

Capítulo 3

Revisão da Literatura

Rugosidade

3.1. Conceito de Rugosidade

A medição de rugosidade merece um cuidado especial que muitas vezes é relevado em benefício de outras grandezas envolvidas. A rugosidade, ou os parâmetros que são escolhidos para representá-la, muitas vezes é uma caracterização incompleta do perfil ou da superfície que se deseja analisar.

Os parâmetros de rugosidade existentes são valores numéricos resultantes de integrações ou de operações matemáticas simples de perfis amostrais de superfícies. Logo, são representações sujeitas a diversos erros de medição e interpretação.

Contudo, sua praticidade é inegável: é extremamente útil dispor de valores numéricos para comparação e análise de superfícies, seja para resumir diversas informações contidas em uma superfície tridimensional, ou mesmo para separar e classificar superfícies distintas, geradas por diferentes processos de fabricação.

Inicialmente, é interessante esclarecer que a rugosidade, ou o perfil linear de uma superfície que é designado por este nome, é normalmente representado em escalas (para ampliação ou redução) distintas para as direções vertical e horizontal. Isso para evidenciar a mudança de perfil de maior interesse para análise de uma superfície, já que as escalas de variação para dimensões perpendiculares a superfície analisada são, em geral, menores que as para dimensões paralelas à superfície.

Desta forma, como em grande parte das vezes deseja-se saber mais sobre a variação do perfil perpendicular à superfície, é comum ampliar as variações de um perfil de rugosidade nesta direção, e em uma escala menor de ampliação as variações na direção paralela a superfície.

Este conceito pode ser melhor compreendido ao se observar a Figura 25.

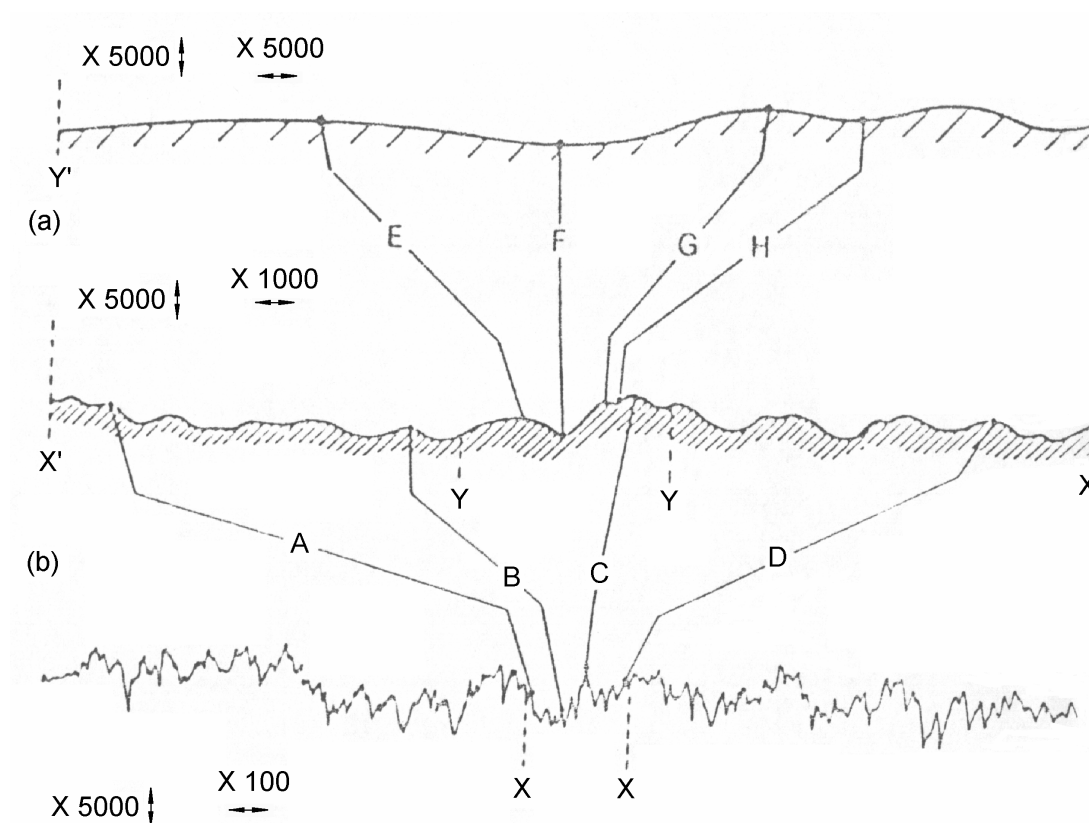


Figura 25: Exemplo de representação de um perfil de rugosidade (adaptado de Hutchings, 1992).

