

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO - USP
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS - EESC
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO
NÚCLEO DE MANUFATURA AVANÇADA - NUMA

METROLOGIA E INSPEÇÃO DIMENSIONAL EM
PROCESSOS DE USINAGEM

Prof. Dr. REGINALDO T. COELHO
Prof. Dr. ERALDO JANONNE DA SILVA

Março 2018

ÍNDICE

Contents

1 – INTRODUÇÃO	4
1.1 – Blocos-Padrões.....	6
1.2 – Paquímetros	8
1.3 – Micrometros.....	12
1.3.1 – Micrometros Externos.....	13
1.3.2 – Micrometros internos	16
1.3.3 – Micrometros de profundidade.....	18
1.4 – Relógios apalpadores	19
1.5 – Relógios comparadores.....	21
2 – Aparelhos e instrumentos específicos usados em usinagem	24
2.1 – Desempeno	24
2.2 – Traçador de alturas	25
3 – Máquina de medir por coordenadas.....	26
4 – Medição de ângulos	27
5 – Ajustes e tolerâncias.	28
6 – Tolerâncias de forma e posição	36
6.1 - TOLERÂNCIA DE RETILINEIDADE	41
6.2 - TOLERÂNCIA DE PLANICIDADE.....	43
6.3 - TOLERÂNCIA DE CIRCULARIDADE	44
6.5 - TOLERÂNCIA DE PARALELISMO	47
6.6 - TOLERÂNCIA DE INCLINAÇÃO	48
6.7 - TOLERÂNCIA DE PERPENDICULARIDADE	49
6.8 - TOLERÂNCIA DE LOCALIZAÇÃO DE UM PONTO	50
6.9 - TOLERÂNCIA DE SIMETRIA.....	51
6.10 - TOLERÂNCIA DE COAXIALIDADE	52
6.11 - TOLERÂNCIA DE BATIDA RADIAL	52
6.12 - TOLERÂNCIA DE BATIDA AXIAL	54
7 - ACABAMENTO SUPERFICIAL – RUGOSIDADE.....	56
7.1 – Rugosidade média aritmética, Ra.	58
7.2 – Rugosidade média, Rz	59
7.3 – Rugosidade máxima, Rmáx	59

7.4 – Desvio Médio Quadrático (<i>Rq</i>), altura máxima do pico mais elevado (<i>Rp</i>) e a máxima profundidade do vale (<i>Rm</i>)	60
7.5 - Determinação do Comprimento de amostragem, <i>le</i> ("Cut-Off") e o percurso de medição, <i>lm</i>	62
7.6 – Medição de Rugosidade	64
8 – Bibliografia	65

1 – INTRODUÇÃO

Metrologia pode ser considerada, em um sentido mais amplo, como o estudo das unidades de medida e dos processos de medição. Sabe-se que tudo o que é fabricado, quer seja por usinagem ou por qualquer outro processo de manufatura, não termina com todas as suas dimensões exatamente iguais às idealizadas mentalmente na concepção do projeto. Para tanto usam-se tolerâncias, que permitem variações dimensionais ainda dentro dos limites aceitáveis para o desempenho do produto. O controle dimensional consiste, pois, na aplicação de processos que permitam manter as variações dimensionais de fabricação dentro dos limites aceitáveis, ou seja, das tolerâncias especificadas em projeto.

A inspeção dimensional é parte de um processo mais amplo destinado ao controle de qualidade em processos de manufatura. Um produto final, máquina ou equipamento, por exemplo possui um atributo de qualidade intimamente conectado aos processos de fabricação pelos quais passaram seus componentes. Pode-se afirmar, de maneira geral, que se os processos de manufatura de um produto possuem boa qualidade, o produto final resultará em uma qualidade igualmente boa. Assim, mantendo-se a qualidade dos processos de manufatura, pode-se inferir que o produto final resultará proporcionalmente bom, segundo suas especificações de desempenho e satisfação do mercado. O controle da qualidade dos processos de manufatura, mais especificamente o controle dimensional é também diretamente proporcional ao custo final, pois inspeções dimensionais demandam tempo, máquinas e instrumentos de alto custo. Por isso, deve-se usar o controle dimensional com cautela e somente em condições realmente imprescindíveis, sob pena de aumento significativo de custos.

Para a medição deve-se inicialmente selecionar os instrumentos ou dispositivos de medição adequados, tendo-se em mente sua adequação em termos de resolução, repetibilidade e exatidão, por exemplo. Embora existam outras maneiras de se definir esses termos, neste texto eles serão usados da seguinte maneira, de forma simples:

- **Resolução:** é a menor leitura que um instrumento de medição é capaz de fornecer, ou seja, é sua menor divisão. Uma régua normalmente tem a resolução de 1 mm, pois os seus menores traços estão a 1 mm de distância entre si. Embora em uma medição com uma régua o operador possa “inferir” valores menores, como 0,5 mm, quando a extremidade sendo medida fica entre dois traços, a resolução desse instrumento é 1 mm. Resolução é muitas vezes confundida com precisão, e neste caso a régua teria uma “precisão” de 1mm.
- **Repetibilidade:** é a capacidade que o instrumento tem de ser repetitivo, ou seja, de medir sempre o mesmo valor. Sabe-se que os próprios instrumentos de medição possuem variações devido aos seus processos de manufatura. Assim, um mesmo instrumento de medida produzirá leituras ligeiramente diferentes a cada medição. Quanto menor essa variação de leituras maior sua

repetibilidade e mais repetitivo é o instrumento. Para se quantificar essa variação entre leituras, usam-se os desvios-padrão para várias medidas consecutivas de uma mesma medição.

- **Exatidão:** é a diferença entre a leitura obtida com o instrumento e o valor real da dimensão. O valor real pode ser um conceito muito abstrato, mas este será considerado o real, quando medido por um instrumento mais exato, até que se chegue ao padrão absoluto. Como padrão absoluto tem-se o metro (m), que é "o comprimento do trajeto percorrido pela luz no vácuo durante um intervalo de tempo de $1/299\,792\,458$ de segundo". Na indústria, em geral, pode-se usar os Blocos-Padrões, os quais foram medidos por máquinas e instrumentos que possuem uma rastreabilidade até o metro-padrão.

Nos processos de manufatura as medições podem ser de 3 tipos: medições diretas, indiretas ou relativas. Nas medições diretas, compara-se a grandeza sendo medida diretamente com uma escala. Neste caso sabe-se seu valor real. Medições com instrumentos de medição do tipo régua, paquímetros, micrometros, etc. são exemplos de medições diretas, conforme a Figura 1.1.

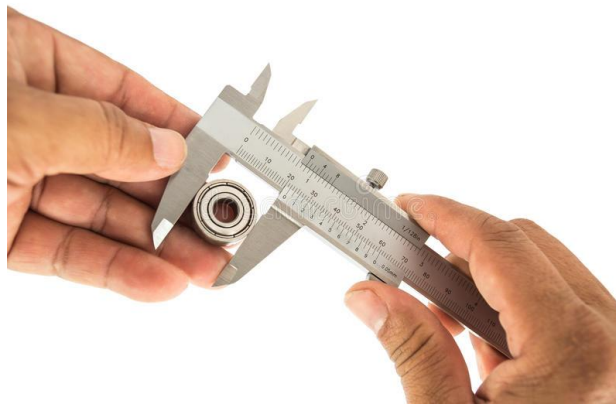


Figura 1.1 – Exemplo de medição direta com paquímetro

Nas medições indiretas, compara-se a grandeza com um padrão conhecido sabendo-se apenas se está de acordo ou não, sem conhecer seu valor real. Exemplos desse tipo de medição são os calibradores, conforme a Figura 1.2.

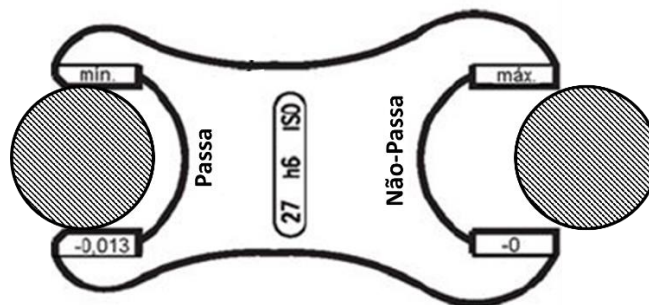
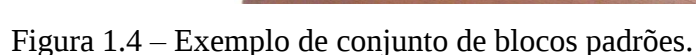


Figura 1.2 – Exemplo de medição indireta com calibrador de boca do tipo passa-não-passa.

Diagrama de um comparador universal montado sobre uma base, com uma coluna e um comparador. O comparador está sendo usado para verificar o paralelismo de uma superfície plana, com uma régua de referência e uma régua de medição.

Para efetuar as diversas medições requeridas pelos variados processos de usinagens há um enorme número de instrumentos e dispositivos já padronizados e que podem ser adquiridos comercialmente.

Para um sistema seguro de inspeção e medição em uma indústria que trabalha com processos de usinagem deve-se manter instrumentos aferidos regularmente e sempre que possível um padrão de medição, usado para as aferições. Este padrão regulamente é um conjunto de Blocos-Padrões. A Figura 1.4 mostra um exemplo de um conjunto de blocos-padrões.



O conjunto desses blocos é encontrado com blocos individuais em diversas dimensões nominais, de modo que se possam compor as mais variadas dimensões com resolução de milésimos de milímetros. Por exemplo para que se tenha uma dimensão de 72,467 mm deve-se montar os blocos de 60, 9, 1,4, 1,06 e 1,007, conforme mostrado na Figura 1.5.

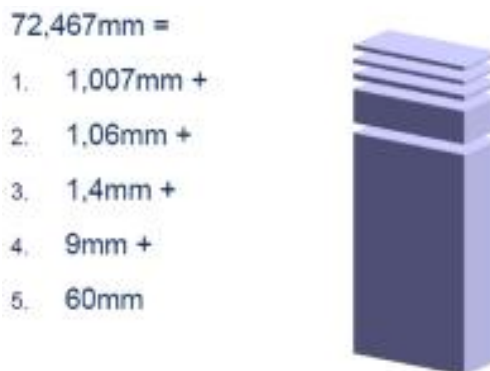
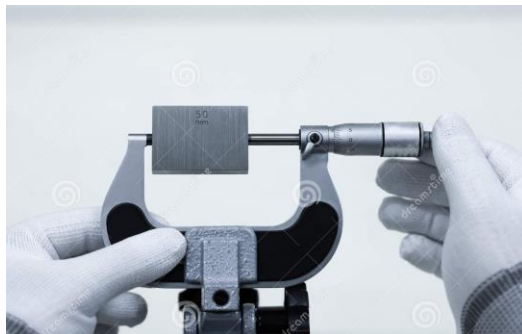
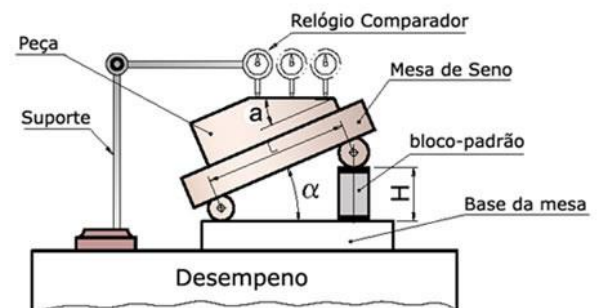


Figura 1.5 – Montagem de blocos-padrões para a dimensão 72,467 mm.

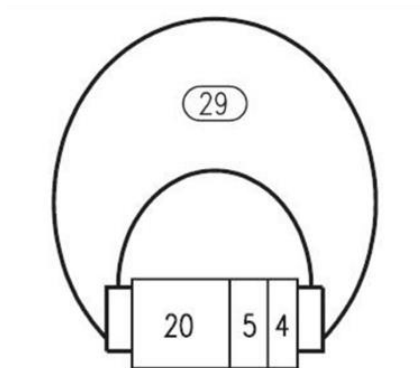
Outro aspecto a ser considerado é a temperatura ambiente, a qual influencia significativamente as dimensões de peças metálicas. Como temperatura padrão adota-se internacionalmente 20°C. Assim, mesmo que as peças usinadas estejam expostas a temperaturas mais altas durante a fabricação, elas devem estar dentro das especificações dimensionais na temperatura ambiente de 20°C. O uso de blocos-padrões é muito variado em uma indústria, desde a aferição de instrumentos de medição mais comuns como paquímetros, micrometros, calibradores passa-não-passa, etc, até no uso de réguas e mesas de seno, conforme mostra a Figura 1.6.



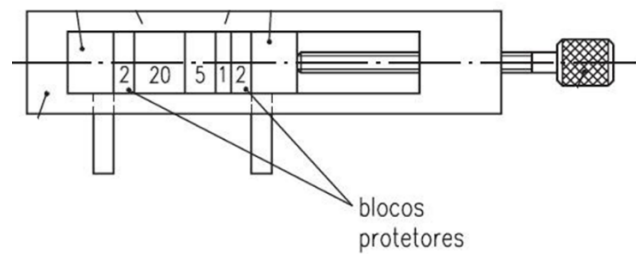
(a) Calibração de micrometro



(b) Mesa de senos



(c) Ajustes de calibrador de boca



(d) Montagem de calibrador

Figura 1.6 – Exemplos de uso de blocos-padrões.

1.2 – Paquímetros

O paquímetro é dos instrumentos mais usados na indústria metal-mecânica desde seus primórdios. É comumente usado para medir dimensões internas, externas, de profundidade, distâncias entre centros de furos, etc. Em geral, paquímetros são oferecidos com capacidade de 150, ou 200 mm, embora comprimentos de até 1 m possam ser encontrados no mercado. O mais comum é encontrar instrumentos com duas escalas, uma superior em polegadas (sistema inglês) e uma inferior em mm (sistema métrico). A Figura 1.7 ilustra algumas das aplicações mais comuns para esse instrumento de medida.

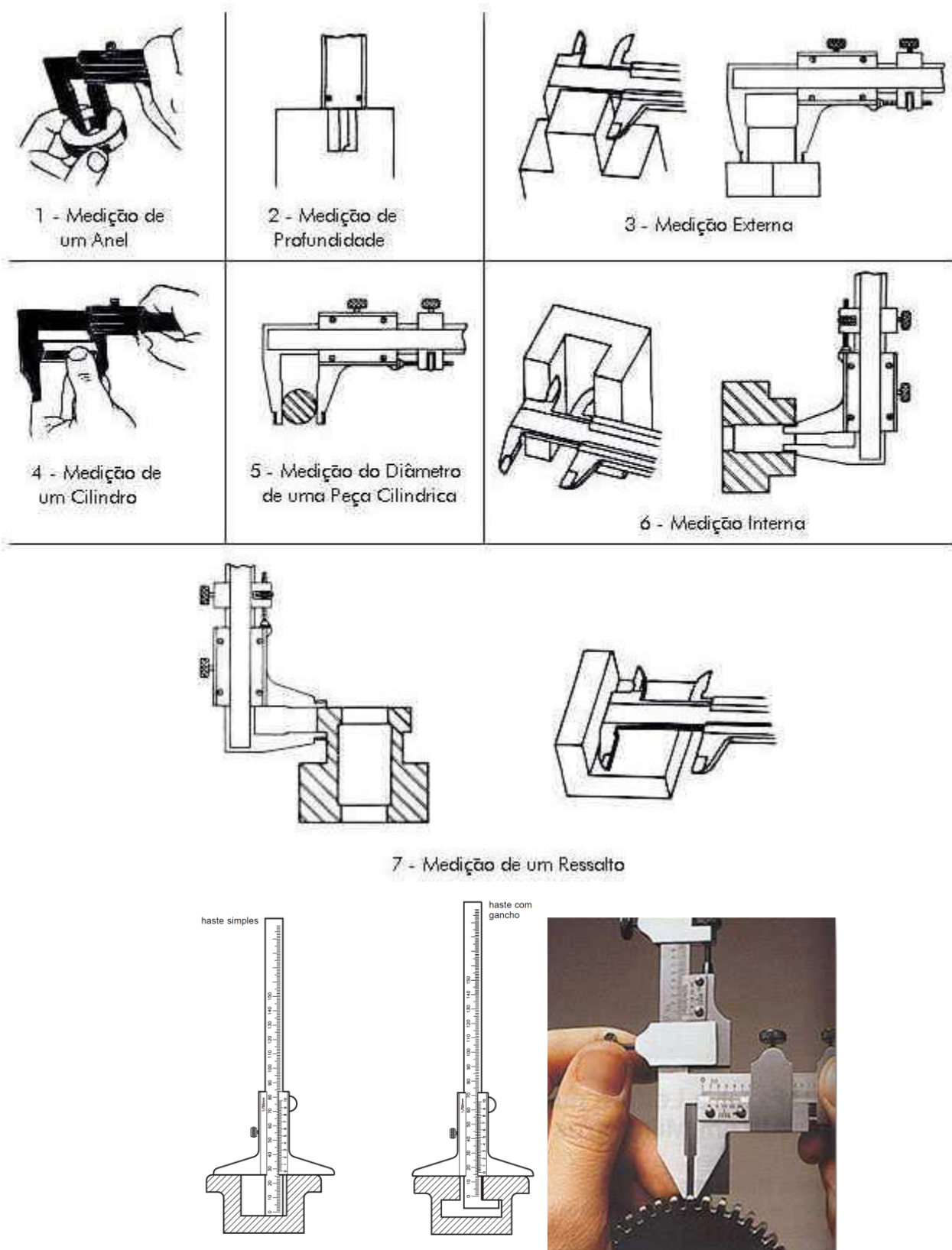


Figura 1.7 – Exemplos de aplicações do paquímetro para medições.

O instrumento, basicamente, consiste em escalas 2 graduadas, em uma haste com um encosto fixo e duas móveis, assim como uma garra fixa e outra móvel. A Figura 1.8 mostra um exemplo de um paquímetro universal com as suas principais partes funcionais.

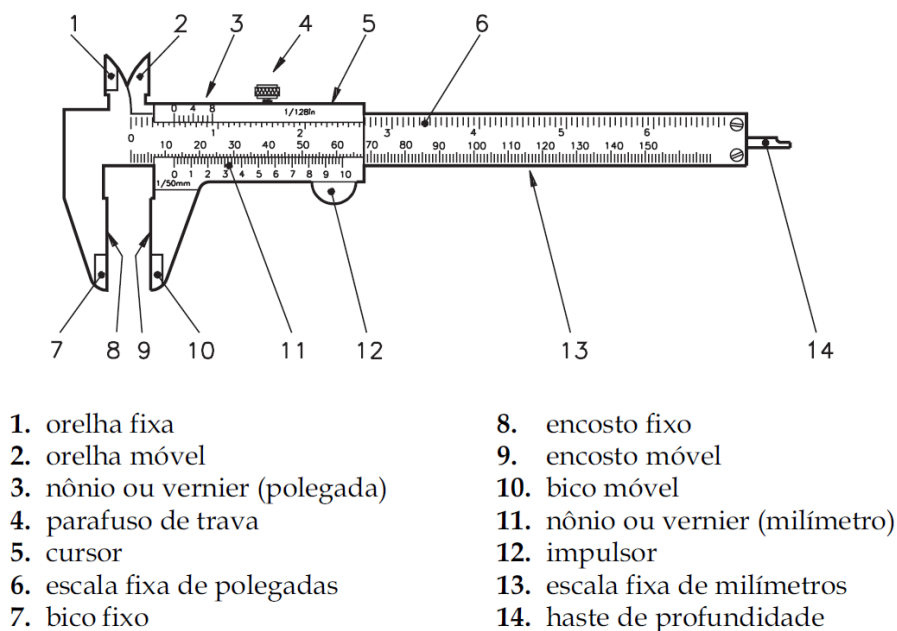


Figura 1.8 – Paquímetro universal e suas principais partes funcionais.

O paquímetro universal permite medições, em sistema métrico, com resolução de até 0,02 mm, usando um dispositivo chamado nônio na escala móvel. O nônio foi inventado pelo matemático português Pedro Nunes (século XIV), por meio do qual foi possível, à sua época, efetuar medições com rigor de alguns minutos de grau em um astrolábio. Isso aumentou significativamente a exatidão da navegação.

