

2

Rugosidade Superficial

2.1

Histórico

Quando o homem primitivo fabricou a ferramenta, ele já tinha conhecimento da importância do acabamento das superfícies. A peça usada para moldar ou afinar o corte devia possuir uma superfície de desbaste e o corte da ferramenta devia ser fino e regular. Depois, ele fabricou a primeira roda e, desde esse tempo, tem procurado a perfeição. A moderna industrialização, por razões econômicas, tornou os termos rugosidade superficial muito difundidos.

Pode-se dizer que somente no final deste século, o assunto começou a ser difundido em escala industrial. Deixou o laboratório de pesquisa e foi para a oficina para ser usado. Hoje, os seus conceitos são empregados diuturnamente e os parâmetros de avaliação multiplicam-se, criando a necessidade de uma atualização constante.

Atualmente ainda é usado o controle visual, quando observamos o acabamento de uma superfície, e o controle tátil quando comparamos este acabamento com placas padrão de rugosidade. Entretanto esta prática nos fornece uma informação grosseira do estado da superfície examinada.

Após o uso dos sentidos humanos, foram utilizados os microscópios, que permitiam uma visão ampliada de uma porção da superfície examinada.

Obtinha-se, assim, uma imagem que deveria ser julgada, sem ser possível estabelecer um valor numérico que a pudesse definir. Observava-se o espaçamento e a largura das irregularidades, mas não a sua altura. Havia a necessidade de observar a superfície sob um corte vertical, para se poder também avaliar também a altura das irregularidades. Foram empregados sistemas de corte óptico que consistiam em uma lâmina de luz que incide

obliquamente à superfície e cuja reflexão era recebida por uma ocular ou mesmo uma tela de projeção, como em alguns projetores de perfis atuais.

Nesse exemplo , a resolução não é satisfatória ; além disso, não se podem usar certos critérios de avaliação que exijam cálculos. Os processos industriais requerem uma resolução maior e com mais rapidez . Esse método é empregado ainda hoje em superfícies muito moles e que contenham irregularidade a partir de um certo tamanho , pois a ampliação não pode ser muito grande . Pode-se medir, por esse processo , a altura das irregularidade, o espaçamento e também sua forma , desde que a ampliação seja suficiente.

Outros meios de se fazer essa medição também já foram usados como: um comparador mecânico com uma ponta de contato bem fina, deslocando-se sobre a superfície e suspenso por um suporte, pode-se medir a amplitude das irregularidade , ou seja, a sua altura. A velocidade de deslocamento deve ser adequada, para que a ponta do comparador possa explorar todas as irregularidades.

Meios mecânicos e óptico-mecânicos também já foram utilizados para fazer levantamento de superfícies e registrá-los em papel , com ampliações apreciáveis . Dessa forma, poder-se-ia analisar o gráfico para fazer o julgamento da superfície . Ou seja, a partir do perfil efetivo era possível avaliar a textura, utilizando-se um dos critérios normalizados e assim expressar em números a qualidade da superfície. É um método demorado.

Outro meio óptico utilizado foi o interferômetro, que , empregado o princípio de interferência da luz, podia permitir a observação e medição do espaçamento e da altura das irregularidade com boa precisão.

Ex: Uma superfície de um bloco-padrão observada num microscópio de interferência , apresentando uma ranhura de $0,25 \mu\text{m}$ de profundidade. A distância entre as franjas é de $0,25\mu\text{m}$.

Apesar disso ,ainda não havia sido alcançada uma solução satisfatória para dois problemas importantes: representar a qualidade da superfície por um número e ser um processo rápido de avaliação.

A observação contínua causa fadiga ao operador , e superfícies que não forem boas refletoras de luz não podem ser examinadas por esse processo. Realmente, como avaliador da textura superficial na concepção atual , esse processo não é mais usado. Atualmente, ele é empregado somente para avaliar a planeza das superfícies pequenas e bem acabadas , como por exemplo: blocos-padrão , peças especiais , etc.

Os microscópios eletrônicos também são empregados para estudo de laboratórios como método comparativo. Eles dão bons subsídios , principalmente em estudos de desgastes. Porém , para utilização em escala industrial , não apresentam viabilidade de uso.

Nota-se que os microscópios apresentam uma porção de superfície examinada, e os aparelhos (registradores gráficos ou de cortes ópticos) apresentam apenas o perfil de um corte da superfície. Entre essas duas opções distintas para a avaliação da textura superficial, os estudiosos no assunto entenderam que a segunda opção é a melhor. Isto é , utilizar um perfil apresentado por um corte da superfície para tomar como amostra representativa e fazer a avaliação.

Assim, todos os critérios normalizados ou ainda em estudos para normalização são baseados no perfil da superfície.

