para a fronteira, na direção radial, realizando-se a aquisição de 20 perfis com um comprimento amostral de $8mm$. Foi adotado este valor para o comprimento amostral com o objetivo de maximizar o tamanho do comprimento amostral (procurando descrever a superfície de maneira mais fiel possível, não distinguindo ondulação de rugosidade), sem no entanto, tornar muito lenta a aquisição e o processamento dos sinais. Também foi realizada uma varredura na superfície dos discos com uma máquina de medição de coordenadas BN 710 da Mitutoyo, com o objetivo de detectar os erros de forma nos discos. Na Figura 2B pode se observa a trajetória seguida pelo apalpador sobre os corpos de prova.

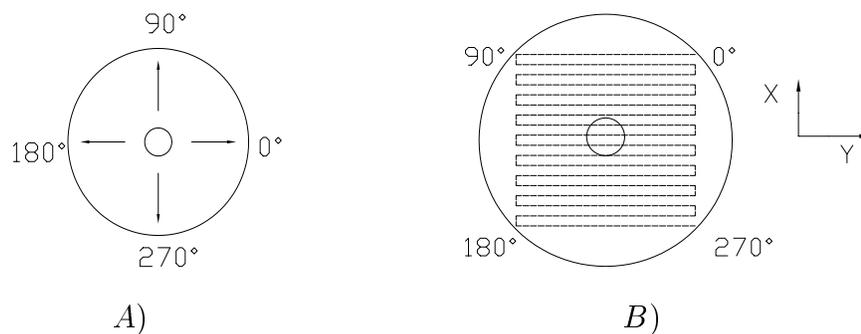


Figura 2. A) Regiões onde foram realizadas as medições de rugosidade. B) Trajetória feita pelo apalpador na superfície dos corpos de prova para medição de erros de forma.

Após a aquisição, cada sinal obtido pelo rugosímetro foi dividido em segmentos, com o comprimento amostral variando de 0.1 a $6mm$, de tal forma que o segmento de comprimento menor está contido no centro do segmento maior (Figura 3). Para cada segmento calculou-se os parâmetros de rugosidade Rq , Rz , Sm , $\ln(Rz)/\ln(Sm)$, calculando-se a média dos parâmetros

para cada comprimento amostral.

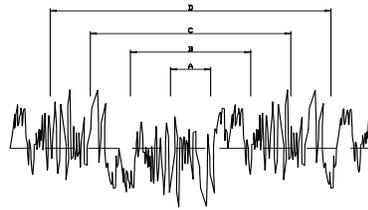


Figura 3. Segmentação dos sinais variando o comprimento amostral de 0.1 a 6mm.

2.3 Resultados e Discussão

A Figura 4 mostra um perfil típico de cada disco obtido pelo rugosímetro. Na Figura 5 é mostrado um gráfico para indicar como a varredura foi realizada pela máquina de medição de coordenadas, enquanto que na Figura 6 é possível observar as projeções das varreduras no plano Z-Y de cada disco (plano definido pelo eixo Altura Z e Coordenada Y , como pode ser visto na Figura 5).