Para um paquímetro com resolução de 0,1 mm, por exemplo, toma-se na escala móvel do nônio uma extensão de 9 mm (L) dividida em 10 partes iguais. Neste caso a primeira divisão da escala móvel tem 0,9 mm de extensão. Quando essa divisão é alinhada com a de 1 mm da escala fixa de cima a diferença é exatamente 0,1 mm ($a-a'$). A Figura 1.9(b) mostra esse caso.

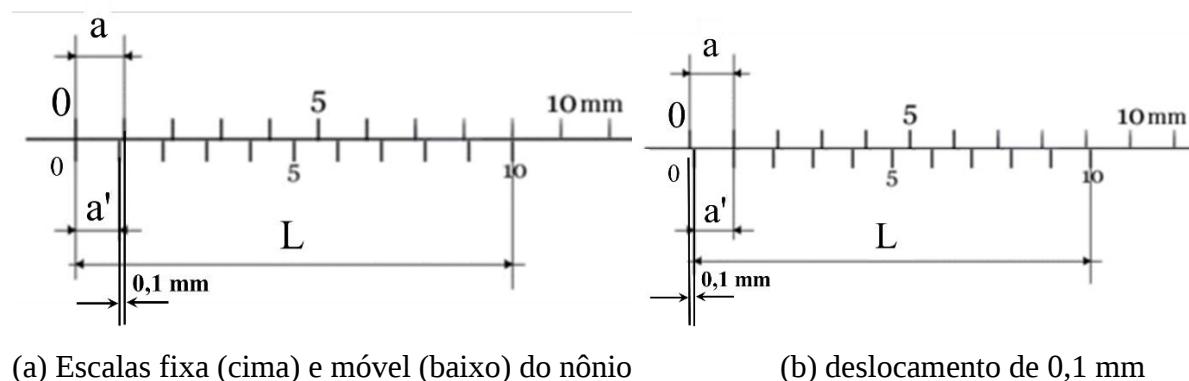


Figura 1.9 – Exemplo do uso do nônio para deslocar 0,1 mm.

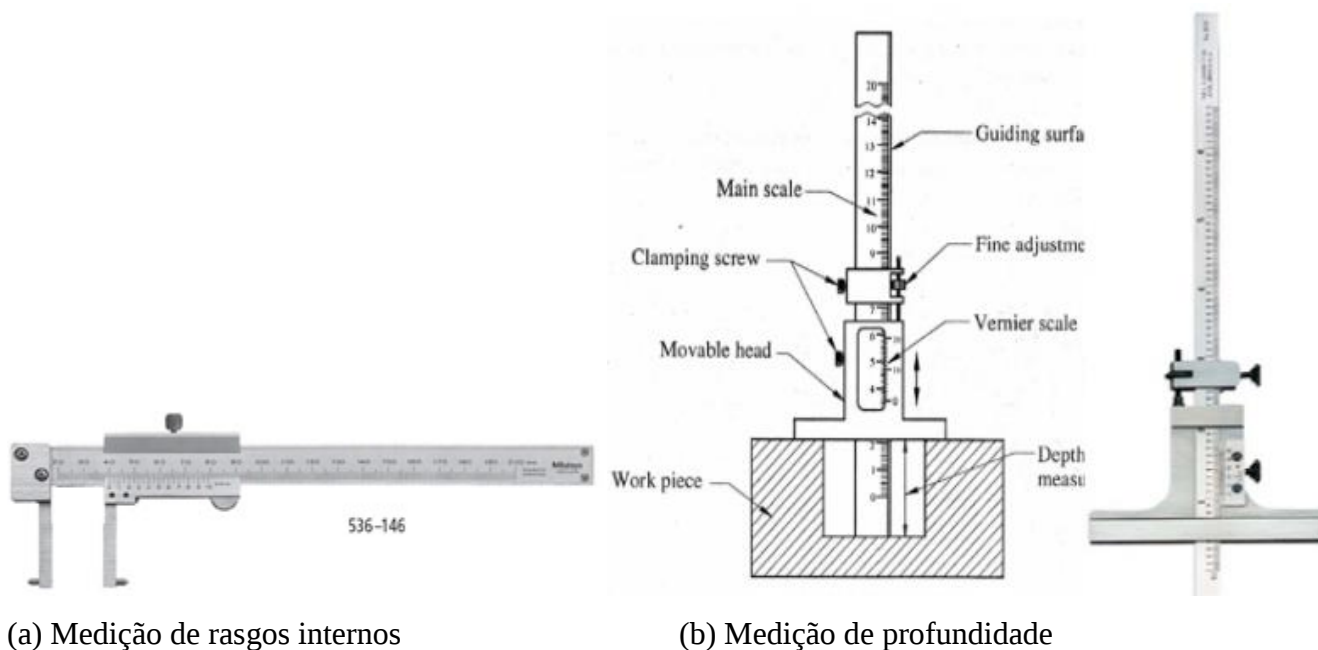
Nesta posição o cursor do nônio (haste móvel) terá se deslocado 0,1 mm abrindo o encosto móvel, a orelha móvel e a haste de profundidade nesta mesma dimensão. Quando a 2ª divisão da escala de baixo se alinhar com a respectiva de cima tem-se 0,2 mm e assim por diante até que a 10ª divisão da escala de baixo se alinhe com a respectiva de cima tendo-se o deslocamento de 1 mm de todas as partes móveis. Para a escala superior em sistema inglês, o nônio funciona de modo similar, porém o deslocamento do nônio é, em geral, de 1/28", ao invés de 0,1mm.

Há outros modelos de paquímetro, por exemplo os da Figura 1.10, que possuem relógio ou mostrador digital, sem a necessidade de um nônio e possibilitam leituras de até 0,001 mm.



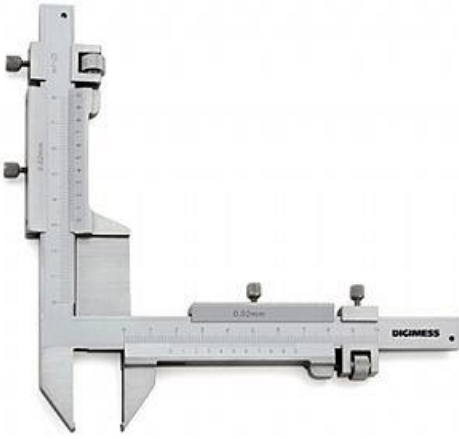
Figura 1.10 – Exemplo de paquímetros com relógio e com mostrador digital.

Há ainda paquímetros para aplicações específicas, como mostrados na Figura 1.10.

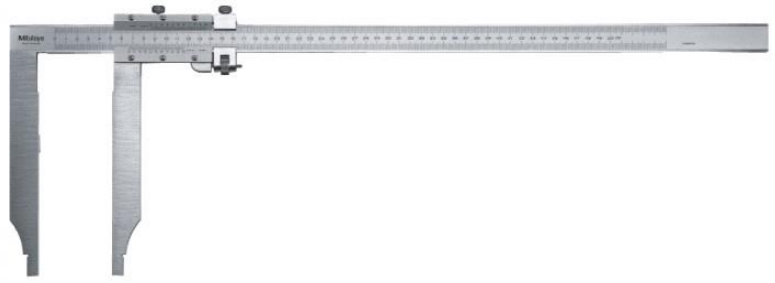


(a) Medição de rasgos internos

(b) Medição de profundidade



(c) Medição de dentes de engrenagens



(d) Para medir até 1000 mm

Figura 1.10 – Paquímetros para aplicações específicas.

Como em todas as operações de medição, as leituras efetuadas com um mesmo paquímetro podem variar mesmo se o operador. Isso porque há erros aleatórios devidos a diversos fatores, muitos dos quais incontroláveis. Quando se muda o operador esses erros podem aumentar devido a outros fatores. No entanto, o mais comum nessas variações entre operadores na medição com paquímetros é a intensidade de pressão que o operador exerce na parte móvel durante a leitura e o erro de paralaxe, pois dependendo do ângulo em que o operador olha o nônio, pode ver a coincidência de traços diferentes entre a escala móvel e a fixa. Para um mesmo operador essas variáveis podem ser mais bem controladas e deve-se sempre que possível medir frequentemente padrões conhecidos para aferir a pressão de cada operador e o alinhamento de leitura. A posição de medição também pode influenciar significativamente a leitura e a medição com paquímetro. A Figura 1.11 mostra a posição mais indicada para a medição com esse instrumento de medição.

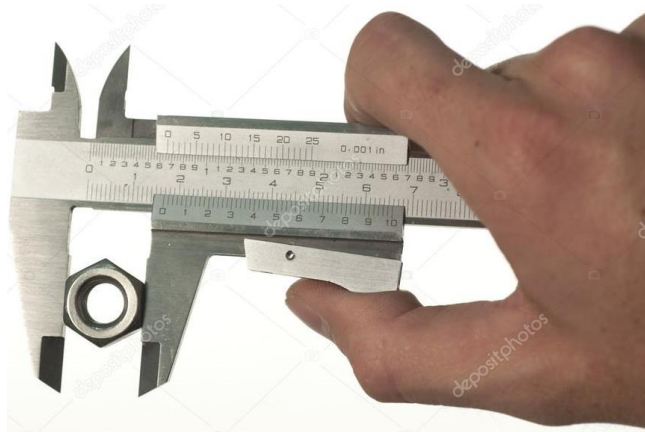


Figura 1.11 – Posição mais indicada para a medição com o paquímetro universal.

1.3 – Micrometros

Os micrômetros são instrumentos de medição mais exatos, precisos e com resolução menor do que os paquímetros podendo substituí-los em algumas das aplicações nas quais essas características são necessárias. Micrômetros podem ler com 0,001 mm de resolução por meio de nônios, ou mostradores digitais. Por terem a capacidade de ler 0,001 mm esses instrumentos são comumente chamados de “micrômetros” (10^{-6} m). Há diversos tipos de micrômetros disponíveis comercialmente, mas estes podem ser divididos em 3 grupos principais: Externos, internos e de profundidade.

1.3.1 – Micrômetros Externos

Os micrômetros externos são encontrados comercialmente em intervalos de medição de 25 mm, tais como 0-25 mm, 50-75 mm, chegando a 2000 mm em casos muito especiais.

A Figura 1.12 mostra um micrômetro externo e suas principais partes funcionais.

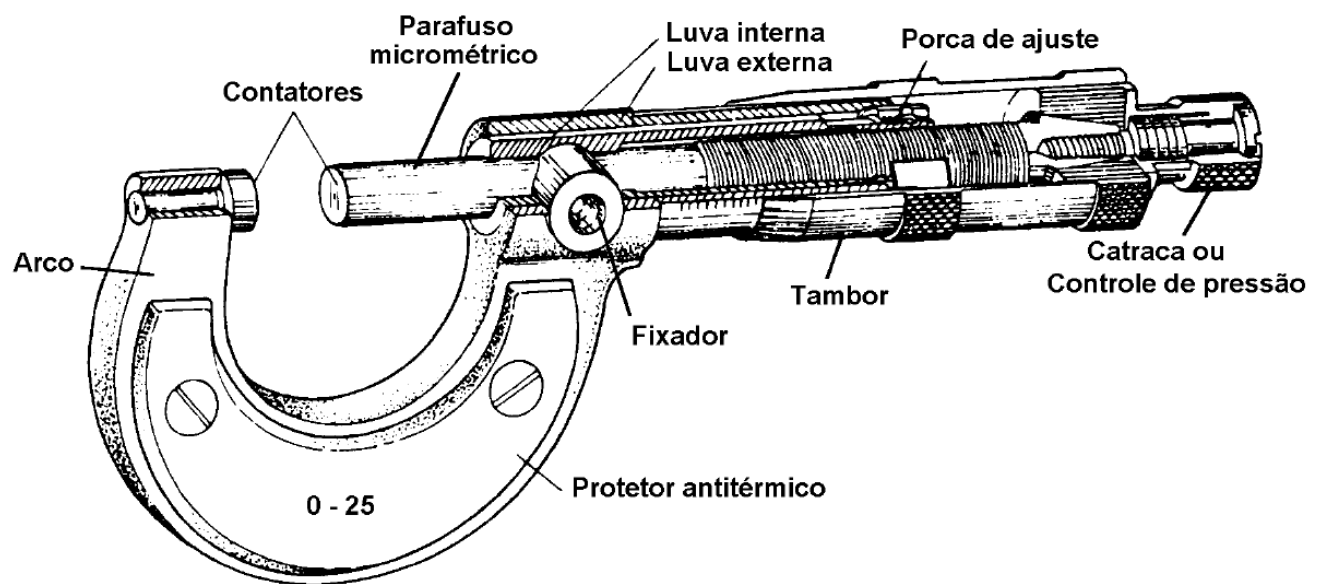


Figura 1.12 – Micrômetro e suas principais partes funcionais.

Seu funcionamento baseia-se no avanço de um parafuso micrométrico (vide Figura 1.13). O passo do parafuso é de 0,5 mm, e cada volta divide-se o tambor em 50 partes iguais, podendo, ainda, conter um nônio. Com isso o tambor possui resolução de 0,01 mm e com o nônio essa chega a 0,001 mm.

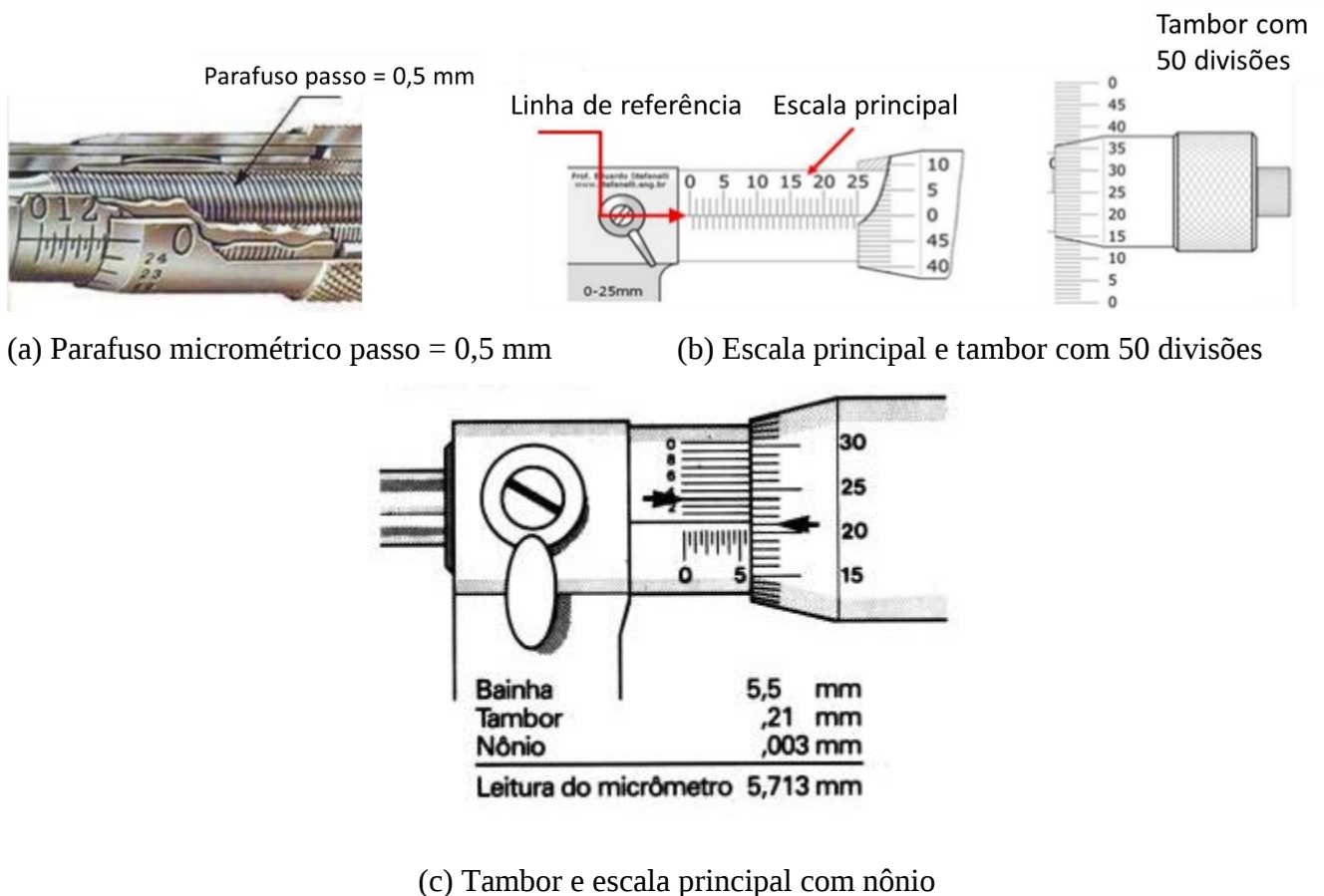


Figura 1.13 – Parafuso micrométrico e tambor de um micrometro.

Para se medir com um micrometro externo aproximam-se as pontas (contatores) das superfícies a serem medidas e gira-se a catraca até que está atue, limitando-se a pressão de medição. Com isso evita-se que haja variação da pressão de medição, eliminando-se um dos desvios de medição mais comuns na medição com paquímetros. A Figura 1.14 mostra alguns posicionamentos corretos para medição com micrometros.

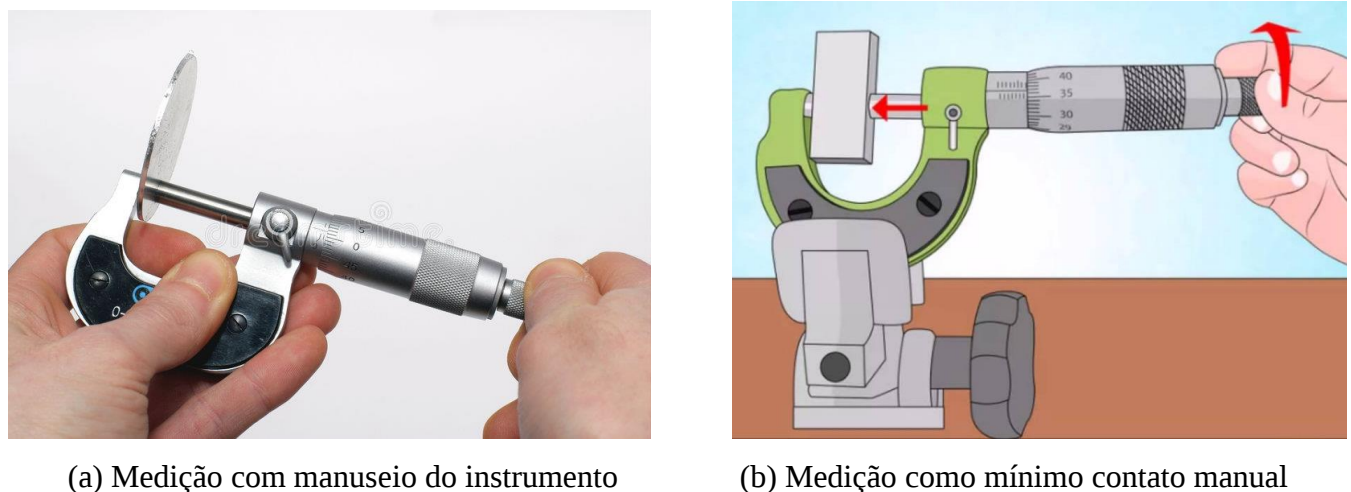


Figura 1.14 – Posicionamentos para medição com micrometros.

O manuseio do micrometro externo, como na Figura 1.14(a), pode influir na leitura devido ao calor da mão do operador que pode afetar a temperatura do instrumento e da peça. Para medições com precisão da ordem de 0,001 mm, a medição com mínimo contato manual deve ser preferida, como mostrado na Figura 1.14(a).

Há uma grande variedade de micrometros disponíveis comercialmente, para aplicações mais específicas. Alguns exemplos desses micrometros podem ser vistos na Figura 1.15.