Os principais motivos para essa escolha surgiram com a evolução da eletrônica , permitindo a fabricação de aparelhos que , a partir do perfil efetivo , podiam calcular os parâmetros com precisão e indicar rapidamente os seus valores num mostrador de fácil leitura. A reprodução gráfica do perfil também é obtida com a mesma facilidade e com ampliações acentuadas.

Além disso , os aparelhos podiam ser operados mesmo que a pessoa não recebesse muito treinamento, ou seja, o operador não inseria um erro acentuado na operação de medição.

Com esses aparelhos e normas , finalmente , podia-se ter uma avaliação rápida , conforme ,e mais do que isso, ser representada por um número que a definia e ser universalmente reproduzido e comparado.

O aparelho então criado foi chamado de RUGOSÍMETRO; com muita propriedade ; pois era destinado à avaliação da rugosidade ou textura primária simplesmente. Com o tempo, apareceram também os critérios para avaliação da textura secundária ou ondulação , e muitos aparelhos evoluíram para essa nova dimensão . Mesmo assim , por comodidade, conservou-se o nome genérico do rugosímetro também para esses aparelhos ,que, além da rugosidade mediam também a ondulação.

Atualmente , os aparelhos em uso , tanto nos laboratórios como nas linhas de produção , são os eletrônicos , que podem ser classificados em dois grandes grupos .

- Aparelhos que fornecem somente a leitura dos parâmetros de rugosidade.
- Aparelhos que, além da leitura , permitem o registro , em papel, do perfil efetivo da superfície.

Os primeiros são mais empregados em linhas de produção, enquanto os segundos tem mais uso nos laboratórios. Isso porquê apresentam um gráfico de importante para análise mais profunda da textura.

2.2

Conceituação

As superfícies dos componentes mecânicos devem ser adequadas ao tipo de função que exercem. Por esse motivo ,a importância do estudo do acabamento superficial aumenta à medida que crescem as exigências do projeto. As superfícies dos componentes deslizante, como eixo de um mancal, devem ser lisas para que o atrito seja o menor possível. Já as exigências de acabamento das superfícies externas da tampa e da base do mancal são menores. Além disso , existem as superfícies controladas a partir de normas que estabelecem um valor máximo para sua comercialização. Ex : Padrões de massa

A produção das superfícies lisas exige ,em geral , custo de fabricação mais elevado. Os diferentes processos de fabricação de componentes mecânicos determinam acabamento diversos nas suas superfícies.

As superfícies , por mais perfeita que sejam , apresentam irregularidades. E, essas irregularidades, compreendem dois grupos de erros: erros macrogeométricos e erros microgeométricos.

2.2.1

Erros macrogeométricos

São os erros de forma , verificáveis por meio de instrumentos convencionais de medição, como micrômetros , relógios comparadores, projetores de perfil , etc. Entre esses erros , incluem-se divergências de ondulações , ovalização , retilineidade , planicidade, circularidade etc.

2.2.2

Erros microgeométricos

São os erros conhecidos como rugosidade.

2.2.3 Rugosidade

É o conjunto de irregularidades ,isto é, pequenas saliências e reentrâncias que caracterizam uma superfície. Essas irregularidades podem ser avaliadas com aparelhos eletrônicos , exemplo o rugosímetro. A rugosidade desempenha um papel importante nos componentes mecânicos.

A influência na:

- Qualidade de deslizamento;
- Resistência ao desgaste;
- Possibilidade de ajuste forçado;
- Resistência oferecida pela superfície ao escoamento de fluidos e lubrificantes;
- Qualidade de aderência que a estrutura oferece às camadas protetoras;
- Resistência à corrosão e à fadiga;
- Vedação;
- Aparência.

A grandeza , a orientação e o grau de irregularidade da rugosidade podem indicar suas causas que ,entre outras , são: imperfeições nos mecanismos das máquinas-ferramenta; vibrações no sistema, desgaste das ferramentas , o próprio método de conformação das peças.

2.2.4 Superfície geométrica

Superfície ideal prescrita no projeto, na qual não existem erros de forma e acabamento. Por exemplo: superfícies plana, cilíndrica etc., que sejam, por definição, perfeitas. Na realidade , isso não existe; trata-se apenas de uma definição.

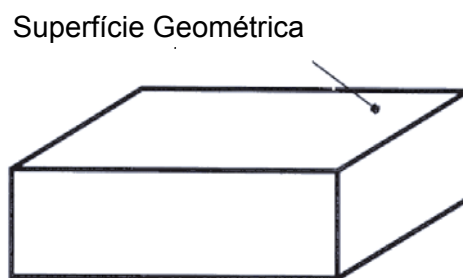


Figura - (1) A superfície geométrica é por definição, perfeita

2.2.5 Superfície real

Superfície que limita o corpo e o separa do meio que o envolve. É a superfície que resulta do método empregado na sua produção .Por exemplo: torneamento, retificação ,ataque químico etc. Superfície que podemos ver e tocar.