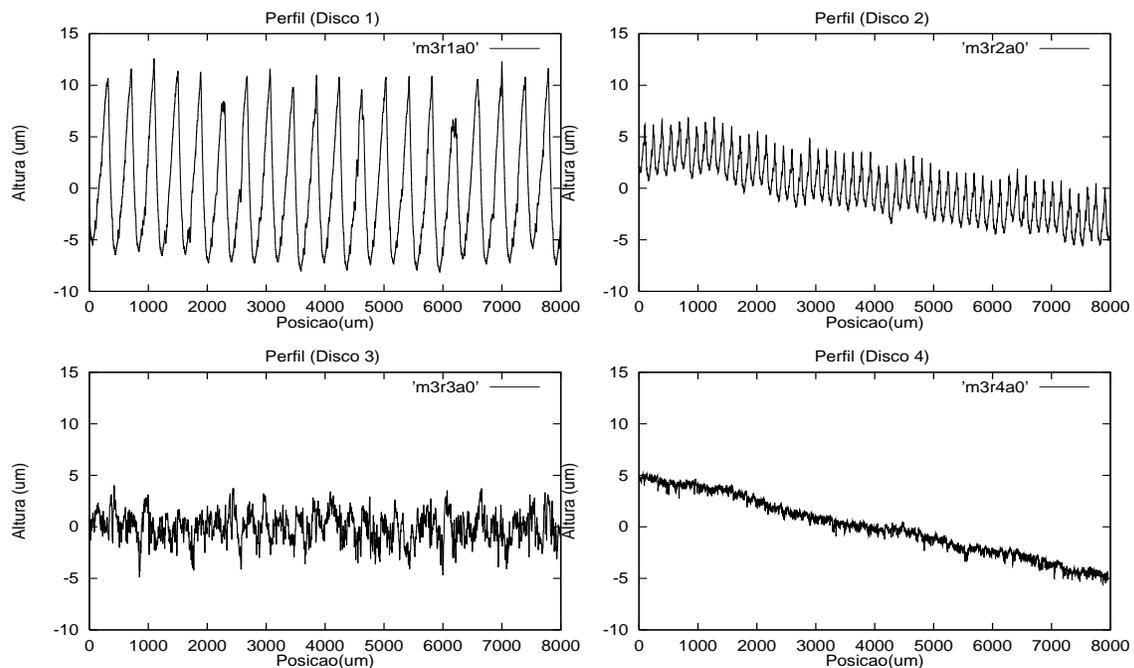


Figura 4. Perfis radiais típicos dos discos estudados: disco 1 torneado (a esquerda e acima); disco 2 torneado (a direita e acima); disco 3 retificado (a esquerda e abaixo); disco 4 retificado (a direita e abaixo).

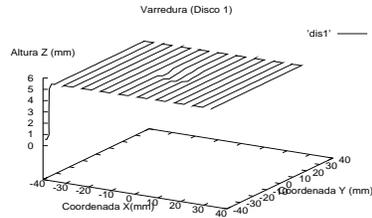


Figura 5. Exemplo do processo de varredura.

Na Figura 6, a observação da topografia dos discos em uma escala maior mostra variações significativas nas alturas em baixas frequências, indicando uma não-estacionariedade das superfícies.