Assim sendo, muitas das representações referentes a rugosidade de um perfil podem levar a uma interpretação incorreta, caso não se considere este fato ao analisá-las. Além deste possível erro de compreensão, não raro outros erros de distorção da informação sobre a rugosidade ocorrem.

Muitos dos perfis de rugosidade analisados em operações de engenharia são obtidos por contato direto, através de um apalpador de um perfilômetro ou de um rugosímetro. Dois grandes efeitos podem modificar a aquisição do perfil analisado, e conseqüentemente fornecer através destes aparelhos perfis de superfície que não retratem a realidade: a carga aplicada ao apalpador de leitura e o raio da ponta do apalpador.

Com relação a distorção causada pela carga aplicada ao apalpador, sumariamente pode-se afirmar que é praticamente impossível obter uma leitura de perfil por contato, sem que este contato não danifique a superfície em questão, portanto alterando o perfil analisado e diferenciando-o do registrado pelo aparelho. Existem outras alternativas para obter tais perfis sem o contato físico, através de uma maneira ótica: microscópios de varredura eletrônica, por exemplo, e outros casos de interferometria ótica em que o perfil da superfície é adquirido por meio de varredura de algum tipo de onda eletromagnética. Através destes pode-se registrar perfis sem modificação alguma em sua estrutura, ao menos no nível microscópico.

Já a outra distorção comentada, provocada pelo efeito do raio do apalpador, baseia-se no conceito que, por menor que seja o raio utilizado para coletar este perfil de rugosidade, este sempre será maior que zero. Conseqüentemente este apalpador não poderá reconhecer perfis de rugosidade cuja dimensão seja muito menor que a de seu raio, retratando o perfil adquirido como uma curva tangente à circunferência descrita pelo raio de sua ponta. Dependendo do nível de detalhamento exigido em relação à superfície analisada, deve-se optar por apalpadores de dimensões mais sutis. E mais uma vez, os mesmos sistemas eletrônicos para obtenção dos perfis sem contato podem ser aplicados para evitar este erro de distorção na transcrição de um perfil.

Entretanto, os microscópios de varredura não são substitutos de rugosímetros e perfilômetros. São mais um complemento para a análise fornecida por estes aparelhos, uma vez que são equipamentos menos práticos, quase em totalidade para uso de laboratório, além de serem limitados por uma distância focal específica, que conforme a característica do perfil pode condenar a sua obtenção, principalmente se tratando de superfícies mais irregulares.

Outro termo relevante a ser esclarecido é a diferenciação dos dois parâmetros de qualidade superficial mais utilizados, ou seja, diferenciar o conceito de rugosidade em relação aos erros de forma.

Uma definição bastante elucidativa é proposta por Hutchings (1992), em que a rugosidade consistiria de “irregularidades de pequena escala de uma superfície”, enquanto que erros de forma seriam “uma medida do desvio de forma de uma superfície de sua forma ideal (por exemplo, plana, cilíndrica ou esférica)”. Este mesmo autor admite que a distinção entre os dois conceitos é arbitrária, embora claramente envolva a escala de irregularidade paralela à superfície.

Aliado a estes dois termos, pode-se estabelecer ainda o termo de ondulação de uma superfície. Sua definição poderia ser consentida como toda ondulação periódica que esteja em uma escala intermediária entre a rugosidade e o erro de forma.

3.2. Aplicações de Parâmetros de Rugosidade

A rugosidade, e as dezenas de parâmetros utilizados para identificá-la, serve para diversas aplicações. Conceitos de projeto, desgaste, atrito e lubrificação são profundamente influenciados pela rugosidade.