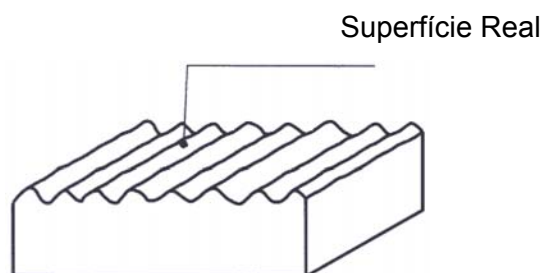


Figura – (2) Superfície real, uma herança do método empregado na usinagem.

2.2.6 Superfície efetiva

Superfície avaliada pela técnica de medição ,com forma aproximada da superfície real de uma peça. É a superfície apresentada e analisada pelo aparelho de medição. É importante esclarecer que existem diferentes sistemas e condições de medição que apresentam diferentes superfícies efetivas.

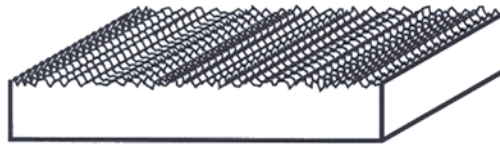
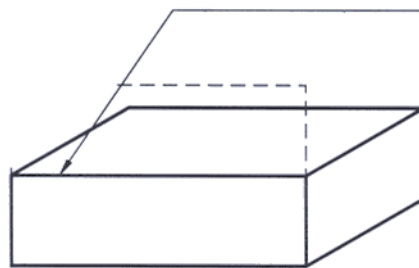


Figura – (3) Superfície efetiva apresentada com ampliação por uma impressora.

2.2.7 Perfil geométrico

Interseção da superfície geométrica com um plano perpendicular. Por exemplo: uma superfície plana perfeita, cortada por um plano perpendicular, originará um perfil geométrico que será uma linha reta.



Perfil Geométrico

Figura – (4) O perfil geométrico e, por definição, perfeito.

2.2.8 Perfil real

Interseção da superfície real com um plano perpendicular. Neste caso, o plano perpendicular (imaginário) cortará a superfície que resultou do método de usinagem e originará uma linha irregular.

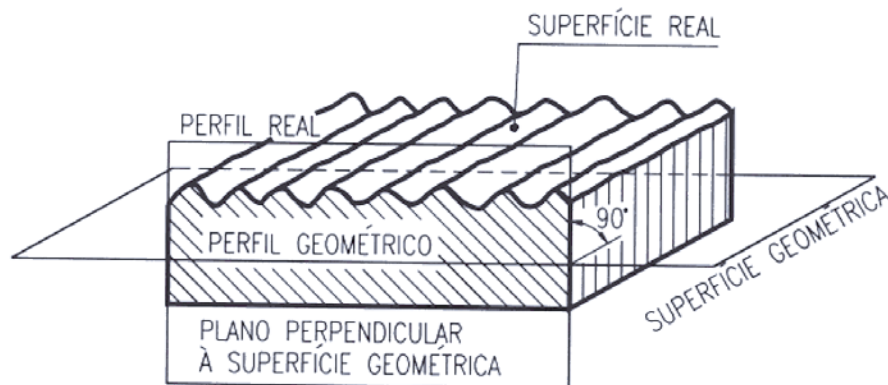


Figura – (5) Perfil real, cortado por um plano perpendicular .

2.2.9 Perfil efetivo

Imagem aproximada do perfil real, obtido por um meio de avaliação ou medição. Por exemplo: o perfil apresentado por um registro gráfico, sem qualquer filtragem e com limitações atuais da eletrônica.

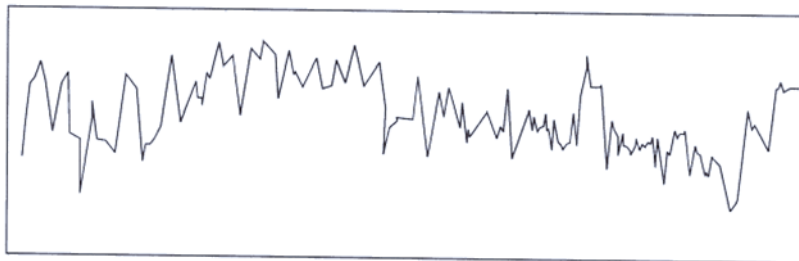


Figura-(6) Perfil efetivo, obtido com impressora de rugosímetro(sem filtrar ondulações)

2.2.10

Perfil de rugosidade

Obtido a partir do perfil efetivo, por um instrumento de avaliação, após filtragem. É o perfil apresentado por um gráfico ,depois de uma filtragem para eliminar a ondulação à qual se sobrepõe geralmente a rugosidade. Tomando-se uma pequena porção da superfície, observam-se certos elementos que a compõem.