(a) Micrometro passa não-passa



(b) Espessura para grandes diâmetros



(c) Rasgos em V



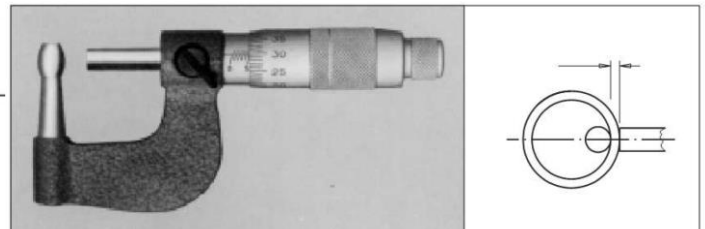
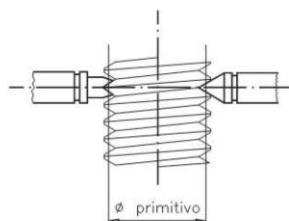
(d) Número ímpar de dentes



(e) Engrenagens



(f) Tipo de acesso paquímetro



(g) Medição de roscas

(h) Medição de parede de tubos

Figura 1.15 – Exemplos de diversos tipos de micrometros externos disponíveis comercialmente.

Os micrometros externos para diâmetros grandes, em geral acima de 100 mm, usam pontas intercambiáveis mantendo sempre o curso máximo do parafuso micrométrico em 25 mm, conforme mostrado na Figura 1.16.



Figura 1.16 – Exemplo de micrometro para grandes diâmetros com pontas intercambiáveis.

Todos os micrometros mostrados até este ponto servem apenas para dimensões externas, ou espessuras. Para medições internas, usam-se outros tipos de micrometros.

1.3.2 – Micrometros internos

Os micrômetros internos (ou imicros) são utilizados exclusivamente para medidas cilíndricas internas. Há dois tipos principais: o micrômetro interno de três contatos e o micrômetro interno de dois contatos. São também baseados em um parafuso com passo de 0,5 mm que a cada volta avança o valor do passo. No entanto, ao avançar expande as pontas de medição as quais estão apoiadas em um cone. A Figura 1.17 mostra esquematicamente esse mecanismo interno.

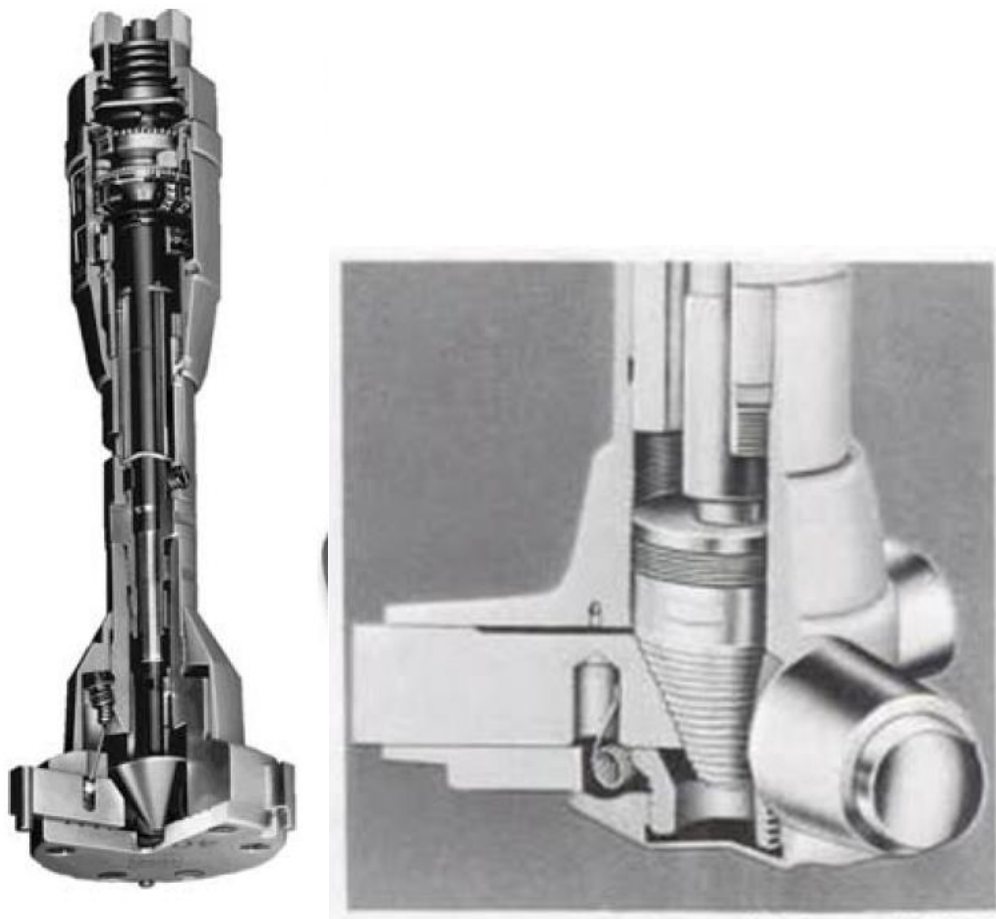


Figura 1.17 – Mecanismo interno de um micrometro interno.

A medição de furos com micrometros internos vai depender não só da dimensão nominal do furo, mas também da profundidade que se deseja medir. Assim, furos com diâmetros tão pequenos quanto 6 mm e tão grandes quanto 300 mm podem ser medidos por micrometros internos com 3 pontas. Da mesma forma podem ser estendidos para alcançar entre 60 e 150 mm de profundidade, respectivamente. A Figura 1.18 mostra alguns desses instrumentos e suas extensões.



Figura 1.18 – Exemplos de micrometros internos de 3 pontas e suas extensões para medições em maiores profundidades.

Juntamente com os instrumentos há padrões para aferições frequentes dos micrometros internos, como mostrado na Figura 1.18.

Os micrômetros internos de dois contatos são mais parecidos com os externos diferindo somente na disposição das duas pontas, como mostra a Figura 1.19

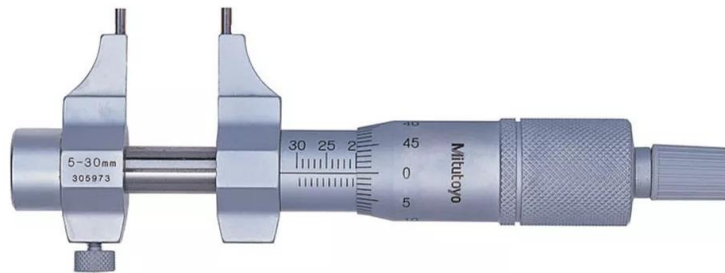


Figura 1.19 – Exemplo de um micrometro interno com 2 pontas, do tipo paquímetro.

Micrometros internos para diâmetros fora da faixa normal ou para medições em condições diversas podem ser encontrados sob encomenda, ou dispositivos podem ser utilizados. Furos de pequenos diâmetros podem ser medidos por transferência, por exemplo. A Figura 1.20 mostra um exemplo desse tipo de calibrador.

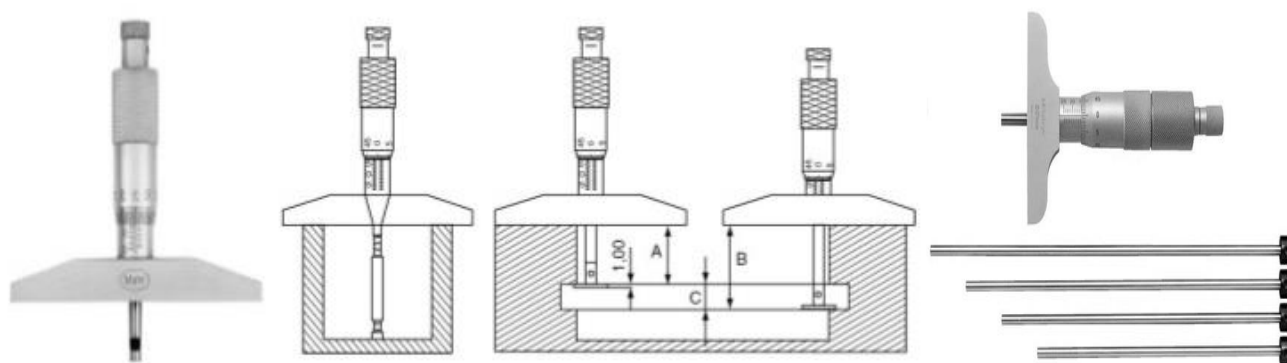
Figura 1.20 – Exemplo de calibradores para medição de furos de pequenos diâmetros.



Com esses calibradores, o operador ajusta-os no diâmetro dos furos e depois o mede com um micrometro externos, por exemplo.

1.3.3 – Micrometros de profundidade

Esses instrumentos servem para medir distâncias entre superfícies, quer sejam em ressaltos, ou em furos, como mostrado na Figura 1.21.



(a) Exemplos de aplicações

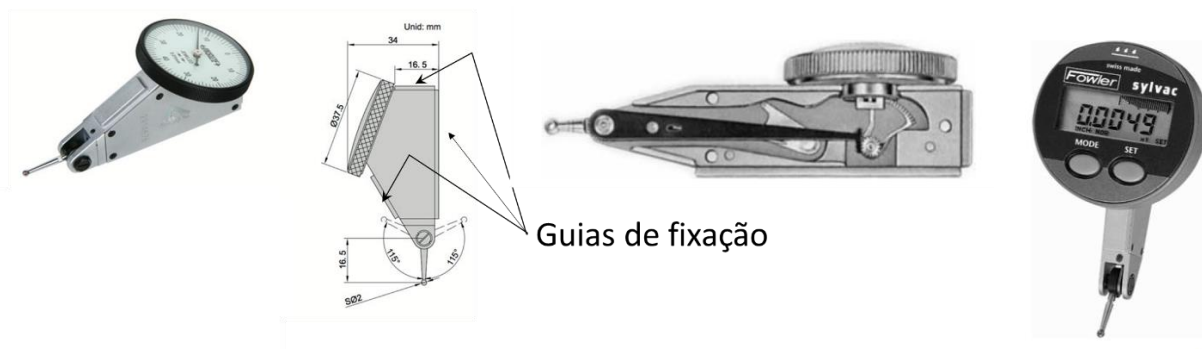
(b) Hastes de extensão

Figura 1.21 – Exemplo de aplicações para micrometros de profundidade.

Basicamente, esses instrumentos podem ser aplicados de maneira semelhante aos paquímetros usando a haste de profundidade, porém com maior resolução e exatidão. Os micrometros de profundidade funcionam de maneira similar aos demais, com parafuso de passo 0,5 mm e extensão de 25 mm. São também são fornecidos com haste de extensão para medições de profundidades superiores a 25 mm, conforme Figura 1.21(b).

1.4 – Relógios apalpadores

É um aparelho de medição muito versátil e pode ser usado em diversas aplicações. Seu corpo monobloco possui três guias que facilitam a fixação em diversas posições. Seu mostrador pode girar facilitando seu referenciamento durante verificações. Podem ser encontrados, mais comumente, com resolução de 0,01 mm ou 0,001 mm e com deslocamento total de $\pm 0,4$ mm e de $\pm 0,07$ mm, respectivamente. A Figura 1.22 mostra alguns exemplos desses relógios.



(a) Dimensões e configuração externa

(b) Mecanismos internos

Figura 1.22 – Exemplo de relógios apalpadores.

Podem ser aplicados para: medição de excentricidade de giro, alinhamento e concentricidade entre eixos de peças e de máquinas, paralelismos entre faces, em um desempenho, etc. A Figura 1.23 mostra algumas dessas aplicações.



Figura 1.23 – Exemplo de algumas aplicações para relógios apalpadores.

Uma das aplicações mais comuns é a verificação de concentricidade de peças no torno. Sempre que uma peça é fixada na placa, mesmo a de 3 castanhas com fechamento simultâneo, algum erro de batimento pode existir. Para verificar esse valor o relógio apalpador é usado, como mostrado na Figura 1.24.

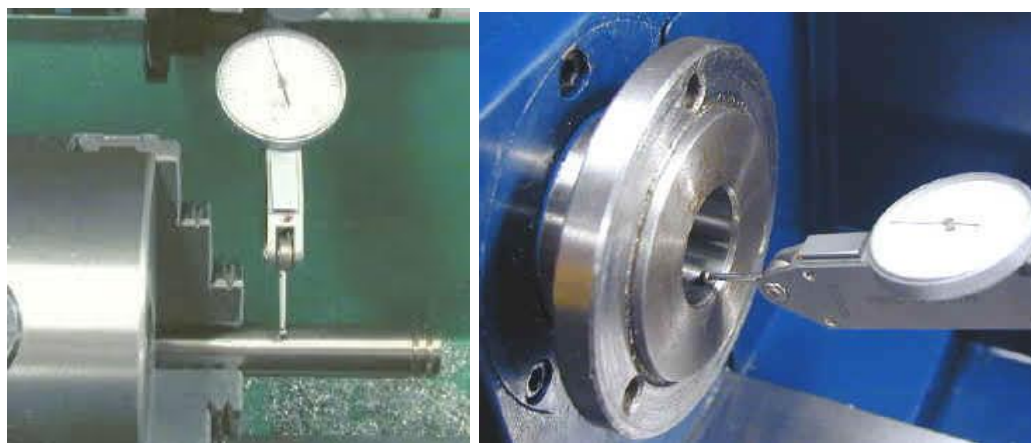


Figura 1.24 – Verificação de batimento no torno usando um relógio apalpador.

No processo de fresamento também é frequentemente necessário o alinhamento da peça com os eixos da máquina antes da operação, o que pode ser conseguido com o uso de um relógio apalpador, como ilustrado na Figura 1.25.

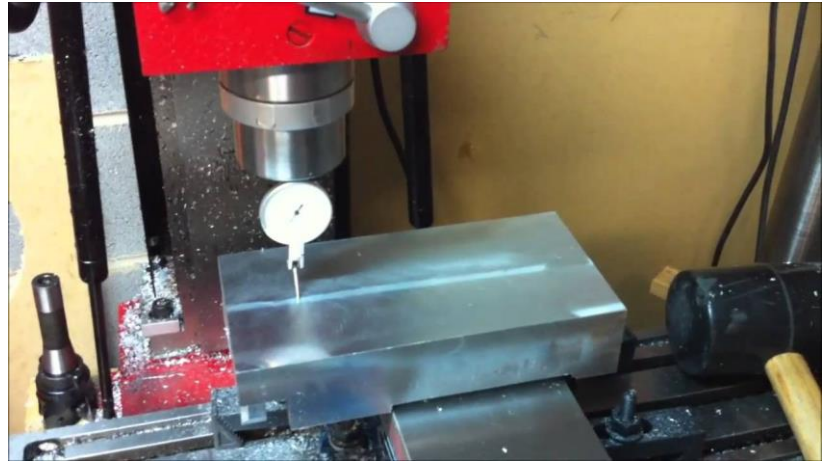
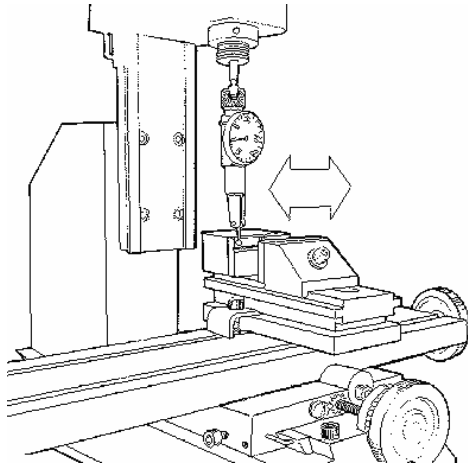


Figura 1.25. Exemplo de alinhamento da peça antes do fresamento.

Muitas vezes um furo da peça deve estar perfeitamente centrado com o eixo-árvore da fresadora ou centro de usinagem, o que pode ser conseguido usando-se um relógio apalpador preso ao eixo, como ilustrado na Figura 1.26.

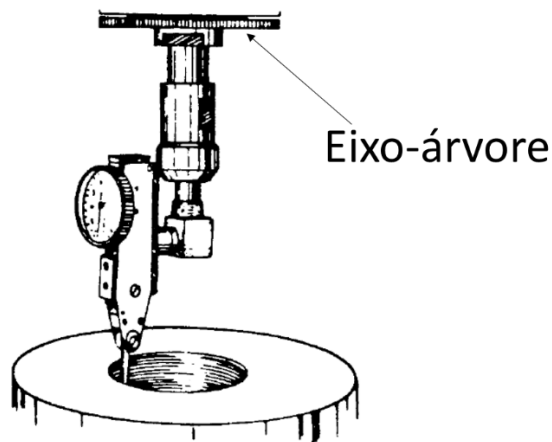


Figura 1.26 – Uso de um relógio apalpador para centrar um furo com o eixo-árvore da máquina.

Girando-se manualmente o eixo-árvore até que a variação na leitura do relógio esteja dentro de valores aceitáveis, pode-se garantir a concentricidade entre o eixo e o furo.

1.5 – Relógios comparadores

É utilizado tanto na verificação de medidas, superfícies planas, concentricidade e paralelismo, da mesma forma que o relógio apalpador, com a diferença de que o comparador possui maior curso total de medição. Encontram-se, normalmente, comparadores com resolução de 0,01 mm ou de 0,01 mm, com cursos entre 10 e 1 mm, respectivamente. Na medição a ponta apalpadora entra em contato com a peça e a diferença de medida da peça provoca um deslocamento do eixo central, contendo a ponta. Esse

deslocamento é transmitido por um sistema de amplificação com engrenagens e alavancas ao ponteiro do relógio. A posição do ponteiro no mostrador indica a leitura da medida. A resolução do instrumento baseia-se nesse sistema de amplificação. A Figura 1.27 mostra exemplos desses aparelhos.



Figura 1.27 – Exemplos mais comuns de relógios comparadores.

Os comparadores podem ser usados da mesma forma que os apalpadores nas aplicações já descritas, porém em aplicações onde seu tamanho e forma se ajustam. Para aplicações em pequenos diâmetros e locais de menor acessibilidade os apalpadores são mais indicados. Nos casos onde as variações dimensionais esperadas são maiores, os comparadores são mais usados. A Figura 1.28 mostra algumas das aplicações mais comuns para relógios comparadores.

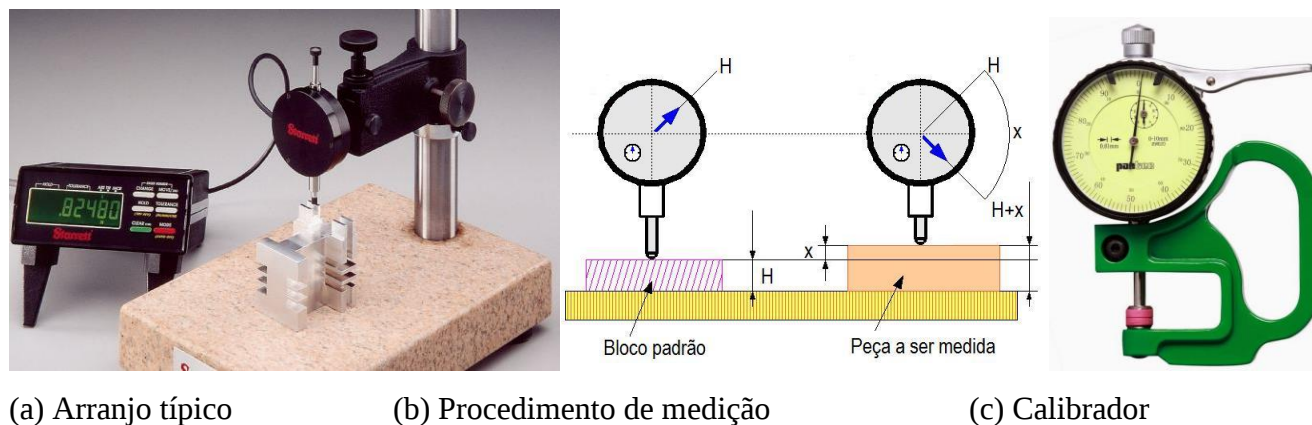


Figura 1.28 – Exemplos mais comuns para aplicação de relógios comparadores.

Devido à sua capacidade de apenas comparar dimensões, este relógio necessita de um padrão inicial como referência, em geral, blocos-padrões, como ilustrado na Figura 1.28 (b). Um comparador também podem ser usados para medição de pequenas espessuras, por meio de um calibrador, como na Figura 1.28(c).