O projeto em engenharia necessita de propriedades superficiais estabelecidas por valores descritos em normas (ISO 2632, por exemplo) para definir critérios de ajuste, vedação, interferência e dinâmica dos elementos de um conjunto. Para obter os diferentes valores de rugosidades médias, a norma DIN 4766 estabelece as seguintes operações de processamento para metais:

Tabela 5: Valores de R_a atingíveis para diferentes processos de fabricação (adaptado DIN 4766).

Grupo Principal	Método de Manufatura Designação do Método	Valores atingíveis médios de R_a em μm													
		0,006	0,012	0,025	0,05	0,1	0,2	0,4	0,8	1,6	3,2	6,3	12,5	25	50
Fundição	Fundição em molde de areia														
	Fundição em molde de casca														
	Fundição em coquilha														
	Fundição sob pressão														
	Fundição por cera perdida														
Conformação	Forjamento em matriz fechada														
	Laminação plana														
	Estampagem profunda de chapas														
	Extrusão														
Separação	Estampagem														
	Laminação de perfis														
	Corte por serra														
	Torneamento longitudinal														
	Faceamento														
	Abertura de ranhuras														
	Aplainamento														
	Contorno com plaina limadora														
	Alisamento														
	Furação														
	Mandrilhamento														
	Escareamento														
	Alargamento														
	Fresamento tangencial														
	Fresamento de topo														
	Brochamento														
	Limagem														
	Retificação circular longitudinal														
	Retificação circular de superfícies														
	Retificação circular de mergulho														
	Retificação superficial tangencial														
	Retificação superficial de topo														
	Retificação-polimento														
	Brunimento														
	Acabamento finíssimo														
	Polimento circular com disco														
	Polimento de superfícies com disco														
Usinagem por ultra-som															
Polimento															
Jateamento de abrasivo															
Tamboreamento, rebarbação															
Corte por chama															

Legenda

■ Valores comuns
□ Valores possíveis

Já para o desgaste e o atrito, pode-se dizer que boa parte da ciência da tribologia provém ou utiliza como base as experiências de Archard (1953): ao estudar o contato de superfícies metálicas para sistemas elétricos, propôs uma nova interpretação aos fenômenos tribológicos ao considerar variações na área de contato de duas superfícies conforme suas asperezas ou rugosidades.

A proposta de Archard era que, por se tratarem de sistemas elétricos, sua condutividade elétrica entre contatos era dependente da carga aplicada a estes. Atribuiu isso então a existência de uma área de contato real, que seria resultante de uma mudança no aumento da área de contato efetiva de duas superfícies. Ou seja, as superfícies, embora aparentemente sem irregularidades e com contatos ideais, eram na verdade dois perfis de rugosidade tocando-se.

Estes perfis de rugosidade, durante o contato, conduziram a uma área de contato real muito menor que a aparente, e mais ainda, um aumento da força relacionada a este contato faria aumentar tanto o número quanto o tamanho das áreas de contato.

Outra grande contribuição neste sentido foi feita por Greenwood & Williamson (1966), partindo do conceito descrito anteriormente. Valendo-se da teoria para contato elástico de Hertz (1882, conforme citado em Johnson, 1985), criaram um modelo matemático para deformação das asperidades da rugosidade dos perfis em contato. Por simplificação, assumiram que todos topos das rugosidades são de formato esférico, além destas asperidades assumirem distribuições estatísticas mais simples (exponenciais ou gaussianas).

Puderam assim, modelar o comportamento das rugosidades em contato, mediante o contato hertziano, indicando se o contato será elástico ou plástico. Muitas vezes, um contato que macroscopicamente não apresenta escoamento, ao ser considerado na escala de suas rugosidades, pode escoar mesmo sob baixas cargas aplicadas.

Ao considerar-se a lubrificação relacionada a rugosidade superficial, grandes avanços têm sido obtidos em estudos para camisas de blocos de motor, sendo que os esforços mais recentes são direcionados aos casos de motores diesel.