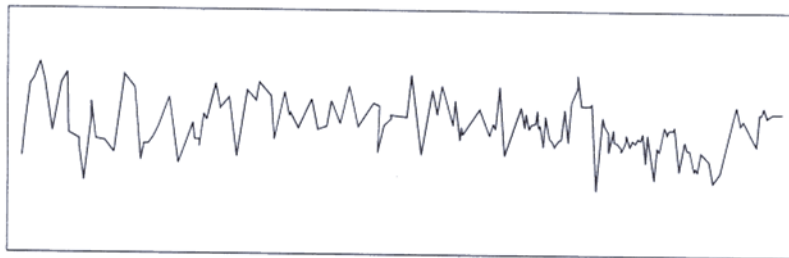


Figura – (7) Perfil de Rugosidade(com filtro).

2.3 Definições

2.3.1

Rugosidade ou textura primária

É o conjunto de irregularidade causadas pelo processo de produção, que são as impressões deixadas pela ferramenta.

2.3.2

Ondulação ou textura secundária

É o conjunto das irregularidade causadas por vibrações ou deflexões do sistema de produção ou tratamento térmico.

2.3.3

Orientação das irregularidades

É a direção geral dos componentes da textura, e são classificados como:

- orientação ou perfil periódico – quando os sulcos têm direções definidas;
- orientação ou perfil aperiódico – quando os sulcos não têm direções definidas.

2.3.4

Passo das irregularidades

É a média das distâncias entre as saliências.

- 1) passo textura primária
- 2) passo textura secundária

2.4

Irregularidade da textura primária.

Composição:

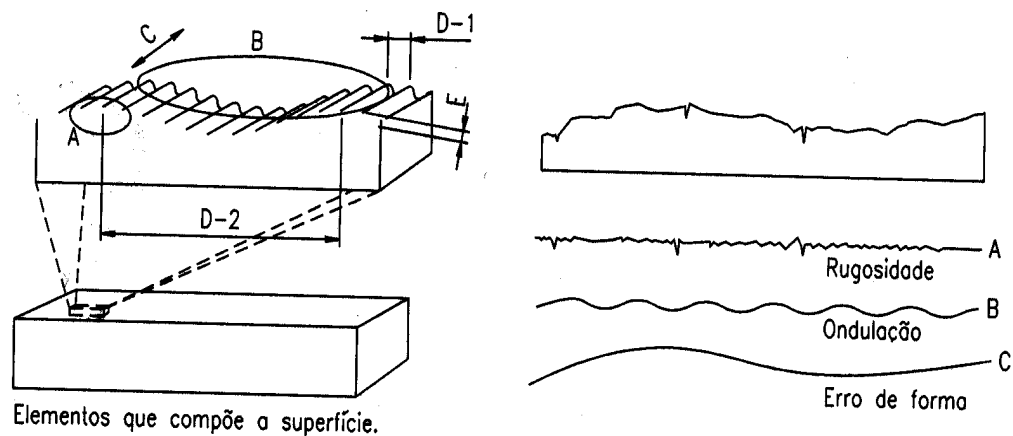


Figura - (8) Elementos que compõem a superfície.

2.4.1

Critérios para avaliar a rugosidade

Comprimento de amostragem (Cut off)

Toma-se o perfil efetivo de uma superfície num comprimento (l), comprimento total de avaliação. Chama-se o comprimento (l_e) de comprimento de amostragem.

O comprimento de amostragem nos aparelhos eletrônicos, chamado de cut-off (l_e), não deve ser confundido com a distância total (l_t) percorrida pelo apalpador sobre a superfície.

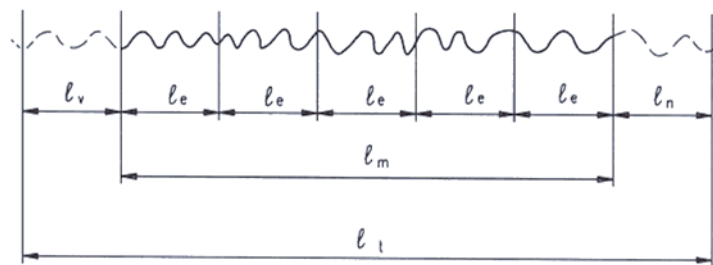


Figura- (9) Comprimentos para avaliação de rugosidade.

A distância percorrida pelo apalpador deve ser igual a $5(l_e)$ mais a distância para atingir a velocidade de medição (l_v) e para a parada do apalpador (l_m).

Como o perfil apresenta rugosidade e ondulação, o comprimento de amostragem filtra a ondulação.

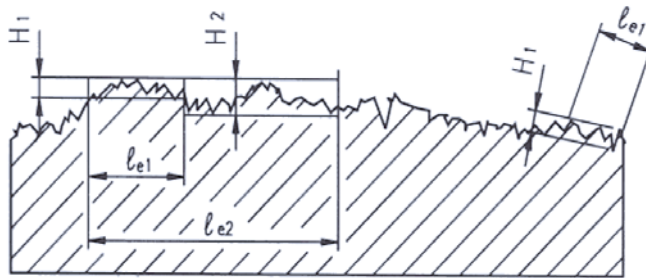


Figura - (10) A rugosidade H_2 é maior, pois (l_{e2}) incorpora ondulação.