Uma aplicação bastante específica para os relógios comparadores é a medição de diâmetros, em geral, com maiores profundidades e com menor custo. Trata-se de um aparelho denominado Súbito. Este consiste de um relógio comparador com uma haste isolada termicamente, uma ponta fixa e uma móvel que pode se deslocar proporcionalmente ao curso do relógio. A Figura 1.29 mostra um aparelho desse com os nomes das principais partes.



Figura 1.29 – Exemplo de um Súbito, usado para medir furos.

Como o súbito usa um relógio comparador, o aparelho deve ser referenciado antes de medir. Essa operação é realizada por meio de um micrometro externo, um anel-padrão, ou por blocos-padrões. A dimensão de referência deve estar próxima daquela a ser medida, ou pelo menos, dentro do curso máximo do relógio usado. A Figura 1.30 ilustra duas dessas possibilidades.

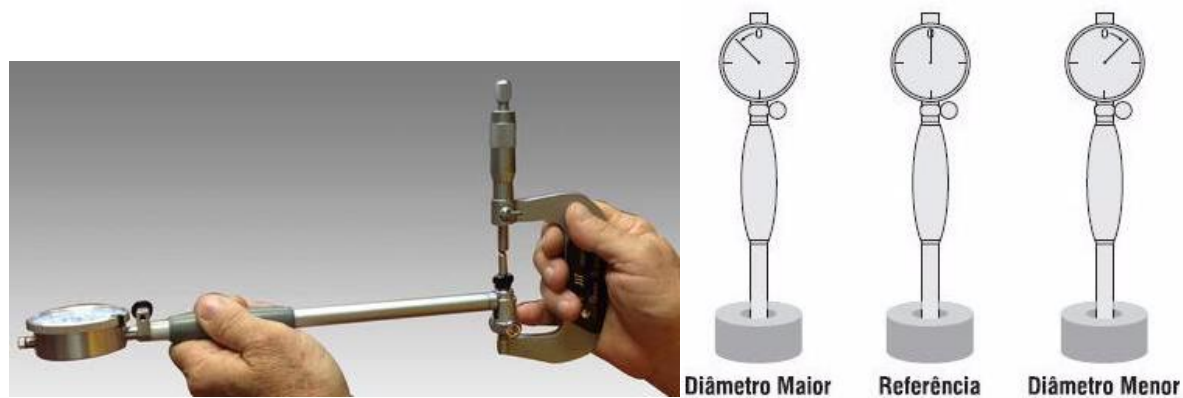


Figura 1.30 – Duas possibilidades de referenciamento de um súbito.

Após o referenciamento, a medição pode ser realizada, inserindo-se as pontas de medição no furo, conforme mostrado na Figura 1.31.

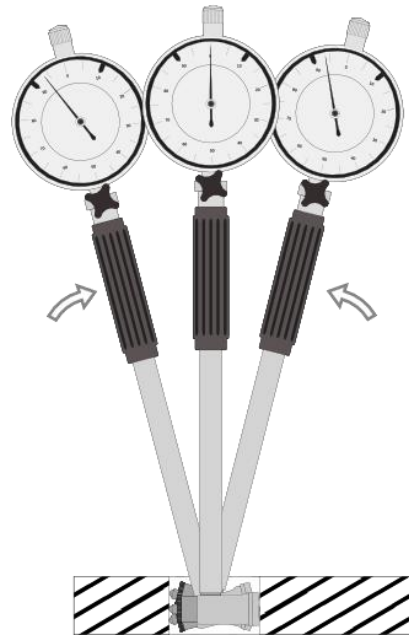


Figura 1.31 – Medição de um furo usando o súbito.

Além desses instrumentos mostrados até este ponto há alguns mais específicos que também são muito empregados em processos e operações de usinagem, os quais serão brevemente mostrados a seguir.

2 – Aparelhos e instrumentos específicos usados em usinagem

2.1 – Desempeno

O primeiro aparelho a ser apresentado é o desempeno. Trata-se de um bloco com uma superfície plana usada como referência, ou padrão de planicidade. A Figura 2.1 mostra exemplos de desempeno.



(a) Desempeno de ferro fundido



(b) Desempeno de granito

Figura 2.1 – Exemplos de desempenos

O desempeno pode ser fabricado com aço, ferro fundido ou granito, sendo os dois últimos os mais usuais. Pode-se encontrar comercialmente desempenos de diversos tamanhos, dependendo da aplicação. Em geral são usados como superfície padrão de referência para as mais diversas medições e inspeções combinadas com um traçador de alturas, mostrado a seguir.

2.2 – Traçador de alturas

O traçador de alturas (graminho ou altímetro) é muito usado para traçagem, quando se deseja riscar uma peça (ou traçar) para remoção de material, marcação de centro de furos, medição de alturas, etc. A Figura 2.2 mostra exemplos de traçadores de altura.



Figura 2.2 – Exemplos de traçadores de altura.

Quando se deseja apenas traçar uma peça são usados com uma ponta de metal duro afiada para riscar, conforme os exemplos mostrados na Figura 2.2. Quando se deseja medir, ou comparar alturas, avaliar retilidade, ou planicidade, são usados em combinação com o desempeno, com relógios apalpadores e comparadores, como ilustrado na Figura 2.3.

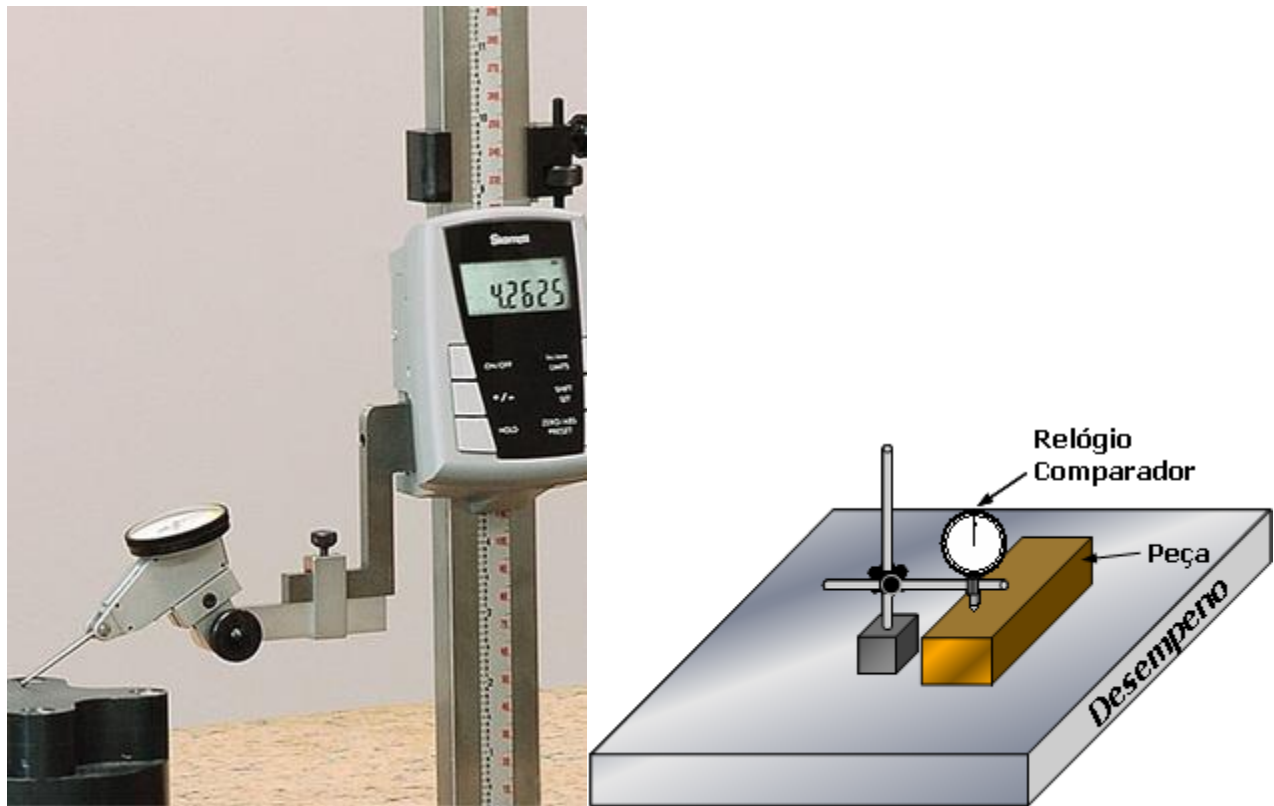


Figura 2.3 – Ilustração de uso do traçador de alturas em combinação com o desempenho e com relógios apalpadores e comparadores.

3 – Máquina de medir por coordenadas

Quando se deseja inspecionar diversas dimensões, ou desvios de forma e posição de maneira simultânea, ou usando apenas um único *set up* para várias peças, normalmente se recomenda uma máquina de medir. Esta é normalmente formada por uma estrutura com 3 movimentos em eixos cartesianos, dotados de sistemas de medição. A Figura 3.1 mostra exemplos de máquina de medir 3D.



Figura 3.1 – Exemplo de máquinas de medir por coordenadas.

Nas máquinas com 5 eixos de movimento é possível inspecionar as 5 faces de uma peça, sem a necessidade de se mudar a fixação da mesma. Uma máquina desse tipo é capaz de medir os mais variados aspectos, como distâncias entre faces, entre furos, comprimentos, diâmetros, circularidade, cilindridade, paralelismo, ângulos e, possivelmente, todos os desvios imagináveis.

4 – Medição de ângulos

Para a medição de ângulos usa-se, normalmente, um transferidor, ou goniômetro, cujos exemplos estão mostrados na Figura 4.1.



Figura 4.1 – Exemplos de goniômetros para medição de ângulos.

A medição de ângulos com os transferidores é direta, comparando-se o ângulo com uma escala, a qual pode também conter um nônio. A resolução de um instrumento como esse pode chegar a $0^\circ 10'$, mas quando se deseja uma resolução menor a régua, ou mesa, de senos associada com blocos-padrões deve ser usada. A Figura 4.2 ilustra o uso de uma régua de senos.

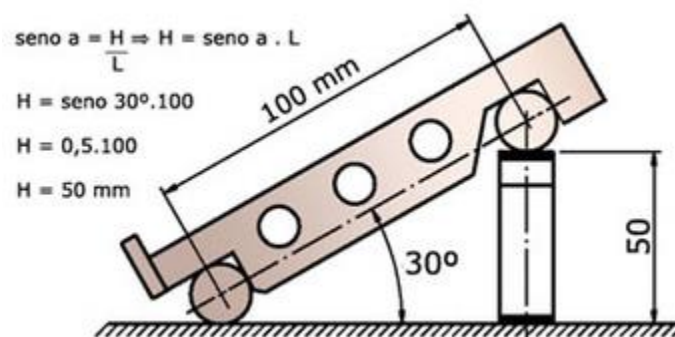


Figura 4.2 – Ilustração para o uso de uma régua de senos.

Como ilustrado, calcula-se a altura dos blocos padrões para que o ângulo resulte o esperado. Adicionalmente aos instrumentos já mencionados até este ponto, usam-se outros mais comuns como

esquadros e escalas metálicas (réguas), níveis, cujas resoluções e exatidões são menores do que aqueles instrumentos usados para desenhos em papel e mais conhecidos. A Figura 4.3 mostra o aspecto desses instrumentos, normalmente usados pelas empresas de usinagem.



Figura 4.3 – Aspecto de diversos instrumentos normalmente usados em indústrias de usinagem.

5 – Ajustes e tolerâncias.

Para o mercado atual a compra de um produto qualquer implica que este tenha um desempenho especificado e uniforme, comparativamente a qualquer outro similar. Os produtos são, em geral, fabricados em grandes lotes e mesmo assim devem manter-se dentro de especificações restritas e muitas vezes exigentes. Peças de reposição para tais produtos devem ser capazes de substituir as originais, sem ajustes e ainda mantendo as mesmas especificações técnicas e de desempenho. Essa possibilidade de reposição pode ser entendida como intercambiabilidade. Se os processos de fabricação fossem capazes de produzir grandes lotes de peças exatamente com as mesmas dimensões nominais, por exemplo, a reposição e o desempenho estariam assegurados. No entanto, processos de fabricação, não só os mecânicos, mas

quaisquer outros, apresentam variações dimensionais inerentes e aleatórias. Os limites de variação são tanto menores quanto mais elaborados e caros são os processos. Para contornar tais problemas, estabelecem-se tolerâncias já no projeto dos produtos, as quais ainda garantem a montagem e acoplamentos entre partes dos produtos, a intercambiabilidade dessas partes e ainda mantém o desempenho ao longo da vida útil. Figura 5.1 mostra, esquematicamente, o ajuste com tolerâncias entre um furo e um eixo, do ponto de vista de fabricação mecânica.

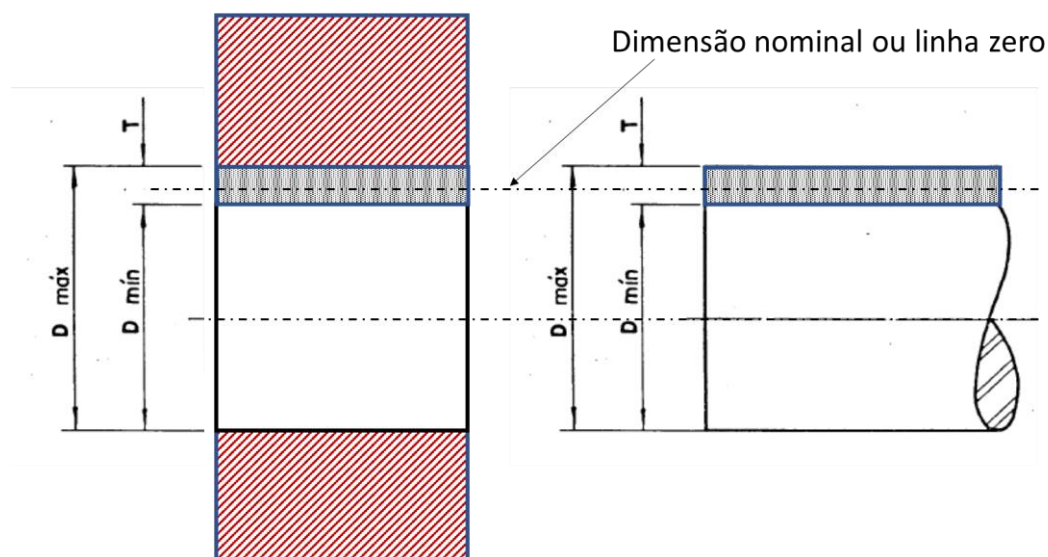


Figura 5.1 – Esquema de ajuste entre um furo e um eixo do ponto de vista da fabricação.

O sistema de tolerâncias e ajustes tem por objetivo garantir a intercambiabilidade e a uniformidade de desempenho em produtos manufaturados, em particular aqueles fabricados por processos mecânicos. Para uniformidade o sistema é internacionalmente normalizado pela ISO – International Organization for Standardization, e nacionalmente pela ABNT NBR 6158. Este sistema consiste num conjunto de princípios, regras e tabelas que possibilitam a escolha de tolerâncias e ajustes de modo racional e mais econômico para produção de peças mecânicas intercambiáveis. A norma brasileira prevê 18 qualidades de trabalho, o que pode ser simplificado como variações aceitáveis nas dimensões nominais. Essas qualidades são identificadas pelas letras IT seguidas de numerais. Quanto menor o número, menor o campo de variação aceitável e, portanto, maiores as dificuldades de se manter as dimensões dentro da tolerância. As 18 qualidades normalizadas pela ABNT/ISO estão mostradas na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Qualidades IT (Tolerâncias Fundamentais) normalizadas pela ABNT/ISO.

Basic size mm		Standard tolerance grades																	
		IT1 ²⁾	IT2 ²⁾	IT3 ²⁾	IT4 ²⁾	IT5 ²⁾	IT6	IT7	IT8	IT9	IT10	IT11	IT12	IT13	IT14 ³⁾	IT15 ³⁾	IT16 ³⁾	IT17 ³⁾	IT18 ³⁾
Above	Up to and including	Tolerances																	
		μm												mm					
—	3 ³⁾	0,8	1,2	2	3	4	6	10	14	25	40	60	0,1	0,14	0,25	0,4	0,6	1	1,4
3	6	1	1,5	2,5	4	5	8	12	18	30	48	75	0,12	0,18	0,3	0,48	0,75	1,2	1,8
6	10	1	1,5	2,5	4	6	9	15	22	36	58	90	0,15	0,22	0,36	0,58	0,9	1,5	2,2
10	18	1,2	2	3	5	8	11	18	27	43	70	110	0,18	0,27	0,43	0,7	1,1	1,8	2,7
18	30	1,5	2,5	4	6	9	13	21	33	52	84	130	0,21	0,33	0,52	0,84	1,3	2,1	3,3
30	50	1,5	2,5	4	7	11	16	25	39	62	100	160	0,25	0,39	0,62	1	1,6	2,5	3,9
50	80	2	3	5	8	13	19	30	46	74	120	190	0,3	0,46	0,74	1,2	1,9	3	4,6
80	120	2,5	4	6	10	15	22	35	54	87	140	220	0,35	0,54	0,87	1,4	2,2	3,5	5,4
120	180	3,5	5	8	12	18	25	40	63	100	160	250	0,4	0,63	1	1,6	2,5	4	6,3
180	250	4,5	7	10	14	20	29	46	72	115	185	290	0,46	0,72	1,15	1,85	2,9	4,6	7,2
250	315	6	8	12	16	23	32	52	81	130	210	320	0,52	0,81	1,3	2,1	3,2	5,2	8,1
315	400	7	9	13	18	25	36	57	89	140	230	360	0,57	0,89	1,4	2,3	3,6	5,7	8,9
400	500	8	10	15	20	27	40	63	97	155	250	400	0,63	0,97	1,55	2,5	4	6,3	9,7
500	630 ²⁾	9	11	16	22	32	44	70	110	175	280	440	0,7	1,1	1,75	2,8	4,4	7	11
630	800 ²⁾	10	13	18	25	36	50	80	125	200	320	500	0,8	1,25	2	3,2	5	8	12,5
800	1000 ²⁾	11	15	21	28	40	56	90	140	230	360	560	0,9	1,4	2,3	3,6	5,6	9	14
1000	1250 ²⁾	13	18	24	33	47	66	105	165	260	420	660	1,05	1,65	2,6	4,2	6,6	10,5	16,5
1250	1600 ²⁾	15	21	29	39	55	78	125	195	310	500	780	1,25	1,95	3,1	5	7,8	12,5	19,5
1600	2000 ²⁾	18	25	35	46	65	92	150	230	370	600	920	1,5	2,3	3,7	6	9,2	15	23
2000	2500 ²⁾	22	30	41	55	78	110	175	280	440	700	1100	1,75	2,8	4,4	7	11	17,5	28
2500	3150 ²⁾	26	36	50	68	96	135	210	330	540	860	1350	2,1	3,3	5,4	8,6	13,5	21	33

²⁾ Valores para IT1 a IT5 (inclusive) para nominais acima de 500 mm são valores ainda experimentais

³⁾ Tolerâncias normalizadas de IT14 a IT18 (inclusive) não devem ser usadas para nominais menores ou iguais a 1 mm.

Observa-se, pela Tabela 5.1, que o campo de variação da dimensão, ou a qualidade IT, depende também do valor nominal (Grupo de Dimensões). Imagine-se, inicialmente, que um eixo deva ser fabricado com uma dimensão nominal de 25 mm. Inicialmente estabelece-se uma variação aceitável para essa dimensão, conforme uma qualidade IT mostrada na Tabela 5.1. Essa “escolha” depende de diversos fatores, incluindo primeiramente o desempenho do eixo, sua intercambiabilidade e a capacidade dos processos de fabricação que serão usados em conseguir manter o lote de peças dentro desse limite. O desempenho do produto, pode ou não ser determinado pela variação dimensional do eixo em questão. A dimensão nominal muitas vezes é determinada com base em esforços que o eixo deve suportar e variações nessa dimensão podem reforçar ou enfraquecer o eixo, aumentar excessivamente o peso, etc. Essa análise pode ser muito mais complexa e demanda maiores detalhes do produto, mas pode determinar variações dimensionais aceitáveis. A intercambiabilidade vai depender também do outro componente com o qual o eixo interage e as variações devem ser determinadas em conjunto, ou seleciona-se essa, com base na capacidade dos processos de fabricação, com por exemplo o torneamento. Admite-se, neste caso, que o processo seja capaz de produzir qualidades IT09, segundo recomendações de estudos efetuados ao longo de muitos anos de trabalho e publicações especializadas, especificações de fabricantes de tornos, etc.