Por necessitarem de uma redução de peso cada vez maior, os carros de passeio encaminham-se para um conceito de veículo de alto desempenho, contudo com baixo consumo de combustível e baixos níveis de emissões de poluentes. Estas características são diretamente relacionadas com o nível de acabamento da rugosidade da camisa (ou cilindro) dos blocos de motor. Além disso, novos conceitos de materiais aplicados à estas peças, como ferros fundidos de grafite vermicular, permitem estruturas de ferro mais coerentes e monolíticas, além de maior resistência que o ferro fundido comum. Ambas características permitem estruturas de rugosidade mais refinadas.

Embora o ferro fundido de grafite vermicular garanta estas qualidades, sua usinagem ainda não é um processo corriqueiro: muitas vezes é necessário recorrer à usinagem com altíssima velocidade de corte para obter superfícies satisfatórias. Porém, para este tipo de usinagem, é preciso ainda desenvolver novas ferramentas, no sentido que mantenham por mais tempo suas características, principalmente a condição de ponta e os ângulos de corte por mais tempo. O arredondamento da ponta destas ferramentas nestes casos acarreta um aumento nos esforços de corte, junto de mudanças no padrão de rugosidade e perda da precisão (Klink & Flores, 2001).

Interessante ainda é a possibilidade de usinagens destas camisas através de brunimento a laser: é possível a criação de sulcos de profundidade de 5 μm , ou seja, em uma escala compatível a da rugosidade obtida por brunimentos convencionais. Estes sulcos permitem que uma micro câmara de óleo lubrificante permaneça entre o anel do pistão e a camisa do bloco, reduzindo o desgaste das peças em movimento e diminuindo o consumo de óleo lubrificante (Klink, 1997).

3.3. Definições de Alguns Parâmetros de Rugosidade

A rugosidade média, denominada R_a , é possivelmente o mais antigo conceito de rugosidade ainda em uso. Sua disseminação pode ser atribuída à facilidade de cálculo, mesmo com aparelhos analógicos simples. Sua definição pode ser expressa como o desvio médio de um perfil de sua linha média. Outra boa definição seria a distância média de um perfil desde sua linha média, sobre um comprimento medido. Matematicamente, a expressão é a seguinte:

$$R_a = \frac{1}{l_m} \int_0^{l_m} |y(x)| dx \quad (6)$$

Um exemplo gráfico desta operação numérica é ilustrada na Figura 26.

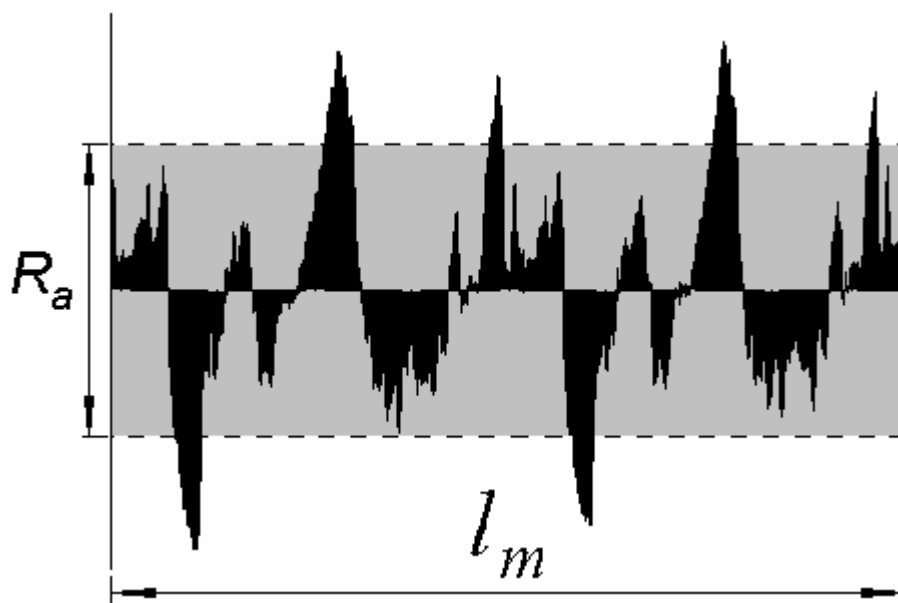


Figura 26: Ilustração do parâmetro de rugosidade R_a .