A rugosidade H_1 é menor, pois, como o comprimento (l_{e1}) é menor, ele filtra a ondulação.

2.5

Sistemas de medição da rugosidade superficial

É utilizado um sistema básico de medida: o da linha média M . Esse sistema da linha média é o mais utilizado.

2.5.1

Sistema M

No sistema da linha média, ou sistema M , todas as grandezas da medição da rugosidade são definidas a partir do seguinte conceito de linha média: linha média é a linha paralela à direção geral do perfil, no comprimento da amostragem, de tal modo que a soma das áreas superiores, compreendidas entre ela e o perfil efetivo, seja igual à soma das áreas inferiores, no comprimento da amostragem (l_e) .

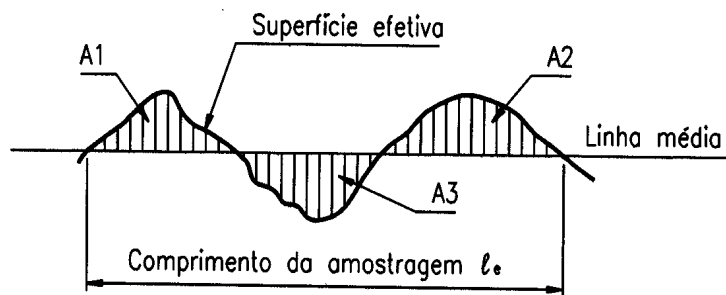


Figura – (11) Cálculo do sistema M

A1 e A2 áreas acima da linha média = A3 área abaixo da linha média.

$$A1 + A2 = A3$$

2.6

Parâmetros de rugosidade

A superfície de peças apresenta perfis bastante diferentes entre si. As saliências e reentrâncias (rugosidade) são irregulares.

Para dar acabamento adequado às superfícies, é necessário, portanto, determinar o nível em que elas devem ser usinadas. Ou seja, deve-se adotar um parâmetro que possibilite avaliar a rugosidade.

2.6.1

Rugosidade média (Ra)

Parâmetro Ra é a média aritmética dos valores absolutos das distâncias h_i do perfil real ao perfil médio - Figura - (12)

$$R_a = \frac{1}{l} \int_{x=0}^{x=l} |h_i| \cdot dx$$

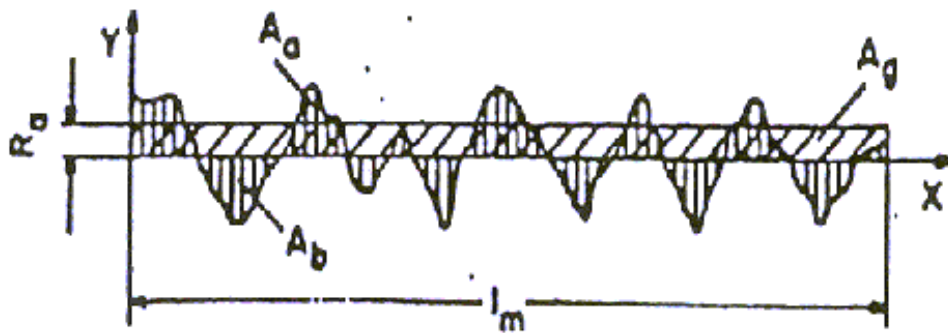


Figura - (12) Medição Ra

O parâmetro Ra pode ser usado nos seguintes casos:

- Quando for necessário o controle contínuo da rugosidade nas linhas de produção;
- Em superfícies em que o acabamento apresenta sulcos de usinagem bem orientados (torneamento, fresagem etc.);
- Em superfícies de pouca responsabilidade, como no caso de acabamentos com fins apenas estéticos.

Vantagens do parâmetro Ra

- É o parâmetro de medição mais utilizado em todo o mundo.
- É aplicável na maioria dos processos de fabricação.
- Devido a sua grande utilização, quase todos os equipamentos apresentam esse parâmetro (de forma analógica ou digital eletrônica).
- Os riscos superficiais inerentes ao processo não alteram muito seu valor.
- Para a maioria das superfícies, o valor da rugosidade nesse parâmetro está de acordo com a curva de Gauss, que caracteriza a distribuição de amplitude.

Desvantagens do parâmetro Ra

- Valor de Ra em um comprimento de amostragem indica a média da rugosidade. Por isso, se um pico ou vale não típico aparecer na superfície, o valor da média não sofrerá grande alteração, ocultando o defeito.
- Valor de Ra não define a forma das irregularidade do perfil. Dessa forma, poderemos ter um valor de Ra para superfícies originadas de processos diferentes de usinagem.
- Nenhuma distinção é feita entre picos e vales.
- Para alguns processos de fabricação com frequência muito alta de vales ou picos, como é o caso dos sintetizados, o parâmetro não é adequado, já que a distorção, provocada pelo filtro eleva o erro a altos níveis.
- Indicação da rugosidade Ra pelos números de classe.