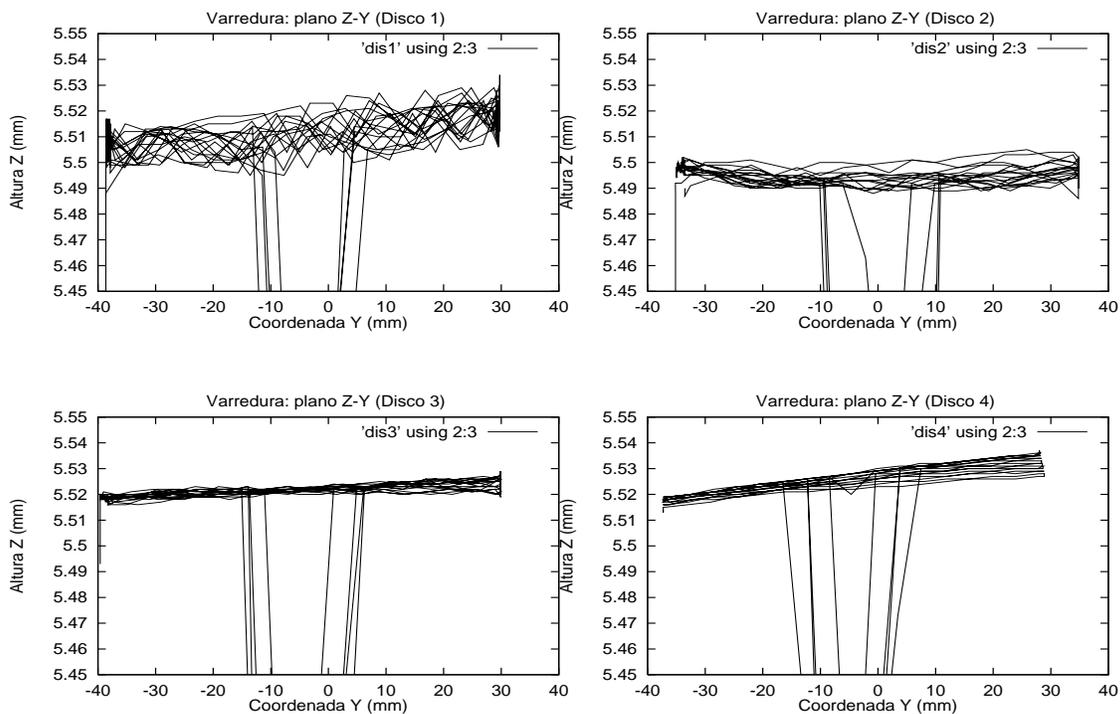


Figura 6. Varreduras projetadas no plano Z-Y: disco 1 torneado (a esquerda e acima); disco 2 torneado (a direita e acima); disco 3 retificado (a esquerda e abaixo); disco 4 retificado (a direita e abaixo).

As razões para que os perfis de rugosidade trabalhados sejam não-estacionários, está ligado ao próprio processo de fabricação, pois na usinagem a definição da superfície gerada depende da trajetória da ferramenta, forças de corte envolvidas e comportamento do material processado e da ferramenta. Variáveis como vibrações da máquina, rigidez de fixação da peça a ser usinada

e da ferramenta, desgaste da ferramenta, variam ao longo do processo de usinagem contribuindo na geração de perfis não-estacionários.

Nota-se que os parâmetros que podem influenciar a geração da não-estacionariedade ocorrem em escalas diferentes, influenciando tanto o erro de forma como a rugosidade.

Deve-se ressaltar que ao descrever uma superfície com o intuito de verificar a sua influência nos fenômenos tribológicos, não se pode restringir a sua descrição apenas à escala da rugosidade, pois como se verifica pelos resultados os parâmetros convencionais de rugosidade sequer são constantes na superfície (no mínimo precisam ser aferidos à um determinado comprimento amostral).

Como exemplo, imaginem um ensaio de desgaste pino contra disco. As ondulações e erros de forma contribuem de maneira significativa na geração de vibrações na interação entre o pino e o disco. Pode-se concluir analisando somente a rugosidade que não se terá dados suficientes para caracterizar a interação superficial entre o pino e o disco, pois os erros de forma e ondulações também produziram efeitos no ensaio. Portanto é necessário caracterizar a topografia superficial como um todo e discernir os efeitos que cada escala produz no sistema.

Na Figura 7 aparecem os gráficos da variância das alturas em função do comprimento amostral. Nos gráficos apresentados por estas figuras (Figura 4 e 7) é possível classificar os perfis em dois grupos. Um grupo formado pelos discos 1 e 3 e o outro pelos discos 2 e 4.

Nos discos 2 e 4 observa-se uma propriedade comum a sinais brownianos, o fato da variância ser uma função linear do comprimento amostral (Peitgen e outros, 1988). É possível definir para os perfis destes discos um novo parâmetro de rugosidade denominado topotesia (Sayles & Thomas, 1978), que é a razão entre a variância e o comprimento amostral. A topotesia medida para os discos 2 e 4 são iguais e vale $k = 4 \times 10^{-4}$.

Nota-se que os discos 2 e 4 representam as superfícies com acabamentos mais finos dos dois processos analisados (torneamento e retificação).

Os discos 2 e 4 apresentam resultados em conformidade com as teorias de Sayles e Thomas, sendo possível observar a variação da média em função do espaço nos próprios sinais adquiridos (Figura 4) e dependência da variância com comprimento amostral (Figura 7).

Enquanto que para os discos 1 e 3, os gráficos mostrados na Figura 7 apresentam um comportamento linear para um comprimento amostral menor que $1mm$, estabilizando o valor da variância após este comprimento amostral. Neste caso não é possível definir o parâmetro topotesia.

Uma hipótese para que o disco 1 e 3, não satisfaçam a teoria, se deve a própria instrumentação. Convém observar que a configuração do perfilômetro do rugosímetro, constituído de ponta e patim, funciona como um filtro passa-alta (Whitehouse, 1994). Assim os discos 1 e 3 podem ter características não-estacionárias em baixas frequências que são cortadas pelo processo de filtragem.