Este parâmetro de rugosidade tem a desvantagem de não esclarecer ou caracterizar a variabilidade dos diferentes valores locais da rugosidade sobre o perfil analisado.

Outro conceito amplamente difundido é o espaçamento médio de picos (S_m). Sua definição é aceita como o comprimento medido sobre a quantidade de picos contados (D). A definição de pico é como o maior ponto registrado entre dois cruzamentos da linha média do perfil.

O espaçamento médio de picos pode ser definido matematicamente da seguinte maneira:

$$S_m = \frac{l_m}{D} \quad (7)$$

Este parâmetro é amplamente utilizado em indústrias de chapas metálicas, por designar uma condição que afeta diretamente a aparência, a função e a conformabilidade deste produto acabado.

Já o parâmetro R_y é definido como sendo a distância entre o pico mais alto e o vale mais baixo, dentro de um comprimento medido de um perfil de rugosidade. A figura seguinte ilustra um exemplo deste parâmetro:

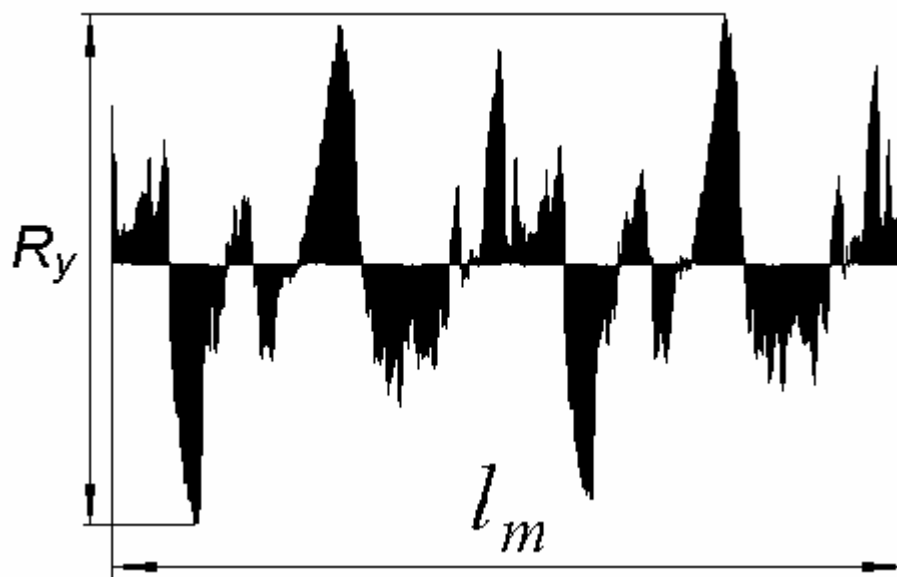


Figura 27: Ilustração do parâmetro de rugosidade R_y .

O parâmetro R_y tem vantagens e desvantagens: é um verdadeiro indicador da distância máxima dos limites de picos e vales de um comprimento medido. Contudo, o pico mais alto pode estar no começo do perfil analisado, enquanto o vale mais profundo pode estar no final deste perfil. Assim, estas duas ocorrências estão muito pouco correlacionadas, e o parâmetro R_y registrado pode transmitir uma idéia incorreta sobre a superfície.

Para evitar tais situações, há um outro parâmetro de rugosidade semelhante ao R_y , o R_z . De acordo com a norma ISO 4287, o parâmetro R_z é a distância média entre os 5 picos mais altos e os 5 vales mais profundos, dentro de um comprimento medido, ou:

$$R_z = \frac{1}{5} \left(\sum_{i=1}^5 p_i + \sum_{i=1}^5 v_i \right) \quad (8)$$

Graficamente sendo mostrado na Figura 28.