Estado de superfícies em Desenhos Técnicos esclarece que a característica principal (o valor) da rugosidade Ra pode ser indicada pelos números da classe de rugosidade correspondente, conforme tabela a seguir.

Tabela – (1) Classe da rugosidade

CLASSE DE RUGOSIDADE	RUGOSIDADE RA (valor em μm)
N12	50
N11	25
N10	12,5
N9	6,3
N8	3,2
N7	1,6
N6	0,8
N5	0,4
N4	0,2
N3	0,1
N2	0,05
N1	0,025

Na mediação da rugosidade, são recomendados valores para o comprimento da amostragem, conforme tabela abaixo.

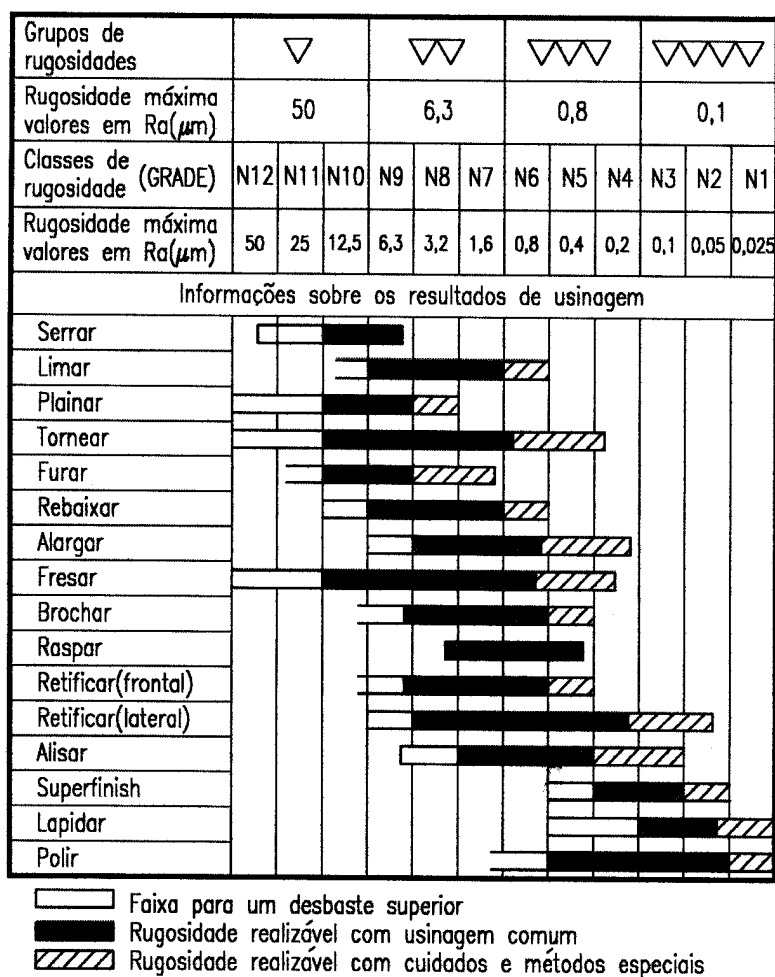
Tabela – (2) Valores do cut off em relação a rugosidade

TABELA DE COMPRIMENTO DA AMOSTRAGEM (CUT OFF)	
RUGOSIDADE RA (μm)	MÍNIMO COMPRIMENTO DE AMOSTRAGEM L (CUT OFF) (mm)
De 0 até 0,1	0,25
Maior que 0,1 até 2,0	0,80
Maior que 2,0 até 10,0	2,50
Maior que 10,0	8,00

Simbologia, equivalência e processos de usinagem.

A tabela que se segue, classifica os acabamentos superficiais - geralmente encontrados na indústria mecânica - em 12 grupos, e as organiza de acordo com o grau de rugosidade e o processo de usinagem que pode ser usado em sua obtenção. Permite, também, visualizar uma relação aproximada entre a simbologia de triângulos, as classes e os valores de Ra (μm).

Tabela – (3) Rugosidade nos processos



2.6.2

Rugosidade máxima ($R_{m\acute{a}x}$)

Está definido como o maior valor das rugosidades parciais (Z_i) que se apresenta no percurso de medição (l_m). Por exemplo: na figura a seguir, o maior valor parcial é o Z_3 , que está localizado no 3º cut off, e que corresponde à rugosidade $R_{m\acute{a}x}$.