Adicionalmente, a designação da tolerância de uma dimensão compreende um campo de variação (Qualidade IT) e uma posição em que esse campo se situa em relação à dimensão nominal, ou linha zero. A Figura 5.2 ilustra melhor esse conceito.

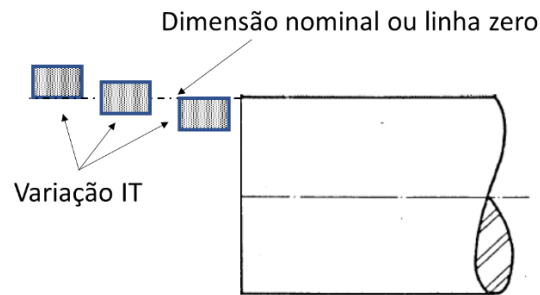


Figura 5.2 – Ilustração do campo de variação e da posição desse campo em relação à dimensão nominal, ou linha zero.

Observando-se a Figura 5.2 pode-se notar que a variação da dimensão pode estar em torno do valor nominal do diâmetro do eixo, abaixo ou acima dele. Essas posições do campo de variação, ou do valor IT, são chamados de afastamentos. Para designar essa posição a norma usa letras, o que pode ser observado na Figura 5.3.

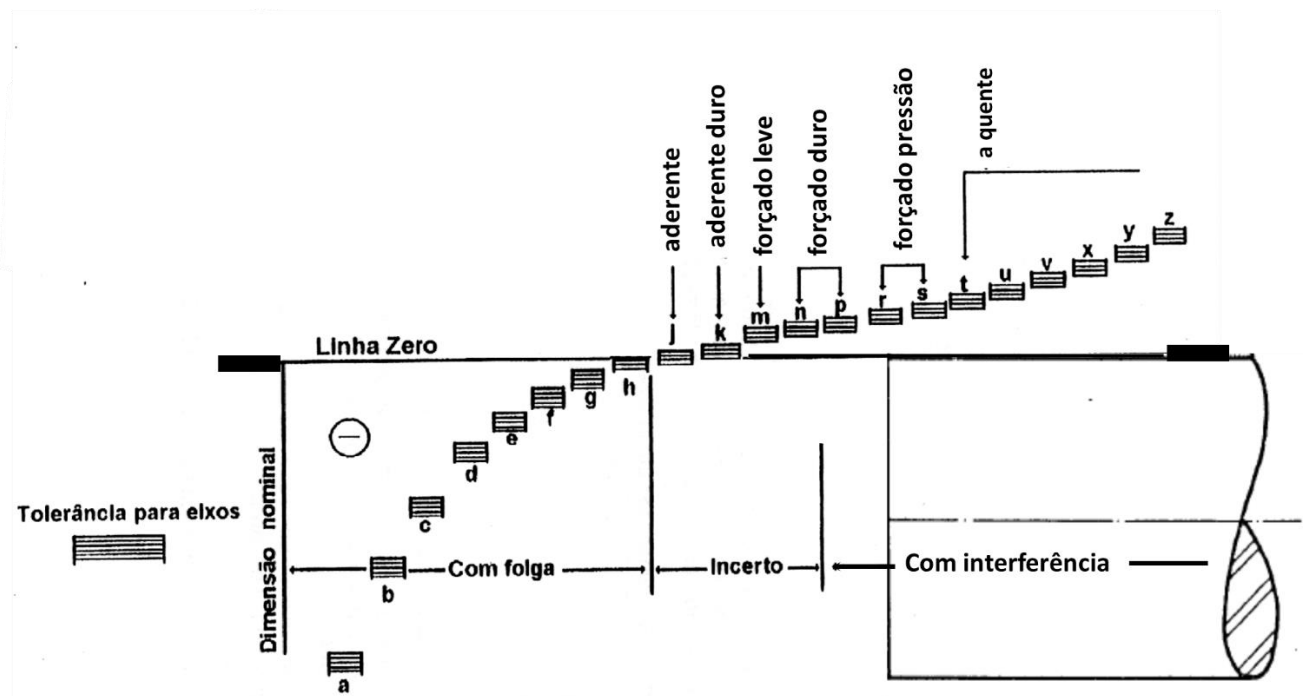


Figura 5.3 – Afastamentos segundo designação ABNT/ISO para eixos.

A distância, ou seja, o afastamento, de cada campo de tolerância (qualidade IT) em relação ao valor nominal pode ser calculada conforme a norma ABNT/ISO, embora já existam tabelas que fornecem os valores já arredondados, conforme mostrado na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Valores de afastamentos de referência para eixos conforme ABNT/ISO.

Afastamentos fundamentais para eixos

GRUPOS		Afastamento superior - es											Afastamento inferior - ei																					
DIMENSÕES		Todos os graus de Tolerância Padrão - ITn											Todos os graus de Tolerância Padrão - ITn																					
Acima	Ate	a	b	c	cd	d	e	ef	f	fg	g	h	js	j6	j7	j8	≤k4	≤k3	≤k7	≤k8	m	n	p	r	s	t	u	v	x	y	z	za	zb	zc
0	3	-270	-140	-80	-34	-20	-14	-10	-6	-4	-2	0	es = + % ITn / ei = - % ITn	-2	-4	-6	0	0	2	4	6	10	14	0	18	20	26	32	40	60				
3	6	-270	-140	-70	-46	-30	-20	-14	-10	-6	-4	0		-2	-4	-6	1	0	0	4	8	12	15	19	0	23	28	35	42	50	80			
6	10	-280	-150	-80	-56	-40	-25	-18	-13	-8	-5	0		-2	-5	-	1	0	0	6	10	15	19	23	0	28	34	42	52	67	97			
10	14	-290	-150	-95	-	-50	-32	-	-16	-	-6	0		-3	-6	-	1	0	0	7	12	18	23	28	0	33	40	50	64	90	130			
14	18	-290	-150	-95	-	-50	-32	-	-16	-	-6	0		-3	-6	-	1	0	0	7	12	18	23	28	0	33	39	45	60	77	108	150		
18	24	-300	-160	-110	-	-55	-40	-	-20	-	-7	0		-4	-8	-	2	0	0	8	15	22	28	35	0	41	47	54	63	73	98	136	188	
24	30	-300	-160	-110	-	-55	-40	-	-20	-	-7	0		-4	-8	-	2	0	0	8	15	22	28	35	41	48	55	64	75	88	118	160	228	
30	40	-310	-170	-120	-	-60	-50	-	-25	-	-9	0		-5	-10	-	2	0	0	9	17	26	34	43	48	60	68	80	94	112	148	200	274	
40	50	-320	-180	-130	-	-60	-50	-	-25	-	-9	0		-5	-10	-	2	0	0	9	17	26	34	43	54	70	81	97	114	136	180	242	325	
50	65	-340	-190	-140	-	-100	-60	-	-30	-	-10	0		-7	-12	-	2	0	0	11	20	32	41	53	66	87	102	122	144	172	226	300	405	
65	80	-360	-200	-150	-	-100	-60	-	-30	-	-10	0		-7	-12	-	2	0	0	11	20	32	43	59	75	102	120	146	174	210	274	360	480	
80	100	-380	-220	-170	-	-120	-72	-	-36	-	-12	0		-9	-15	-	3	0	0	13	23	37	51	71	91	124	146	178	214	258	335	445	585	
100	120	-410	-240	-180	-	-120	-72	-	-36	-	-12	0		-9	-15	-	3	0	0	13	23	37	54	79	104	144	172	210	254	310	400	525	690	
120	140	-460	-260	-200	-	-145	-85	-	-43	-	-14	0		-11	-18	-	3	0	0	15	27	43	63	92	122	170	202	248	300	365	470	620	800	
140	160	-520	-280	-210	-	-145	-85	-	-43	-	-14	0		-11	-18	-	3	0	0	15	27	43	65	100	134	190	228	280	340	415	535	700	900	
160	180	-580	-310	-230	-	-145	-85	-	-43	-	-14	0		-11	-18	-	3	0	0	15	27	43	68	108	146	210	252	310	380	465	600	780	1000	
180	200	-660	-340	-240	-	-170	-100	-	-50	-	-15	0		-13	-21	-	4	0	0	17	31	50	77	122	160	236	284	350	425	520	670	880	1150	
200	225	-740	-380	-260	-	-170	-100	-	-50	-	-15	0		-13	-21	-	4	0	0	17	31	50	80	130	180	258	310	385	470	575	740	960	1250	
225	250	-820	-420	-280	-	-170	-100	-	-50	-	-15	0		-13	-21	-	4	0	0	17	31	50	84	140	196	284	340	425	520	640	820	1050	1350	
250	280	-920	-480	-300	-	-190	-110	-	-56	-	-17	0		-16	-26	-	4	0	0	20	34	56	94	158	218	315	385	475	580	710	920	1200	1550	
280	315	-1060	-540	-330	-	-190	-110	-	-56	-	-17	0		-16	-26	-	4	0	0	20	34	56	98	170	240	350	425	525	650	790	1000	1300	1700	
315	355	-1200	-600	-360	-	-210	-125	-	-62	-	-18	0		-18	-28	-	4	0	0	21	37	62	108	190	268	390	475	590	730	900	1150	1500	1900	
355	400	-1350	-680	-400	-	-210	-125	-	-62	-	-18	0		-18	-28	-	4	0	0	21	37	62	114	208	294	435	530	660	820	1000	1300	1650	2100	
400	450	-1500	-760	-440	-	-230	-135	-	-68	-	-20	0		-20	-32	-	5	0	0	23	40	68	126	232	330	490	590	740	920	1100	1450	1850	2400	
450	500	-1650	-840	-480	-	-230	-135	-	-68	-	-20	0		-20	-32	-	5	0	0	23	40	68	132	252	360	540	640	820	1000	1250	1600	2100	2600	
500	560	-	-	-	-	-260	-145	-	-76	-	-22	0		-	-	-	0	0	0	26	44	78	150	280	400	600	-	-	-	-	-	-	-	
560	630	-	-	-	-	-260	-145	-	-76	-	-22	0		-	-	-	0	0	0	26	44	78	155	310	450	660	-	-	-	-	-	-	-	
630	710	-	-	-	-	-290	-160	-	-80	-	-24	0		-	-	-	0	0	0	30	50	88	175	340	500	740	-	-	-	-	-	-	-	
710	800	-	-	-	-	-290	-160	-	-80	-	-24	0		-	-	-	0	0	0	30	50	88	185	380	560	840	-	-	-	-	-	-	-	
800	900	-	-	-	-	-320	-170	-	-86	-	-26	0		-	-	-	0	0	0	34	56	100	210	430	620	940	-	-	-	-	-	-	-	
900	1000	-	-	-	-	-320	-170	-	-86	-	-26	0		-	-	-	0	0	0	34	56	100	220	470	680	1050	-	-	-	-	-	-	-	
1000	1120	-	-	-	-	-360	-195	-	-98	-	-28	0	-	-	-	0	0	0	40	66	120	250	520	780	1150	-	-	-	-	-	-	-		
1120	1250	-	-	-	-	-360	-195	-	-98	-	-28	0	-	-	-	0	0	0	40	66	120	260	580	840	1300	-	-	-	-	-	-	-		
1250	1400	-	-	-	-	-390	-220	-	-110	-	-30	0	-	-	-	0	0	0	48	78	140	300	640	960	1450	-	-	-	-	-	-	-		
1400	1600	-	-	-	-	-390	-220	-	-110	-	-30	0	-	-	-	0	0	0	48	78	140	330	720	1050	1600	-	-	-	-	-	-	-		
1600	1800	-	-	-	-	-430	-240	-	-120	-	-32	0	-	-	-	0	0	0	58	92	170	370	820	1200	1850	-	-	-	-	-	-	-		
1800	2000	-	-	-	-	-430	-240	-	-120	-	-32	0	-	-	-	0	0	0	58	92	170	400	920	1350	2000	-	-	-	-	-	-	-		
2000	2240	-	-	-	-	-490	-260	-	-130	-	-34	0	-	-	-	0	0	0	68	110	195	440	1000	1500	2300	-	-	-	-	-	-	-		
2240	2500	-	-	-	-	-490	-260	-	-130	-	-34	0	-	-	-	0	0	0	68	110	195	460	1100	1650	2500	-	-	-	-	-	-	-		
2500	2800	-	-	-	-	-520	-290	-	-145	-	-38	0	-	-	-	0	0	0	76	135	240	550	1250	1900	2900	-	-	-	-	-	-	-		
2800	3150	-	-	-	-	-520	-290	-	-145	-	-38	0	-	-	-	0	0	0	76	135	240	580	1400	2100	3200	-	-	-	-	-	-	-		

Outra característica da norma é que usam-se letras maiúsculas para tolerância de furos e minúsculas para tolerâncias de eixos. Assim uma tolerância **25 h9**, indica tratar-se de um eixo com diâmetro nominal de **25 mm**. Seu campo de variação é de 52 µm, segundo a Tabela 5.1, para dimensões entre 18 e 30 mm qualidade **IT9**. Segundo a Figura 5.3, ou Tabela 5.2, o afastamento designado por **h** se assenta sobre o valor nominal e para eixos será abaixo do nominal. Assim as dimensões do eixo devem estar entre **25,00** e **24,948** mm (25,000 – 0,052). Para tolerâncias em furos os valores do campo de variação IT são os mesmos dados pela Tabela 5.1 e os afastamentos serão o inverso, conforme mostrado na Figura 5.4.

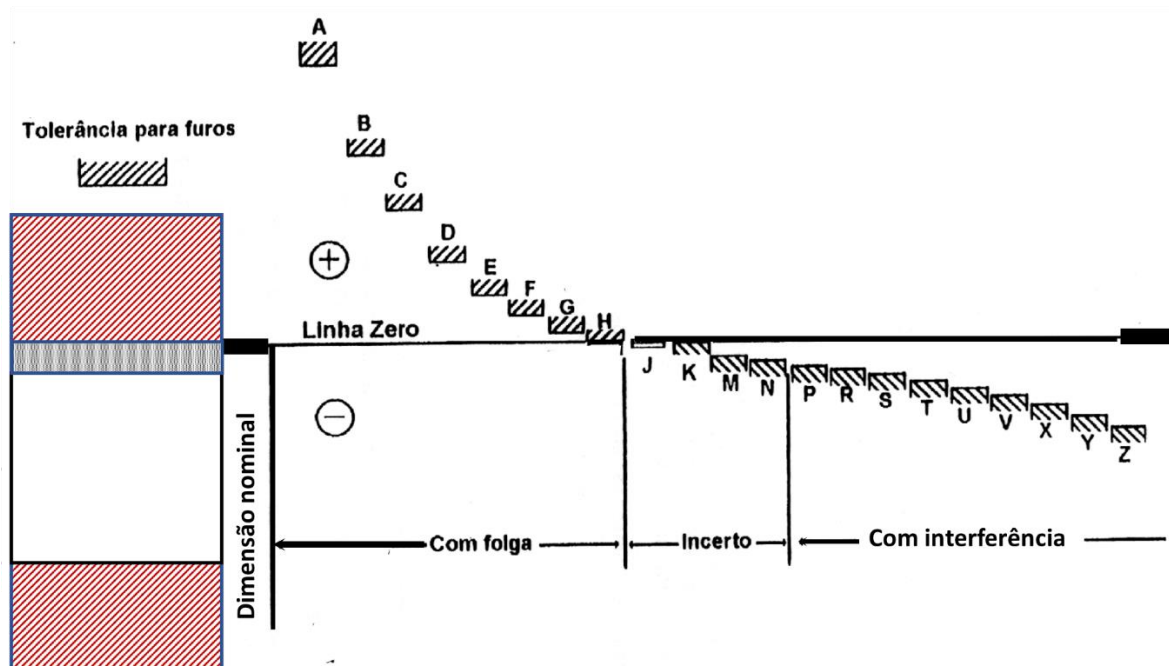


Figura 5.4 - Afastamentos segundo designação ABNT/ISO para furos

Desta forma, pode-se calcular qualquer tolerância indicada pela combinação dos campos de variação da Tabela 5.1 e pelos afastamentos da Tabela 5.2, embora nem todas as possíveis combinações sejam comumente utilizadas. Para facilitar utilizam-se sistema do tipo furo base, ou eixo base. No primeiro fixa-se a dimensão do furo com sua dimensão mínima sobre a linha zero, isto é, adota-se o afastamento H. O campo de variação, ou seja, a qualidade IT, adota-se de acordo com critérios de desempenho, ou de processo de fabricação. Em caso de ajuste de um eixo para esse furo base, pode-se imaginar diversas situações. Uma extrema seria se as dimensões do eixo resultassem muito maiores do que as do furo base, isto é o afastamento selecionado estivesse acima da máxima dimensão do furo. Neste caso, a montagem necessitaria de muito esforço mecânico, o que se chama **ajuste prensado**. Outro extremo seria se as dimensões do eixo resultassem muito menores do que as do furo base. Neste caso a montagem seria muito fácil e o ajuste chamado de **ajuste livre, ou com folga**. Qualquer outro caso intermediário produziria **ajustes incertos**, os quais poderiam necessitar maior ou menor esforço de montagem. A Figura 5.5 mostra um exemplo ilustrativo desses ajustes.

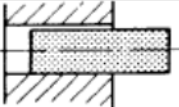
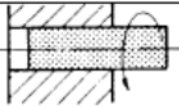
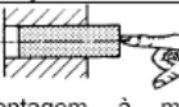
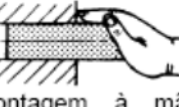
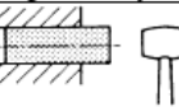
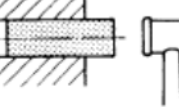
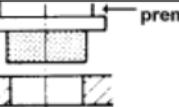
TIPO DE AJUSTE	EXEMPLO DE AJUSTE	EXTRA PRECISO	MECÂNICA PRECISA	MECÂNICA MÉDIA	Mecânica rústica	EXEMPLO DE APLICAÇÃO
Livre ou folgado	 Montagem à mão, com facilidade.	$H_8 e_7$	$H_7 e_7$ $H_7 e_8$	$H_8 e_9$	$H_{11} a_{11}$	Conjuntos com dilatação ou desalinhamento
Rotativo	 Montagem à mão podendo girar sem esforço.	$H_8 f_6$	$H_7 f_7$	$H_8 f_8$	$H_{10} d_{10}$ $H_{11} d_{11}$	Conjuntos girantes, deslizantes lubrificados
Deslizante	 Montagem à mão com leve pressão.	$H_8 g_5$	$H_7 g_6$	$H_8 g_8$ $H_8 h_8$	$H_{10} h_{10}$ $H_{11} h_{11}$	Conjuntos girantes, deslizantes de maior precisão
Deslizante incerto	 Montagem à mão, porém, necessitando de algum esforço.	$H_8 h_5$	$H_7 h_6$			Conjuntos fixos, deslizantes com certa pressão
Aderente Foçado leve	 Montagem com auxílio de martelo.	$H_8 j_5$	$H_7 j_6$			Conjuntos fixos, com desmontagens
Forçado incerto	 Montagem com auxílio de martelo pesado.	$H_8 m_5$	$H_7 m_6$			Conjuntos fixos, com possíveis desmontagens
Prensado	 Montagem com auxílio de balancim ou por dilatação	$H_8 p_5$	$H_7 p_6$			Conjuntos fixos, sem desmontagens

Figura 5.5 – Exemplo de ajustes para um furo base afastamento H.

Observa-se ainda, pela Figura 5.5 que mesmo uma opção pelo sistema furo base, no qual o furo será sempre H, a qualidade IT dependerá da qualidade da fabricação, se de precisão, isto é, de pequena variação dimensional, ou rústica, maior variação. Para estes extremos adotaram-se as qualidades IT6 e IT10/11, respectivamente.