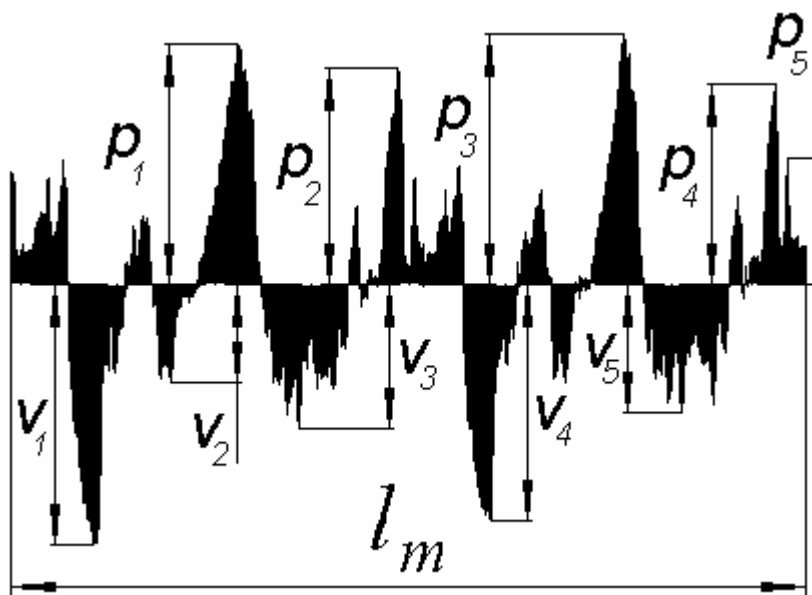


Figura 28: Ilustração do parâmetro de rugosidade R_z .

Juntos, os parâmetros R_y e R_z fornecem uma idéia mais clara para a monitoração da variação do acabamento superficial em um processo de fabricação. Valores similares de R_y e R_z indicam um acabamento superficial consistente de um processo de fabricação, enquanto que diferenças significativas destes dois indicam defeitos superficiais quando se deseja uma superfície consistente.

R_z isoladamente pode ser considerado mais sensível a mudanças no acabamento superficial que R_a , por exemplo. Isso porque somente alturas máximas de perfis, e não suas médias, são comparadas e analisadas.

Para a compreensão do conceito de momentos espectrais, é necessário estabelecer antes que toda onda ou função periódica de qualquer natureza, assim como o perfil de superfície retratado pela rugosidade, pode ser descrito de formas espectrais. O espectro de uma função periódica é relacionado à distribuição estatística de seus valores. No caso da rugosidade, refere-se a curva de distribuição das amplitudes do perfil analisado.

Assim, considerando-se o perfil de rugosidade como uma distribuição discreta de valores de altura (positiva para os picos, negativa para os vales, por exemplo), pode-se criar tal curva de distribuição de amplitudes, como um histograma da distribuição das alturas reconhecidas no perfil.

De forma matemática, toda a curva de distribuição de amplitudes pode ser descrita através de seus momentos espectrais, de diversas ordens. Sendo a função de densidade espectral um perfil definida como $s(f)$, o momento espectral é definido pela expressão:

$$m_n = (2p)^n \int_{f_1}^{f_2} f^n s(f) df \quad (9)$$

Onde (f_1, f_2) é a banda de frequências presente na informação analisada. Pode-se assim criar momentos de qualquer ordem. Nesta revisão bibliográfica será dada maior ênfase ao momento espectral de quarta ordem (m_4).

O momento espectral de quarta ordem pode ser interpretado como uma medida da agudeza da curva de distribuição de amplitudes de uma função. É muitas vezes referido incorretamente por alguns autores por Kurtose, que na verdade é o momento espectral de quarta ordem dividido pela quarta potência do desvio padrão desta função.

Para melhor compreensão deste momento espectral de quarta ordem, a função (9) pode ser desenvolvida da seguinte maneira, conforme proposto por McCool (1988):

$$m_4 = \text{AVG} \left[\left(\frac{d^2 y}{dx^2} \right)^2 \right] \quad (10)$$

Sendo $\text{AVG}(f)$ a média dos valores descritos por f em um dado intervalo.