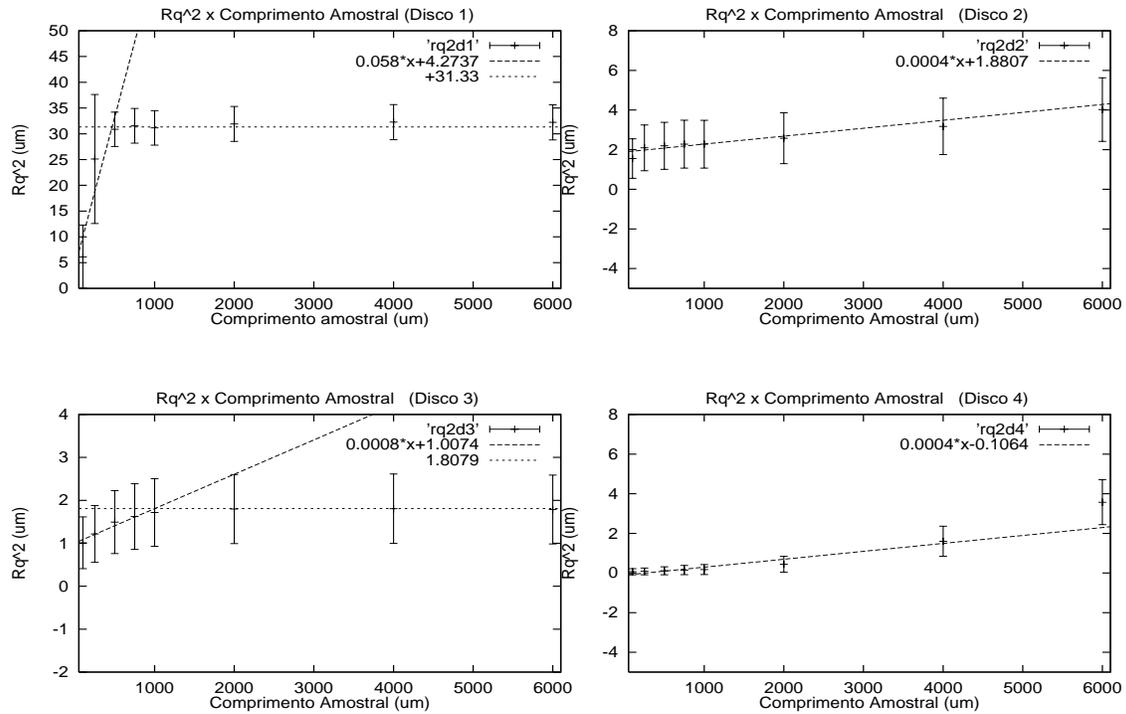


Figura 7. Gráficos da variância das alturas dos perfis de rugosidade em função do comprimento amostral: disco 1 torneado (a esquerda e acima); disco 2 torneado (a direita e acima); disco 3 retificado (a esquerda e abaixo); disco 4 retificado (a direita e abaixo).

Criou-se o parâmetro $\ln(Rz)/\ln(Sm)$ com objetivo de verificar o comportamento de outras propriedades estatísticas do perfil em função do comprimento amostral (ver o Apêndice). Na Figura 8 são mostrados os resultados, verificando-se um comportamento logarítmico para todas superfícies.

Para o gráfico do $\ln(Rz)/\ln(Sm)$ observa-se um comportamento padrão para todos os discos (crescimento logarítmico). Uma hipótese seria que a medida que se aumenta o comprimento amostral do perfil, aumenta-se a probabilidade de se encontrar no perfil obtido um $\ln(Rz)/\ln(Sm)$ maior, porém macroscopicamente a superfície é plana, ou seja, o valor de $\ln(Rz)/\ln(Sm)$ tende a estabilizar em um limite.