Para um caso semelhante de ajustes pode-se adotar o sistema eixo base, no qual o eixo sempre terá tolerância h e todas as mesmas observações são válidas. Com base nesses dois sistemas, pode-se encontrar tabelas já prontas para uma vasta gama de tolerâncias, sem a necessidade de se calcular cada um dos campos e afastamentos necessários para os vários casos de ajustes. A Tabela 5.3 mostra um exemplo de tabela com furo base e a Tabela 5.4 um exemplo de tabela para eixo base.

Tabela 5.3 – Exemplo de tabela de tolerâncias para furo base.

	H8	h8	h9	f8	e9	d10	H11	h11	d11	c11	b11	a11
100 μ m												
0												
-100												
-200												
-300												
-400												
-500												

Gráfico demonstrativo dos desvios e posições das tolerâncias para diâmetros de 18 a 30 mm valores em μ m

EIXO FURO

Grupos de dimensões mm	FURO	EIXO					FURO	EIXO				
	H8	h8	h9	f8	e9	d10	H11	h11	d11	c11	b11	a11
de 1 a 3	+14 0	0 -14	0 -25	-6 -20	-14 -39	-20 -60	+60 0	0 -60	-20 -80	-60 -120	-140 -200	-270 -330
de 3 a 6	+18 0	0 -18	0 -30	-10 -28	-20 -50	-30 -78	+75 0	0 -75	-30 -105	-70 -145	-140 -215	-270 -345
de 6 a 10	+22 0	0 -22	0 -36	-13 -35	-25 -61	-40 -98	+90 0	0 -90	-40 -130	-80 -170	-150 -240	-280 -370
de 10 a 18	+27 0	0 -27	0 -43	-16 -43	-32 -75	-50 -120	+110 0	0 -110	-50 -160	-95 -205	-150 -260	-290 -400
de 18 a 30	+33 0	0 -33	0 -52	-20 -53	-40 -92	-65 -149	+130 0	0 -130	-65 -195	-110 -240	-160 -290	-300 -430
de 30 a 40	+39 0	0 -39	0 -62	-25 -64	-50 -112	-80 -180	+160 0	0 -160	-80 -240	-120 -290	-170 -340	-310 -480
de 40 a 50	0	-39	-62	-64	-112	-180	0	-160	-240	-130 -290	-180 -340	-320 -480
de 50 a 65	+46 0	0 -46	0 -74	-30 -76	-60 -134	-100 -220	+190 0	0 -190	-100 -290	-140 -340	-190 -390	-340 -550
de 65 a 80	0	-46	-74	-76	-134	-220	0	-190	-290	-150 -340	-200 -390	-360 -550
de 80 a 100	+54 0	0 -54	0 -87	-36 -90	-72 -159	-120 -260	+220 0	0 -220	-120 -340	-170 -400	-220 -460	-380 -600
de 100 a 120	0	-54	-87	-90	-159	-260	0	-220	-340	-180 -400	-240 -460	-410 -600
de 120 a 140										-200 -450	-260 -510	-460 -710
de 140 a 160	+63 0	0 -63	0 -100	-43 -106	-85 -185	-145 -305	+250 0	0 -250	-145 -395	-210 -460	-280 -530	-520 -770
de 160 a 180	0	-63	-100	-106	-185	-305	0	-250	-395	-230 -480	-310 -560	-580 -830
de 180 a 200										-240 -450	-340 -510	-660 -710
de 200 a 225	+72 0	0 -72	0 -115	-50 -122	-100 -215	-170 -355	+290 0	0 -290	-170 -460	-260 -550	-380 -670	-640 -1030
de 225 a 250	0	-72	-115	-122	-215	-355	0	-290	-460	-280 -570	-420 -710	-820 -1110
de 250 a 280	+81 0	0 -81	0 -130	-56 -137	-110 -240	-190 -400	+320 0	0 -320	-190 -510	-300 -620	-480 -800	-820 -1240
de 280 a 315	0	-81	-130	-137	-240	-400	0	-320	-510	-330 -650	-540 -860	-1050 -1370
de 315 a 355	+89 0	0 -89	0 -140	-62 -151	-125 -265	-210 -440	+360 0	0 -360	-210 -570	-360 -720	-600 -960	-1200 -1560
de 355 a 400	0	-89	-140	-151	-265	-440	0	-360	-570	-400 -760	-680 -1040	-1350 -1710
de 400 a 450	+97 0	0 -97	0 -155	-68 -165	-135 -290	-230 -480	+400 0	0 -400	-230 -630	-440 -840	-760 -1160	-1500 -1900
de 450 a 500	0	-97	-155	-165	-290	-480	0	-400	-630	-480 -880	-840 -1240	-1650 -2050
Ajuste	COM JOGO							COM JOGO				

Tabela 5.4 – Exemplo de tabela de tolerâncias para eixo base.

Grupos de dimensões mm	EIXO							FURO												
	h5	N6	M6	K6	J6	H6	G6	h6	S7	R7	N7	M7	k7	J7	H7	G7	F7	E8	D9	
de 1 a 3	0 -4	-4 -10	-2 -8	0 -6	+2 -4	+8 0	+8 +2	0 -6	-14 -24	-10 -20	-4 -14	-2 -12	0 -10	+4 -6	+10 0	+12 +2	+16 +6	+28 +14	+45 +20	
de 3 a 6	0 -5	-5 -13	-1 -9	+2 -6	+5 -3	+8 0	+12 +4	0 -8	-15 -27	-11 -23	-4 -16	0 -12	+3 -9	+6 -6	+12 0	+16 +4	+22 +10	+38 +20	+60 +30	
de 6 a 10	0 -6	-7 -16	-3 -12	+2 -7	+5 -4	+9 0	+14 +5	0 -9	-17 -32	-13 -28	-4 -19	0 -15	+5 -10	+8 -7	+15 0	+20 +5	+28 +13	+47 +25	+76 +40	
de 10 a 18	0 -8	-9 -20	-4 -15	+2 -9	+6 -5	+11 0	+17 +6	0 -11	-21 -39	-16 -34	-5 -23	0 -18	+6 -12	+10 -8	+18 0	+24 +6	+34 +16	+59 +32	+93 +50	
de 18 a 30	0 -9	-11 -24	-4 -17	+2 -11	+8 -5	+13 0	+20 +7	0 -13	-27 -48	-20 -41	-7 -28	0 -21	+6 -15	+12 -9	+21 0	+28 +7	+41 +20	+73 +40	+117 +65	
de 30 a 40	0	-12	-4	+3	+10	+15	+25	0	-34	-25	0	0	+7	+14	+25	+34	+50	+89	+142	
de 40 a 50	-11	-28	-20	-13	-6	0	+9	-16	-59	-50	-33	-25	-18	-11	0	+9	+25	+50	+80	
de 50 a 65	0	-14	-5	+4	+13	+19	+29	0	-42 -72	-30 -60	0	0	+9	+18	+30	+40	+60	+106	+174	
de 65 a 80	-13	-33	-24	-15	-6	0	+10	-19	-48 -78	-32 -62	-39 -30	-21	-12	0	+10	+30	+60	+100		
de 80 a 100	0	-16	-6	+4	+16	+22	+34	0	-58 -93	-38 -73	-10	0	+10	+22	+35	+47	+71	+126	+207	
de 100 a 120	-15	-38	-28	-18	-6	0	+12	-22	-66 -101	-41 -76	-45	-35	-25	-13	0	+12	+36	+72	+120	
de 120 a 140	0	-20	-8	+4	+18	+25	+39	0	-77 -117	-48 -88	-12	0	+12	+26	+40	+54	+83	+148	+245	
de 140 a 160	-18	-45	-33	-21	-7	0	+14	-25	-85 -125	-50 -90	-52	-40	-28	-14	0	+14	+43	+85	+145	
de 160 a 180									-93 -133	-53 -93										
de 180 a 200	0	-22	-8	+5	+22	+29	+44	0	-105 -151	-60 -106	-14	0	+13	+30	+46	+61	+96	+172	+285	
de 200 a 225	-20	-51	-37	-24	-7	0	+15	-29	-113 -159	-63 -109	-60	-46	-33	-16	0	+15	+50	+100	+170	
de 225 a 250									-123 -169	-67 -113										
de 250 a 280	0	-25	-9	+5	+25	+32	+49	0	-138 -190	-74 -126	-14	0	+16	+36	+52	+69	+108	+191	+320	
de 280 a 315	-23	-57	-41	-27	-7	0	+17	-32	-150 -202	-78 -130	-66	-52	-36	-16	0	+17	+56	+110	+190	
de 315 a 355	0	-26	-10	+7	+29	+36	+54	0	-169 -226	-87 -144	-16	0	+17	+39	+57	+75	+119	+214	+350	
de 355 a 400	-25	-62	-46	-29	-7	0	+18	-36	-187 -244	-93 -150	-73	-57	-40	-18	0	+18	+62	+125	+210	
de 400 a 450	0	-27	-10	+8	+33	+40	+60	0	-209 -272	-103 -166	-17	0	+18	+43	+63	+83	+131	+232	+385	
de 450 a 500	-27	-67	-50	-32	-7	0	+20	-40	-229 -292	-108 -172	-80	-63	-45	-20	0	+20	+68	+135	+230	
Ajuste	INCERTO							COM JOGO	COM INT.	INCERTO							COM JOGO			

6 – Tolerâncias de forma e posição

Para garantir o desempenho de um produto não se pode limitar as especificações a tolerâncias dimensionais. Um eixo pode estar perfeitamente dentro das tolerâncias no diâmetro e no comprimento, mas pode estar curvado em arco, conforme ilustra, exageradamente, a Figura 6.1.

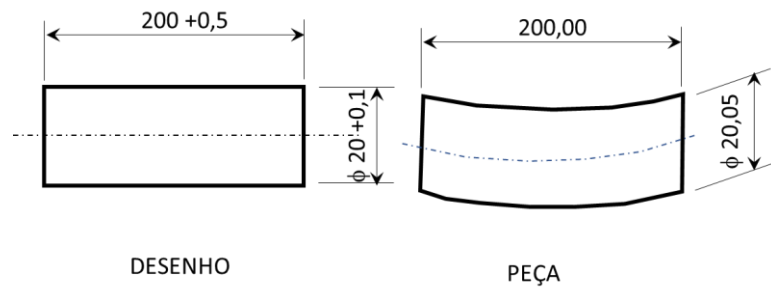


Figura 6.1 – Exemplo de um eixo com as dimensões dentro das tolerâncias, mas com desvio de forma.

Com se observa, uma tolerância para a forma do eixo, por exemplo, sua cilindricidade, deveria ter sido especificada, limitando o desvio de um cilindro perfeito. A norma ABNT/ISO NBR 6409 também regulamentam esses desvios. Tais tolerâncias devem ser especificadas com cautela, pois uma vez especificadas, implicarão em inspeções que, muitas vezes, demandam esforços e dispêndios maiores resultando em custos mais altos para o produto final. A norma regulamenta os desvios e a forma como devem constar em um desenho técnico. A Figura 6.2 mostra os desvios e seus símbolos para colocação nos desenhos.

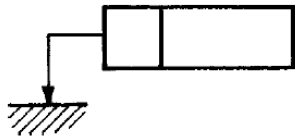
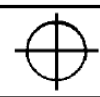
Característica tolerada			Símbolo
Para elementos isolados 	Forma	Retitude	
		Planeza	
		Circularidade	
		Cilindricidade	
Para elementos isolados ou associados		Perfil de linha qualquer	
		Perfil de superfície qualquer	
Para elementos associados	Orientação	Paralelismo	
		Perpendicularidade	
		Inclinação	
	Posição	Posição	
		Concentricidade	
		Coaxilidade	
		Simetria	
	Batimento	Circular	
		Total	

Figura 6.2 – Exemplo de símbolos para tolerâncias de forma e posição.

A colocação nos desenhos depende de cada um dos desvios e das suas referências para a devida inspeção. A Figuras 6.3 e 6.4 ilustram como se deve especificar cada uma das tolerâncias em desenhos e algumas das suas principais características.

Tipo de tolerância	Símbolos e característica com tolerância		Indicação no desenho	Explicação	Zona de tolerância
Tolerância de forma		Linealidade		O eixo com sua tolerância deve caber dentro de um cilindro com diâmetro $r = 0,04$ mm.	
		Planidade		A superfície com sua tolerância deve caber entre dois planos paralelos com distância $t = 0,03$ mm entre eles.	
		Circularidade		Em todo plano de corte perpendicular ao eixo, a linha circunferencial com sua tolerância deve situar-se entre dois círculos concêntricos com distância de $t = 0,08$ mm entre eles.	
		Cilindricidade		O corpo do cilindro com sua tolerância deve situar-se entre dois cilindros coaxiais com distância de $t = 0,2$ mm entre eles.	
		Forma linear		O perfil com sua tolerância deve situar-se entre duas linhas envolventes, cujo afastamento é limitado por círculos com diâmetro $t = 0,06$ mm. Os centros destes círculos situam-se na linha geometricamente ideal.	
		Forma de superfície		A superfície com sua tolerância deve situar-se entre duas superfícies envolventes, cujo afastamento é limitado por esferas com diâmetro $t = 0,3$ mm. Os centros das esferas situam-se na superfície geometricamente ideal.	
Tolerância de posição		Paralelismo		A superfície com sua tolerância deve situar-se entre dois planos paralelos ao plano de referência A com distância de $t = 0,02$ mm entre eles.	
				O eixo com sua tolerância deve situar-se entre dois planos paralelos ao plano de referência A com distância de $t = 0,02$ mm entre eles.	
				O eixo com sua tolerância deve situar-se dentro de um cilindro com diâmetro $t = 0,03$ mm, que é paralelo ao eixo de referência A.	
		Perpendicularidade		A superfície com sua tolerância deve situar-se entre dois planos perpendiculares ao eixo de referência A com distância de $t = 0,03$ mm entre eles.	
				O eixo com sua tolerância deve situar-se dentro de um cilindro com diâmetro $t = 0,2$ mm, que é perpendicular à superfície de referência A.	

Figura 6.3 – Algumas características e especificações de tolerâncias de forma e posição.

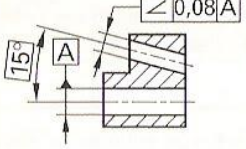
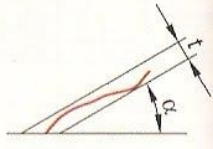
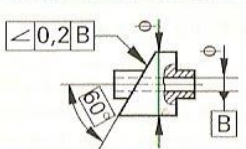
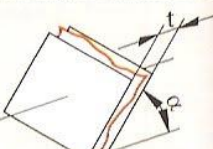
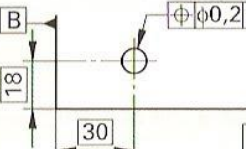
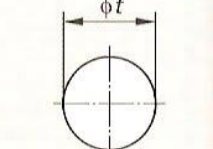
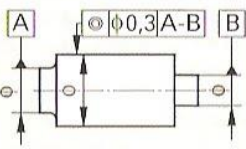
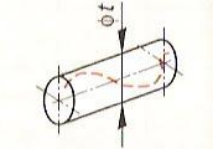
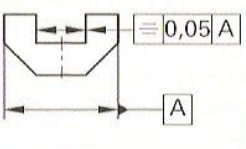
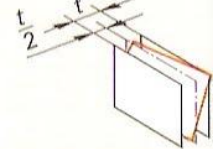
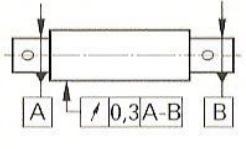
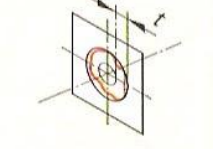
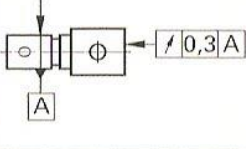
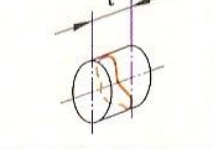
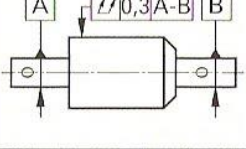
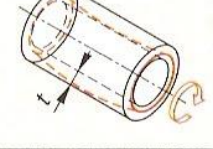
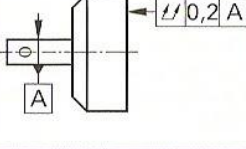
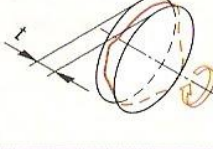
Tipo de tolerância	Símbolos e característica com tolerância	Indicação no desenho	Explicação	Zona de tolerância
Tolerância de Posição	Tolerância de direção		O eixo com sua tolerância deve situar-se entre duas linhas paralelas com distância $t = 0,08$ mm entre elas, que são inclinadas em 15° em relação à linha de referência A.	
			A superfície inclinada com sua tolerância deve situar-se entre dois planos paralelos, inclinados em relação ao eixo de referência B com distância $t = 0,2$ mm entre eles. O ângulo geométrico ideal deve ter uma inclinação de 60° .	
	Tolerância de localização		O centro real do furo deve situar-se em um círculo com diâmetro $t = 0,2$ mm, cujo centro coincide com a localização precisa do ponto.	
			O eixo da peça com sua tolerância deve situar-se dentro do cilindro coaxial em relação ao eixo de referência A-B, com diâmetro $t = 0,3$ mm.	
			O plano central do rasgo com sua tolerância deve situar-se entre dois planos paralelos com distância de $t = 0,05$ mm entre eles, localizados simetricamente em relação ao plano central das duas superfícies externas.	
	Tolerância de curso		Em cada rotação do eixo sobre o eixo de referência A-B, o desvio do curso circular em cada plano perpendicular ao eixo não deve exceder $t = 0,3$ mm.	
			Em cada rotação do eixo sobre o eixo de referência A, o desvio do curso linear em qualquer ponto de medição não deve exceder $t = 0,3$ mm.	
	Tolerância de curso total		Com mais rotações sobre o eixo de referência A-B e com desvio axial, todos os pontos na superfície devem situar-se dentro da tolerância circular total $t = 0,3$ mm.	
			Com mais rotações sobre o eixo de referência A e com desvio radial, todos os pontos na superfície devem situar-se dentro da tolerância de curso total $t = 0,2$ mm.	

Figura 6.4 – Algumas características e especificações de tolerâncias de forma e posição.

Tolerância de forma e posição		Cf. DIN ISO 1101 (1985-03)	
Referência		Elemento tolerado	
• Identificação Elemento de referência moldura de referência letra de referência linha de referência triângulo de referência • A referência é eixo plano central linha do corpo superfície		• Identificação Símbolo do tipo de tolerância Elemento com tolerância moldura da tolerância letra de referência valor da tolerância linha de referência com seta de referência • Tolerância vale para	
Exemplos O eixo da perfuração deve ser perpendicular (valor de tolerância 0,04 mm) à superfície de apoio. O plano central do rasgo deve ser simétrico em relação ao plano central da superfície exterior (valor de tolerância 0,1 mm). Em relação ao eixo $\varnothing 20k6$ a superfície cilíndrica deve correr em círculo e a superfície chata, transversal (valor de tolerância 0,05 mm). O rasgo deve ser simétrico (valor de tolerância 0,06 mm) e paralelo (valor de tolerância 0,02 mm) ao eixo $\phi 25h6$.			

Figura 6.5 – Exemplos de especificação de tolerâncias de forma e posição em desenhos.

Todas vezes que uma tolerância de forma ou posição é especificada, deve ser inspecionada e os arranjos necessários podem não estar prontamente disponíveis. Assim para cada uma das tolerâncias, esquemas são sugeridos a seguir.

6.1 - TOLERÂNCIA DE RETILINEIDADE

É a diferença admissível da reta, delimitada por um cilindro imaginário que tem como eixo de simetria a linha teórica e, como superfície, os limites de tolerância admissíveis para a linha teórica, conforme representado nas Figuras 6.6 e 6.7.