Para desenvolver esta expressão, utilizam-se as seguintes premissas:

1. A função analisada, $y(x)$, que representa o desvio de altura de um perfil em relação ao plano médio de sua superfície, em uma posição x , relativa a uma origem arbitrária, é discreta. Ou seja, composta de valores numéricos obtidos a partir de uma leitura de valores de uma superfície com uma frequência de coleta de dados.
2. Por ser uma frequência de coleta de valor elevado, a função poderia ser interpretada como um sinal contínuo. Entretanto, por conveniência esta será interpretada e analisada como discreta, simplificando as derivações da

função $y(x)$ como médias discretas entre cada dois pontos consecutivos

$$\left(\frac{dy}{dx} \cong \frac{\Delta y}{\Delta x} \right).$$

Assim, a função (10) pode ser reescrita desta maneira:

$$m_4 = \text{AVG} \left[\left(\frac{\Delta \left(\frac{\Delta y}{\Delta x} \right)}{\Delta x} \right)^2 \right] \quad (11)$$

Uma interpretação gráfica deste conceito pode ser observada na Figura 29.

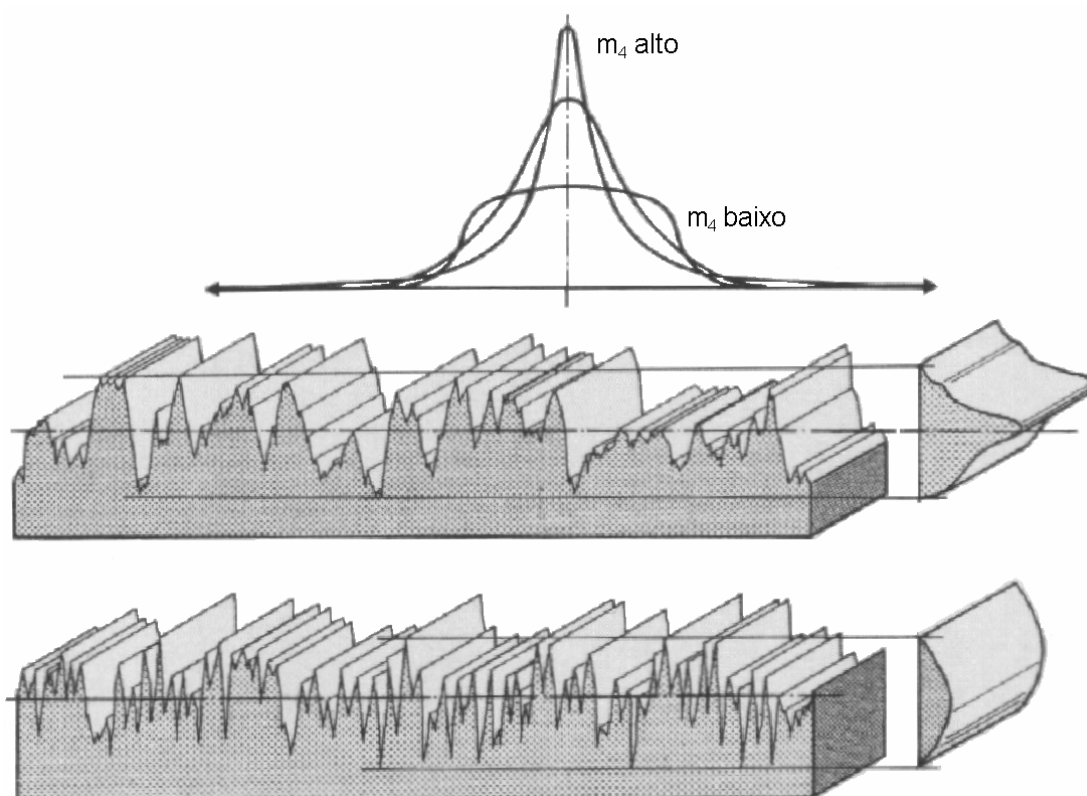


Figura 29: Comparação de duas distribuições de alturas de perfis e seu momento espectral de quarta ordem.

Portanto, um momento espectral de quarta ordem elevado indica amplitudes agudas na curva de distribuição, correspondentes à picos e vales grandes e agudos,

enquanto que um de valor baixo corresponde a amplitudes achatadas na curva de distribuição, indicativas de muitos picos e vales pequenos e de topo arredondado, para um perfil de superfície analisado.