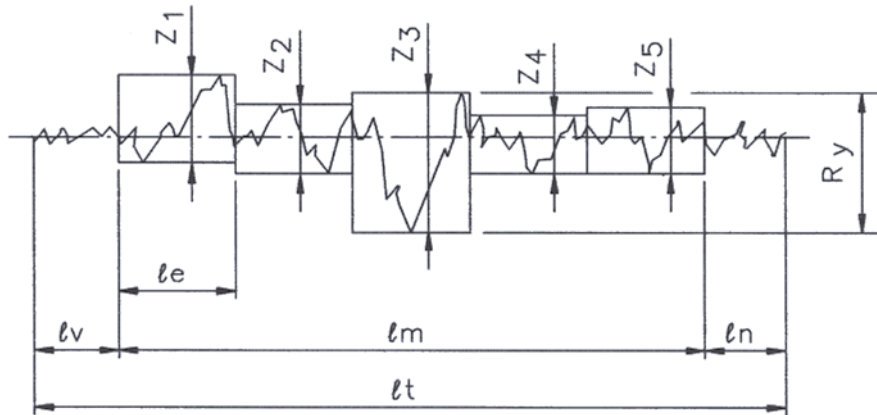


Figura – (13) Rugosidade $R_{\text{máx}}$ definido pelo rugosidade parcial (neste caso Z3)

O parâmetro $R_{\text{máx}}$ pode ser empregado nos seguintes casos:

- Superfícies de vedação;
- Assentos de anéis de vedação;
- Superfícies dinamicamente carregadas;
- Tampões em geral;
- Parafusos altamente carregados;
- Superfícies de deslizamento em que o perfil efetivo é periódico.

Vantagens do parâmetro $R_{\text{máx}}$

- Informa sobre a máxima deteriorização da superfície vertical da peça. É de fácil obtenção quando o equipamento de medição fornece o gráfico da superfície.
- Tem grande aplicação na maioria dos países.
- Fornece informações complementares ao parâmetro R_a (que dilui o valor dos picos e vales).

Desvantagens do parâmetro $R_{\max}$

- Nem todos os equipamentos fornecem o parâmetro. E, para avaliá-lo por meio de um gráfico, é preciso ter certeza de que o perfil registrado é um perfil de rugosidade. Caso seja o perfil efetivo (sem filtragem), deve ser feita uma filtragem gráfica.
- Pode dar uma imagem errada da superfície, pois avalia erros que muitas vezes não representam a superfície como um todo. Por exemplo: um risco causado após uma usinagem e que não caracteriza o processo.
- Individualmente, não apresenta informação, suficiente a respeito da superfície, isto é, não informa o formato da superfície.

2.6.3 Rugosidade (R_z)

Corresponde a média dos cinco valores de rugosidade parcial.

Rugosidade parcial (Z_i).

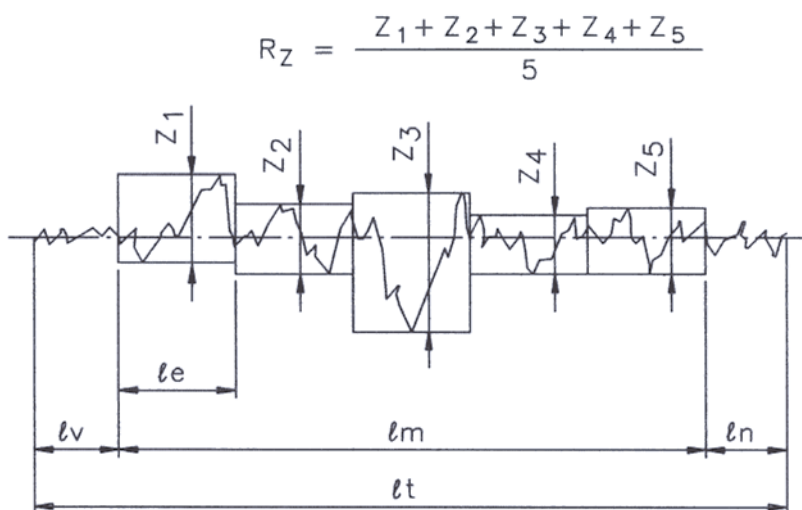


Figura – (14) Rugosidade parcial Z_i , para definir R_z

O parâmetro Rz pode ser empregado nos seguintes casos:

- Pontos isolados não influenciam na função da peça a ser controlada. Por exemplo: superfícies de apoio e de deslizamento, ajustes prensados, etc.
- Em superfícies onde o perfil é periódico e conhecido.

Vantagens do parâmetro Rz

- Informa a distribuição média da superfície vertical.
- É de fácil obtenção em equipamentos que fornecem gráficos.
- Em perfis periódicos, define muito bem a superfície.

Desvantagens do parâmetro Rz

- Nem todos os equipamentos fornecem esse parâmetro.

2.7

Representação da rugosidade

Existem vários tipos de superfície de peças.

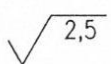
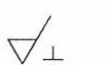
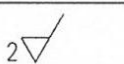
Essa questão foi resolvida com símbolos convencionados, representados por desenhos técnicos.

2.7.1

Identificação do estado de superfície em desenhos técnicos.