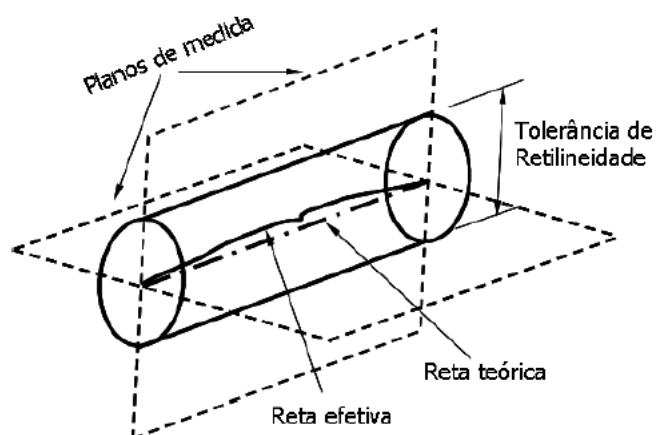


Figura 6.6 - Tolerância de retilidade com formato cilíndrico

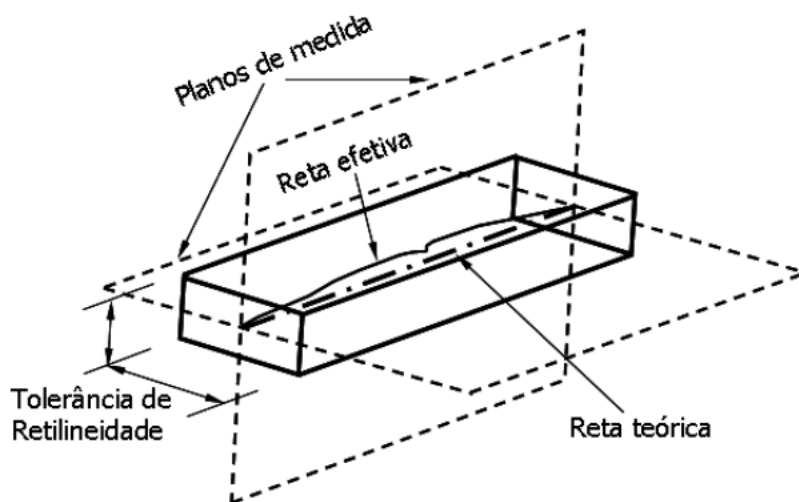


Figura 6.7 - Tolerância de retilidade com formato de paralelepípedo

A tolerância de Retilidade com formato cilíndrico pode ser aplicada para o controle de desvios geométricos em sólidos de revolução, tais como cilindros e eixos. A tolerância de Retilidade com formato de paralelepípedo pode ser aplicada para o controle de desvios geométricos em sólidos com seção transversal retangular, tais como guias e barramentos de máquinas-ferramentas. A Figura 6.8 apresenta um exemplo de indicação da tolerância de Retilidade em desenhos técnicos.

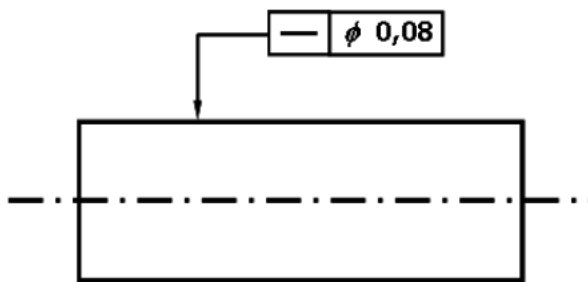


Figura 6.8 - Indicação de Tolerância de Retilidade em desenho técnico.

O exemplo indica que o eixo da parte cilíndrica da peça deve estar dentro de um cilindro com diâmetro de 0,08 mm. A Figura 6.9 apresenta um esquema de medição da Retilidade, com relógio comparador encostado em duas réguas apoiadas, juntamente com a peça, sob um despenho.

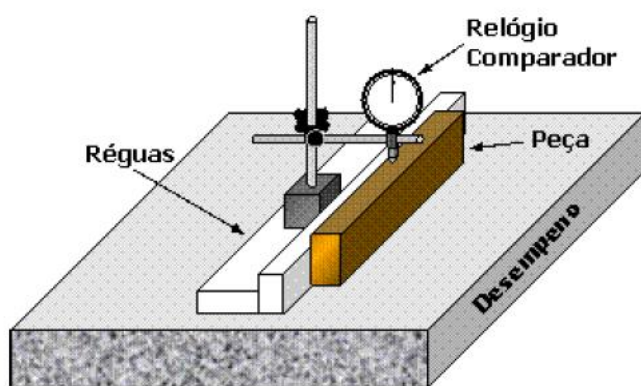


Figura 6.9 - Sugestão de um arranjo para Medição da Retilidade

6.2 - TOLERÂNCIA DE PLANICIDADE

Tolerância de planicidade é a diferença admissível na variação da forma plana de uma peça, representada por dois planos paralelos que definem os limites superior e inferior de variação admissível, entre os quais deve se encontrar a superfície efetiva (medida).

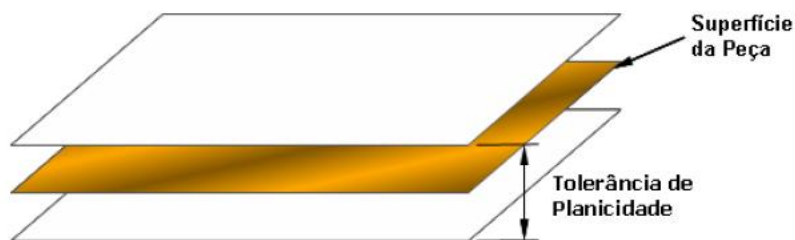


Figura 6.10 – Tolerância de Planicidade

A Figura 6.10 representa a tolerância de planicidade de acordo com a definição, e a Figura 6.11 apresenta um exemplo de indicação desta tolerância em desenhos técnicos.

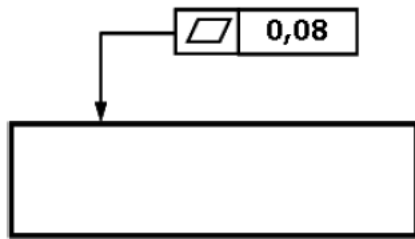


Figura 6.11– Indicação de Tolerância de Planicidade em desenho técnico

O exemplo da Figura 6.11 indica que a superfície da peça deve ficar entre dois planos paralelos distantes entre si de 0,08mm. A Figura 6.12 apresenta um esquema de medição do desvio de planicidade da superfície de uma peça usando relógio comparador sob uma mesa de desempeno.

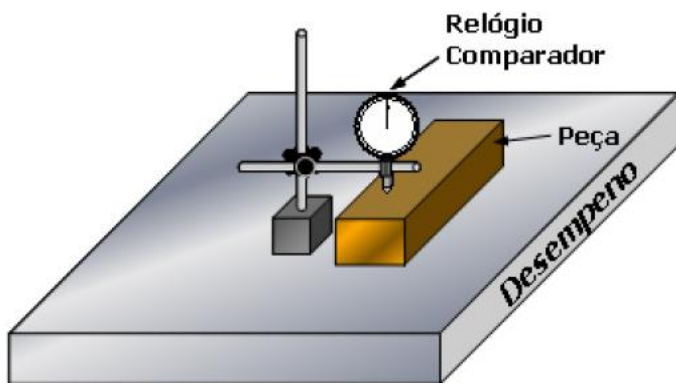


Figura 6.12 – Sugestão de um arranjo para Medição de Planicidade

6.3 - TOLERÂNCIA DE CIRCULARIDADE

Desvios de circularidade podem ocorrer na seção circular de uma peça em forma de disco, cilindro ou cone. A tolerância de circularidade pode ser representada por dois círculos concêntricos, que indicam os limites inferior e superior tolerados para o desvio de circularidade. A Figura 6.13 representa uma maneira de medir a tolerância de circularidade. Espera-se que estes desvios de circularidade fiquem dentro da tolerância dimensional especificada para o diâmetro da peça cilíndrica.

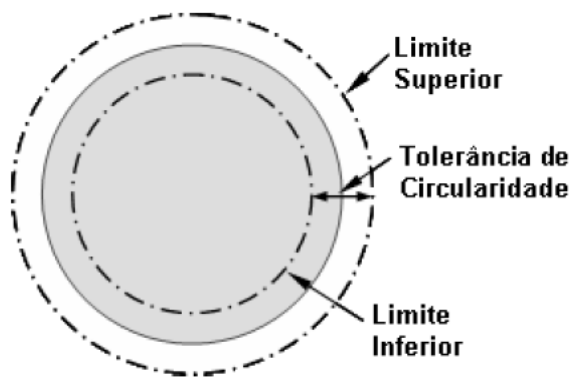


Figura 6.13 – Representação da Tolerância de Circularidade

Os desvios de circularidade costumam ser pequenos, mas devem ser especificados quando o limite desejado não puder ser garantido pelos processos normais de usinagem. A Figura 6.14 apresenta um exemplo de indicação da tolerância de circularidade em desenhos técnicos, equivalente a 0,04 mm.

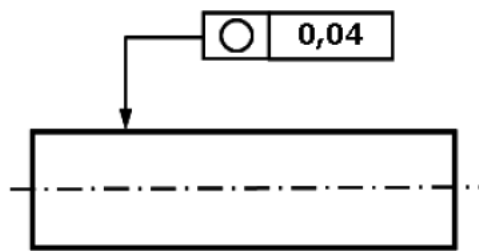


Figura 6.14 – Indicação de Tolerância de Circularidade em desenho técnico

A medição do desvio de circularidade pode ser realizada com a utilização de relógio comparador e um equipamento onde a peça é posicionada entre centros (Figura 6.15a), ou com a peça posicionada em um prisma em V (Figura 6.15b)

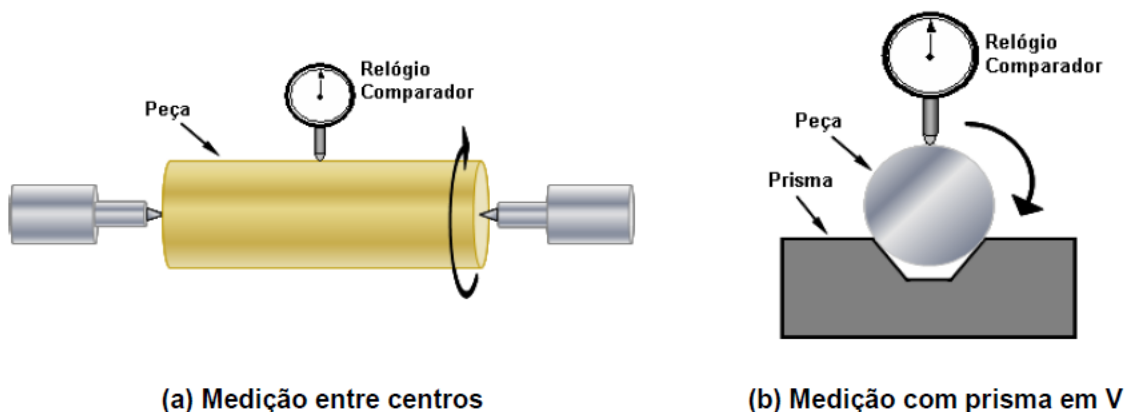


Figura 6.15 – Métodos para medição da circularidade

Pode-se, também, utilizar equipamentos específicos, especialmente projetados para medir o desvio de circularidade, como o apresentado na Figura 6.16.

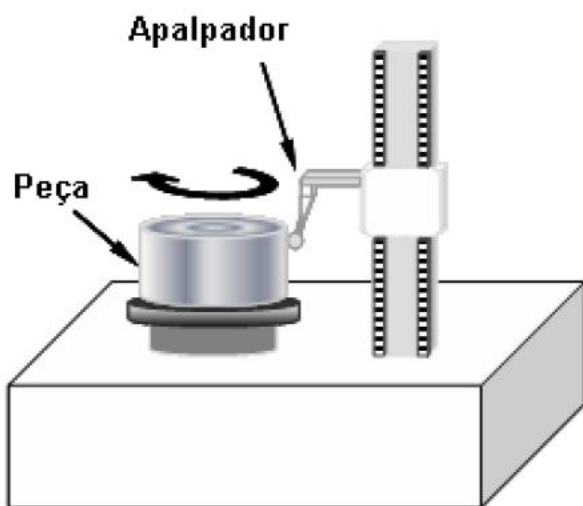


Figura 6.16 - Equipamento para medição da circularidade

Neste equipamento, a peça é posicionada sobre um eixo giratório, e um apalpador faz o contato com a superfície da peça. Os valores são indicados num mostrador digital ou então impressos. É conveniente indicar na especificação de tolerância de circularidade o método recomendado para a medição do desvio.

6.4 - TOLERÂNCIA DE CILINDRICIDADE

O desvio de cilindridade pode ser visto como uma soma de circularidade com retilidade. A tolerância de cilindridade (Figura 6.17) é definida por dois cilindros concêntricos que circundam a superfície da peça, estabelecendo os limites inferior e superior desta tolerância.

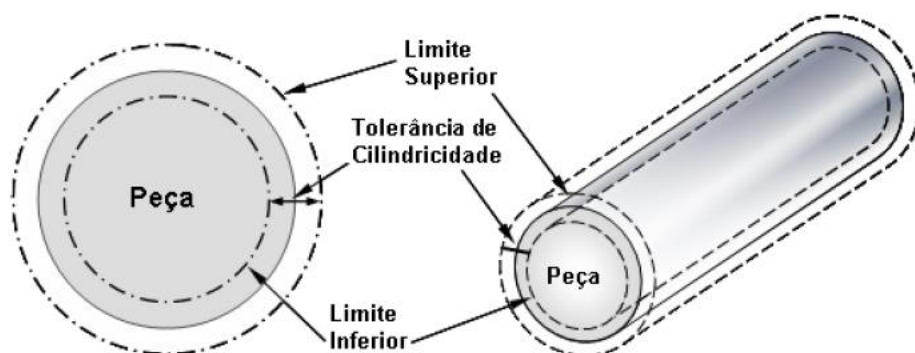


Figura 6.17 - Tolerância de cilindricidade

A Figura 6.18 apresenta um exemplo de indicação da tolerância de cilindricidade em desenhos técnicos, informando que a superfície da peça cilíndrica deve ficar entre dois cilindros coaxiais cujos raios diferem de 0,04 mm.

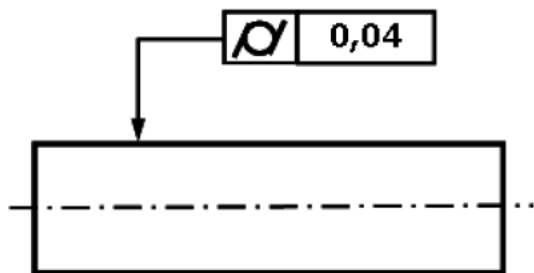


Figura 6.18– Indicação de Tolerância de Cilindricidade em desenho técnico

A medição do desvio de cilindricidade deve ser realizada em vários planos de medida ao longo de todo o comprimento do cilindro, e é igual à diferença entre o maior valor e o menor valor medido. O desvio máximo medido não deve ser maior do que a tolerância especificada. O desvio de cilindricidade pode ser considerado como o desvio de circularidade medido em toda a extensão da peça. A medição do desvio de cilindricidade (Figura 6.19) pode ser realizada por um instrumento de medição especialmente desenvolvido para este propósito ou, na ausência deste, a medição pode ser realizada em duas etapas:

- Medição do desvio máximo ao longo da seção longitudinal da peça;
- Medição do desvio máximo na seção transversal da peça (circularidade).

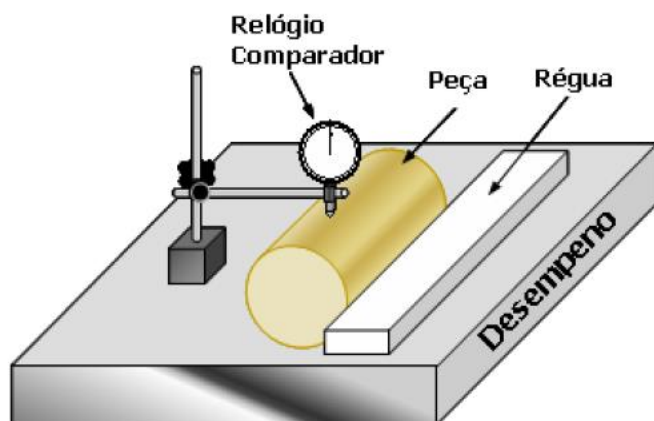


Figura 6.19 - Medição do desvio de cilindricidade

6.5 - TOLERÂNCIA DE PARALELISMO

Tolerância de paralelismo de uma linha reta (eixo) ou de um plano é o desvio de posição máximo admissível em relação à outra linha reta ou plano de referência (Figura 6.20).

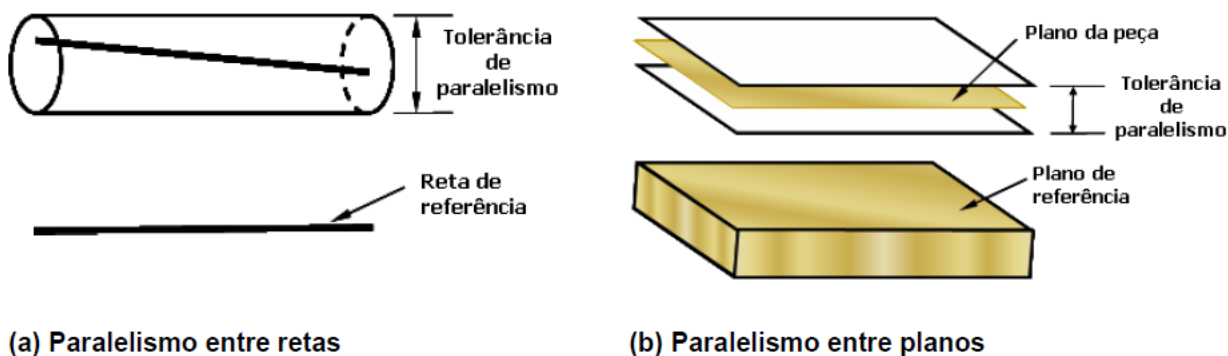


Figura 6.20 - Tolerância de Paralelismo

A tolerância de paralelismo entre duas linhas retas (Figura 6.20a) é delimitada pelo espaço contido em um cilindro paralelo ao eixo de referência, que envolve a linha efetiva (medida), tendo como eixo de simetria uma das retas teóricas. A tolerância de paralelismo entre dois planos (Figura 6.20b) é o desvio máximo admissível para uma superfície plana de uma peça, representada pela distância entre dois planos teóricos, paralelos entre si, sendo um o plano de referência, entre os quais deve estar a superfície plana efetiva (medida) da peça. A Figura 6.21 apresenta um exemplo de indicação da tolerância de paralelismo em desenhos técnicos, informando que a linha reta ou superfície plana da peça deve ficar entre duas retas paralelas (cilindro) ou dois planos paralelos, com distância de 0,06 mm entre si, e paralelos à reta ou plano de referência A.

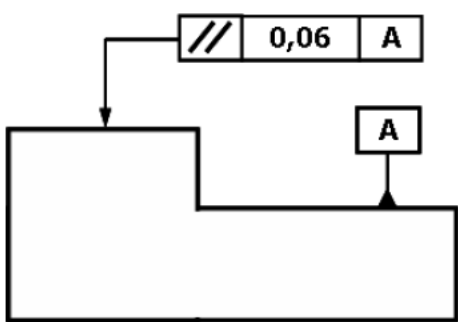


Figura 6.21 - Indicação de tolerância de paralelismo em desenho técnico

6.6 - TOLERÂNCIA DE INCLINAÇÃO

Tolerância de inclinação de uma linha reta (eixo) ou de um plano é o desvio de posição máximo admissível para o ângulo teórico em relação a outra linha reta ou plano de referência. O campo de

tolerância do desvio angular é delimitado por duas retas (Figura 6.22) ou dois planos paralelos entre si, com inclinação igual ao valor teórico especificado em projeto.