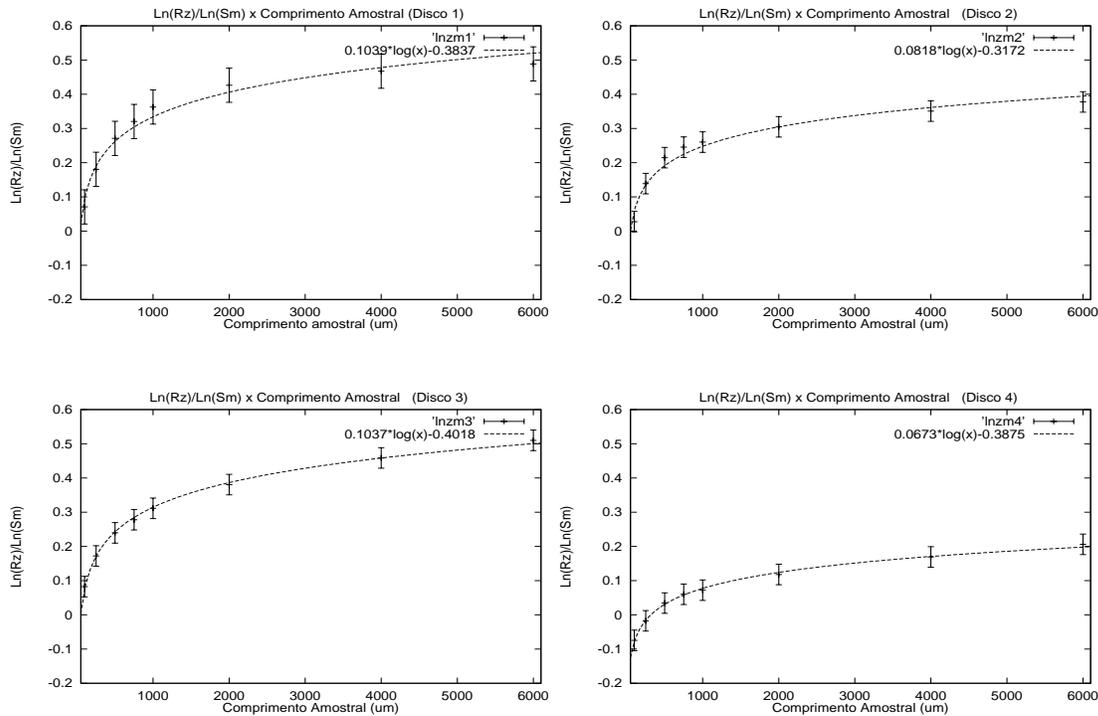


Figura 8. Gráficos do $\text{Ln}(Rz)/\text{Ln}(S_m)$ dos perfis de rugosidade em função do comprimento amostral: disco 1 torneado (a esquerda e acima); disco 2 torneado (a direita e acima); disco 3 retificado (a esquerda e abaixo); disco 4 retificado (a direita e abaixo).

3. CONCLUSÕES

No âmbito das experiências realizadas, conclue-se que:

A) A variância das alturas do perfil é linearmente dependente do comprimento amostral nos corpos-de-prova de menor rugosidade para cada processo.

B) A dependência do parâmetro $\text{Ln}(Rz)/\text{Ln}(S_m)$ para todos os corpos-de-prova apresentou o mesmo comportamento (logarítmico). Indicando que o parâmetro $\text{Ln}(Rz)/\text{Ln}(S_m)$ tem uma aplicação mais genérica do que o parâmetro variância.

C) Os parâmetros convencionais de rugosidade não são capazes de descrever a superfície de maneira adequada para que se possa compreender os fenômenos que ocorrem sobre ela.

3.1 Agradecimentos

Agradeço a FAPESP e a CNPq pelo apoio financeiro.

4. REFERÊNCIAS

- Bendat, J. S., Piersol, A. G., 1971, “Random Data”, Wiley Interscience.
- Karlin, S., Taylor, H. M., 1975, “A First Course in Stochastic Processes”, Academic Press.
- Gardner, W. A., 1986, “Introduction to Random Process With Applications to Signals and Systems”, Macmillan Publishing Company .
- Peitgen, H. O., Saupe, D., Barnsley, M. F., 1988, “The Science of Fractal Images”, Springer-Verlag.
- Sayles, R. S., Thomas, T. R., 1978, “Surface Topography as a Nonstationary Random Process”, pág. 431-434, Nature ,Vol. 271.
- Shanmugan, K. S., Breipohl, A. M., 1988, ”Random Signals Detection, Estimation and Data Analysis”, Wiley.
- Whitehouse, D. J., 1994, “Handbook of Surface Metrology”, Institute of Physics Publication.