QUADRO 1: SÍMBOLO SEM INDICAÇÃO	
SÍMBOLO	SIGNIFICADO
	Símbolo básico; só pode ser usado quando seu significado for complementado por uma indicação.
	Caracteriza uma superfície usinada, sem mais detalhes.
	Caracteriza uma superfície na qual a remoção de material não é permitida e indica que a superfície deve permanecer no estado resultante de um processo de fabricação anterior, mesmo se ela tiver sido obtida por usinagem.

QUADRO 2: SÍMBOLOS COM INDICAÇÃO DA CARACTERÍSTICA PRINCIPAL DA RUGOSIDADE, RA			
SÍMBOLO			SIGNIFICADO
A remoção do material é:			
facultativa	exigida	não permitida	
3,2/ N8/ √ ou √	3,2/ N8/ ▽ ou ▽	3,2/ N8/ ⊖ ou ⊖	Superfície com rugosidade de valor máximo Ra = 3,2 μm
6,3 N9 1,6/ N7/ √ ou √	6,3 N9 1,6/ N7/ ▽ ou ▽	6,3 N9 1,6/ N7/ ⊖ ou ⊖	Superfície com rugosidade de valor máximo Ra = 6,3 μm e mínimo Ra = 1,6 μm

QUADRO 3: SÍMBOLOS COM INDICAÇÕES COMPLEMENTARES	
SÍMBOLO	SIGNIFICADO
	Processo de fabricação: fresar.
	Comprimento de amostragem <i>cut off</i> = 2,5 mm.
	Direção das estrias: perpendicular ao plano; projeção da vista.
	Sobremetal para usinagem = 2mm.

Esses símbolos podem ser combinados entre si, ou utilizados em combinação com os símbolos que tenham a indicação da característica principal da rugosidade Ra.

QUADRO 4: SÍMBOLOS PARA INDICAÇÕES SIMPLIFICADAS	
SÍMBOLO	SIGNIFICADO
	Uma indicação complementar explica o significado do símbolo.
	Uma indicação complementar explica o significado dos símbolos.

2.7.2

Indicações do estado de superfície no símbolo

Cada uma das indicações do estado de superfície é disposta em relação ao símbolo.

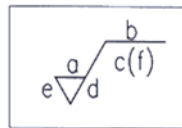


Figura – (15) Indicações do estado de superfície

a = valor da rugosidade R_a , em μm , ou classe de rugosidade N1 até N12

b = método de fabricação, tratamento ou revestimento

c = comprimento de amostra, em milímetro (cut off)

d = direção de estrias

e = sobremetal para usinagem, em milímetro

f = outros parâmetros de rugosidade (entre parênteses)

2.7.3

Indicação nos desenhos

Os símbolos e inscrições devem estar orientados de maneira que possam ser lidos tanto com o desenho na posição normal como pelo lado direito.

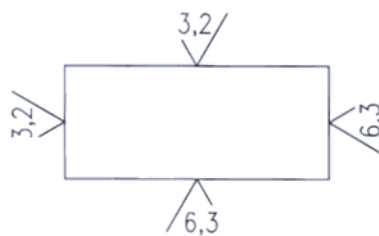
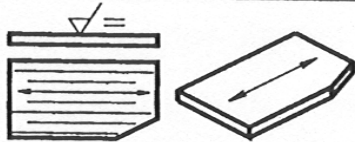
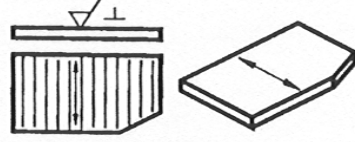
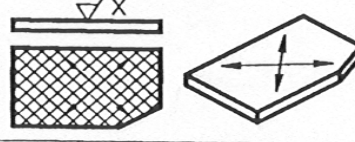
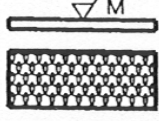


Figura – (16) Indicações rugosidade

2.7.4

Direção das estrias

Se for necessário definir uma direção das estrias que não esteja claramente definida por um desses símbolos, ela deve estar descrita no desenho por uma nota adicional.

QUADRO 5: SÍMBOLO PARA DIREÇÃO DAS ESTRIAS		
SÍMBOLO	INTERPRETAÇÃO	
=	Paralela ao plano de projeção da vista sobre o qual o símbolo é aplicado.	
⊥	Perpendicular ao plano de projeção da vista sobre o qual o símbolo é aplicado.	
X	Cruzadas em duas direções oblíquas em relação ao plano de projeção da vista sobre o qual o símbolo é aplicado.	
M	Muitas direções.	
C	Aproximadamente central em relação ao ponto médio da superfície ao qual o símbolo é referido.	
R	Aproximadamente radial em relação ao ponto médio da superfície ao qual o símbolo é referido.	

A direção das estrias e a direção predominante das irregularidades da superfície, que geralmente resultam do processo de fabricação utilizado.