APÊNDICE

Na Figura A1 observa-se dois perfis de rugosidade, intuitivamente pode-se dizer que o perfil (a) é mais "rugoso" do que o perfil (b). Isto é caracterizado pelo fato de que o perfil (a) tem sua altura média de pico a vale maior do que o perfil (b).

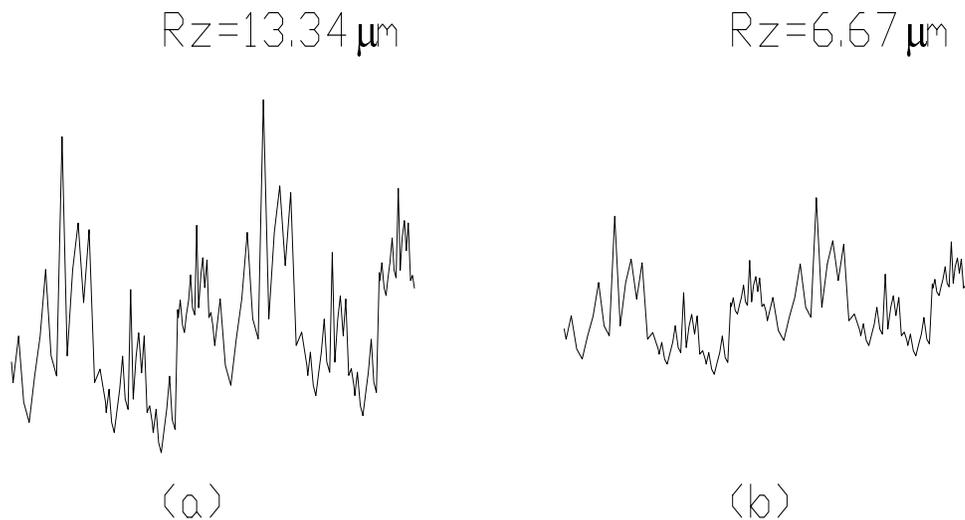


Figura A1. Comparação de perfis com valores diferente de R_z .

Também observa-se que o perfil (b) da Figura A2 apresenta uma maior "rugosidade" do que o perfil (a), porém neste caso isto é caracterizado por ter o perfil (b) uma distância média entre picos menor.

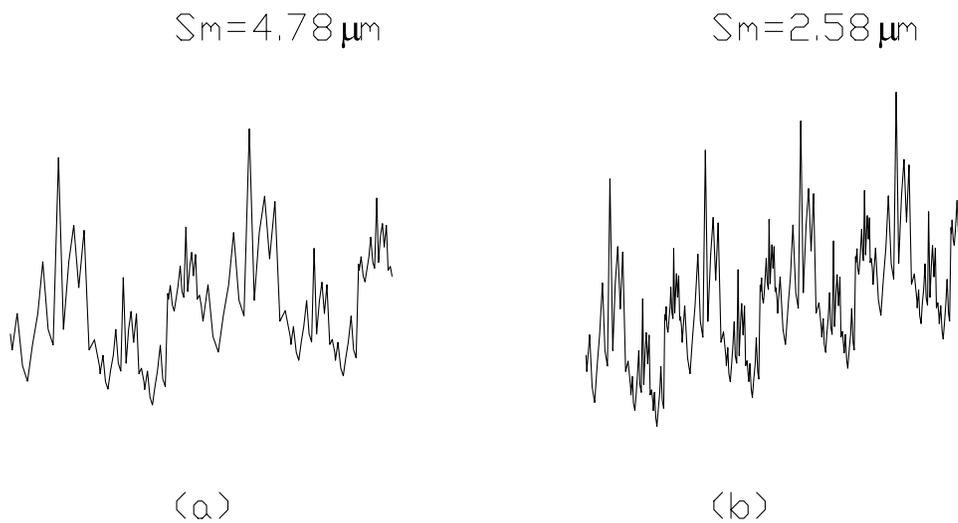


Figura A2. Comparação de perfis com valores diferente de S_m .

Dessa maneira pode se observar que a "rugosidade" de um perfil é maior quanto maior for o valor do R_z e quanto menor for o valor de S_m . Este raciocínio pode ser sintetizado pelo parâmetro, $\frac{\ln(R_z)}{\ln(S_m)}$, que é utilizado neste trabalho.