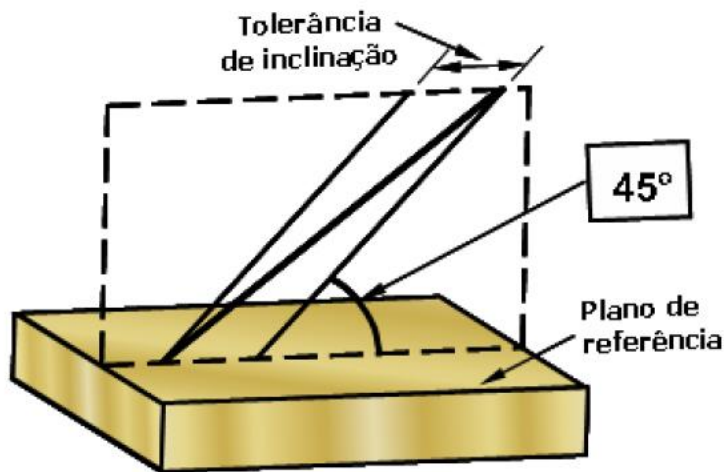


Figura 6.22 - Tolerância de Inclinação

A Figura 6.23 apresenta um exemplo de indicação da tolerância de inclinação em desenhos técnicos, informando que a linha reta ou superfície plana indicada na peça deve ficar entre duas retas paralelas, com distância de 0,06 mm entre si, e formando um ângulo plano de 45° com o plano de referência A.

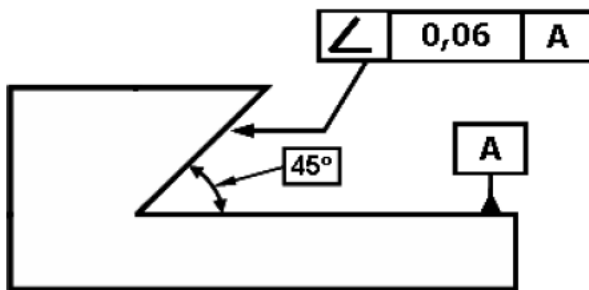


Figura 6.23 - Indicação de tolerância de inclinação em desenho técnico

6.7 - TOLERÂNCIA DE PERPENDICULARIDADE

Tolerância de perpendicularidade de uma linha reta (eixo) ou de um plano é o desvio de posição máximo admissível para o ângulo teórico de 90° em relação a outra linha reta ou plano de referência (Figura 6.24). O desvio de perpendicularidade pode ser considerado um caso particular do desvio de inclinação.

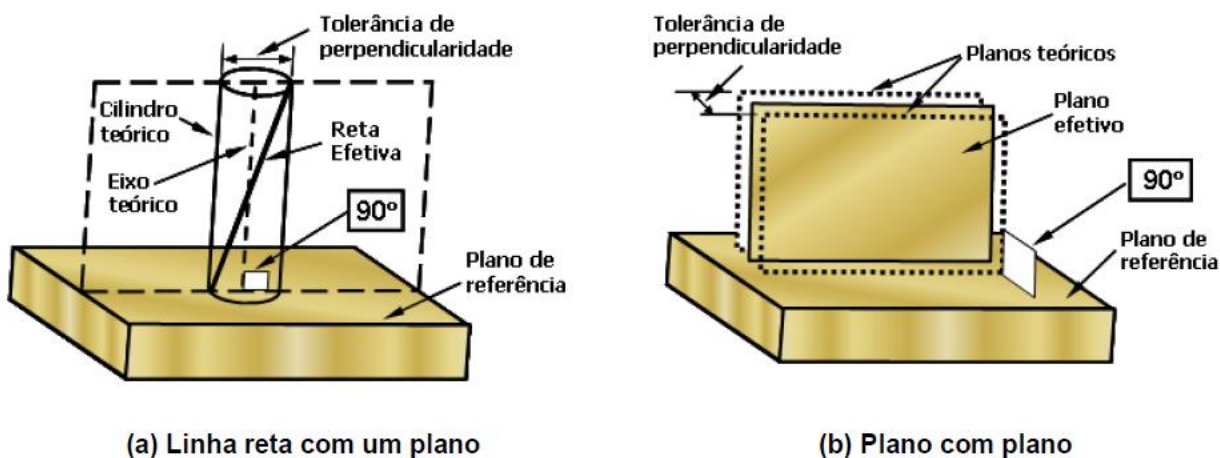


Figura 6.24 - Tolerância de Perpendicularidade

O campo de tolerância do desvio de perpendicularidade entre uma reta e um plano (Figura 6.24a) é delimitado por um cilindro, dentro do qual deve estar a reta efetiva (medida), cujo eixo teórico faz um ângulo de 90° em relação a um plano de referência especificado. O campo de tolerância do desvio de perpendicularidade entre dois planos (Figura 6.24b) é delimitado por dois planos teóricos, paralelos entre si, com inclinação de 90° em relação ao plano de referência especificado, entre os quais deve estar o plano efetivo (medido).

A Figura 6.25 apresenta um exemplo de indicação da tolerância de perpendicularidade em desenhos técnicos, informando que o plano efetivo (medido) da superfície indicada na peça, deve ficar entre dois planos teóricos paralelos com distância de 0,2 mm entre si, que formam um ângulo plano de 90° com o plano de referência A.

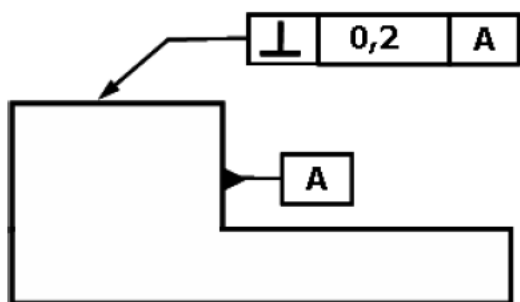


Figura 6.25 - Indicação de tolerância de perpendicularidade em desenho técnico

6.8 - TOLERÂNCIA DE LOCALIZAÇÃO DE UM PONTO

Tolerância de localização de um ponto é o desvio máximo admissível para a posição de um elemento em relação à sua posição teórica. O campo de tolerâncias é delimitado por um círculo ou esfera

cujo centro corresponde à localização teórica do ponto, e a superfície corresponde aos limites admissíveis para a localização do ponto.

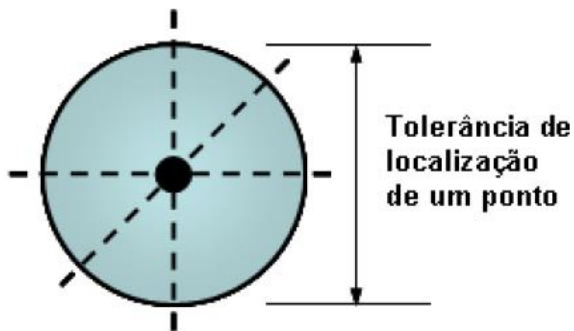


Figura 6.26 - Tolerância de localização de um ponto

A Figura 6.27 apresenta um exemplo de indicação da tolerância de localização de um ponto em desenhos técnicos, informando que o eixo de um furo deve estar incluído dentro de uma esfera de diâmetro 0,2 mm, cujo eixo teórico está na posição geometricamente exata indicada pelas cotas 60 mm e 80 mm.

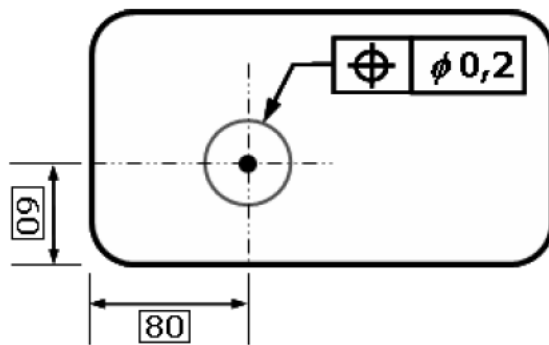


Figura 6.27 - Indicação de tolerância de localização em desenho técnico

6.9 - TOLERÂNCIA DE SIMETRIA

A tolerância de simetria de um plano médio ou de uma linha média em relação a uma reta ou plano de referência, é o desvio máximo admissível para o plano médio efetivo (medido) de uma peça, representada pela distância entre dois planos teóricos, paralelos entre si, e simétricos em relação ao plano médio de referência. A Figura 6.28 apresenta um exemplo de indicação da tolerância de simetria em desenhos técnicos, informando que o plano médio do canal deve estar entre dois planos paralelos com distância de 0,05 mm entre si, e simétricos ao plano de referência A.

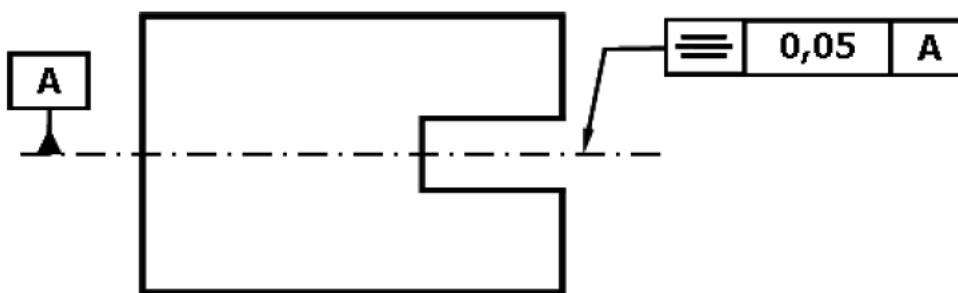


Figura 6.28 - Indicação de tolerância de simetria em desenho técnico

O desvio de simetria pode ser considerado como um caso particular do desvio de localização do ponto, em que os elementos considerados são arestas simétricas.

6.10 - TOLERÂNCIA DE COAXIALIDADE

A tolerância de coaxialidade é o desvio máximo admissível de concentricidade medido ao longo do eixo de simetria dos elementos considerados. O campo de tolerância é definido como um cilindro concêntrico a um dos elementos. O segundo elemento deve ter seu eixo de simetria, teoricamente coincidente com o primeiro, dentro do cilindro de tolerância. A Figura 6.29 apresenta um exemplo de indicação da tolerância de coaxialidade em desenhos técnicos, informando que o eixo de simetria da parte indicada na peça deve estar incluído dentro de um cilindro com diâmetro de 0,05 mm, cujo eixo coincide com o eixo de referência A.

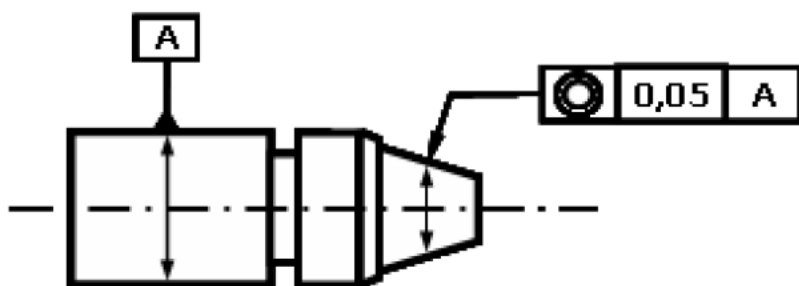


Figura 6.29 - Indicação de tolerância de coaxialidade em desenho técnico

6.11 - TOLERÂNCIA DE BATIDA RADIAL

Algumas vezes não é possível separar os desvios de forma dos desvios de posição para fabricação das peças e medição posterior, formando os desvios compostos de forma e posição. Dentre os vários tipos

de desvios compostos destacam-se os desvios de batida em superfícies de revolução. A tolerância de batida é o desvio máximo admissível na posição do elemento considerado ao completar uma rotação, girando em torno de um eixo de referência sem se deslocar axialmente. Os desvios de batida podem somar erros como a coaxialidade, excentricidade, perpendicularidade, circularidade e planicidade. A medição do desvio de batida é possível somente com o elemento realizando uma rotação completa. Os desvios de batida podem ser subdivididos em desvios de batida radial e desvios de batida axial, de acordo com a posição do desvio em relação ao eixo de rotação.

Tolerância de batida radial (Figura 6.30) é o desvio máximo admissível da posição de um elemento ao completar uma rotação, medida no sentido radial ao eixo de rotação. O campo de tolerância é definido em um plano perpendicular ao eixo de rotação, composto de dois círculos concêntricos, dentro dos quais deve encontrar-se o perfil da peça durante uma volta completa em torno de seu eixo de simetria.

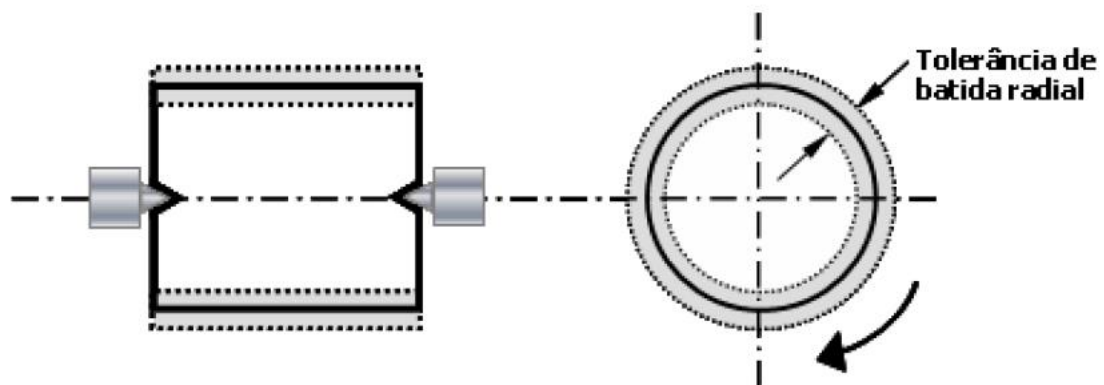


Figura 6.30 - Tolerância de batida radial em superfícies cilíndricas

A medição do desvio de batida radial é semelhante ao método de medição do desvio de circularidade, a qual pode ser realizada com a utilização de relógio comparador e um equipamento onde a peça é posicionada entre centros (Figura 6.31a), ou com a peça posicionada em um prisma em V (Figura 6.31b).

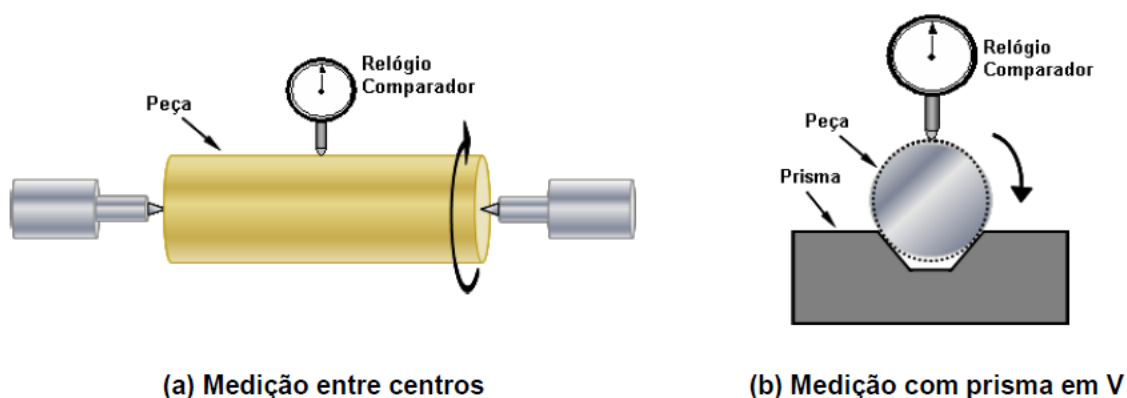


Figura 6.31 – Métodos para medição do desvio de batida radial

A Figura 6.32 apresenta um exemplo de indicação da tolerância de batida radial em desenhos técnicos, informando que numa revolução completa da peça em torno do eixo de referência A, o balanço radial da superfície indicada não deve ser maior que a tolerância de 0,02 mm.

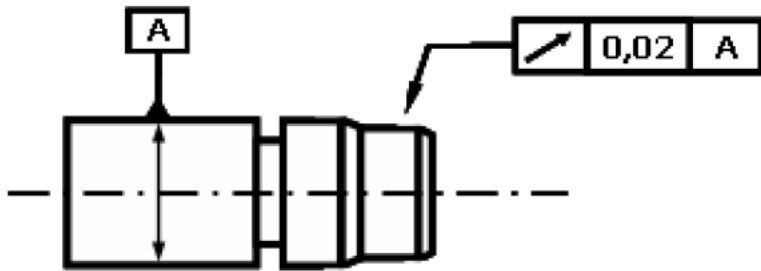


Figura 6.32 - Indicação de tolerância de batida radial em desenho técnico

Para superfícies cônicas, a tolerância de batida é a distância entre superfícies cônicas concêntricas, dentro das quais deverá encontrar-se a superfície efetiva (medida), quando a peça efetuar um giro completo sobre seu eixo de simetria.

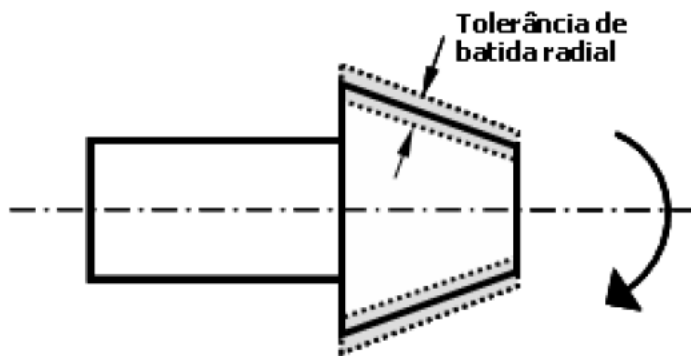


Figura 6.33 - Tolerância de batida radial em superfícies cônicas

6.12 - TOLERÂNCIA DE BATIDA AXIAL

Tolerância de batida axial (Figura 6.34) é o desvio máximo admissível da posição de um elemento ao completar uma rotação, medida no sentido axial ao eixo de rotação.

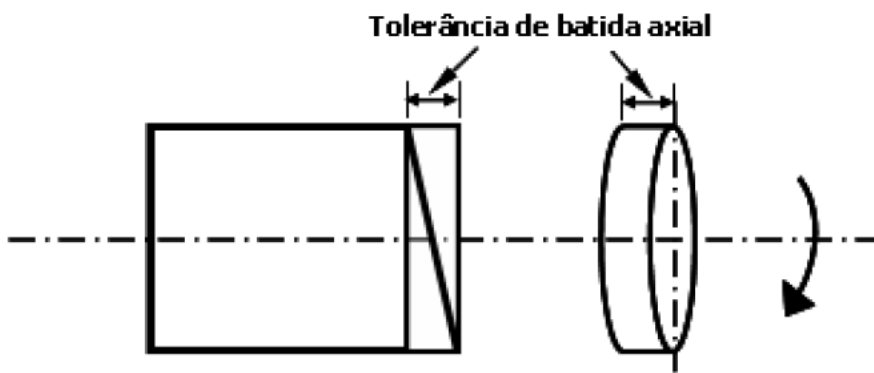


Figura 6.34 - Tolerância de batida axial

O campo de tolerância é definido como um cilindro concêntrico ao eixo de rotação, cuja altura (distância entre as bases) corresponde à tolerância de batida axial. A trajetória de um ponto qualquer durante uma rotação completa deve ficar dentro do cilindro.

A Figura 6.35 apresenta um exemplo de indicação da tolerância de batida axial em desenhos técnicos, informando que numa revolução completa da peça em torno do eixo de referência A, o balanço axial da superfície frontal não deve ser maior que a tolerância de 0,04 mm.

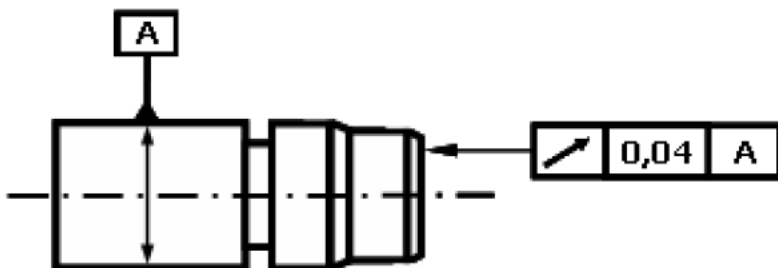


Figura 6.35 - Indicação de tolerância de batida axial em desenho técnico

A Figura 6.36 apresenta um exemplo de medição do batimento axial usando relógio comparador.

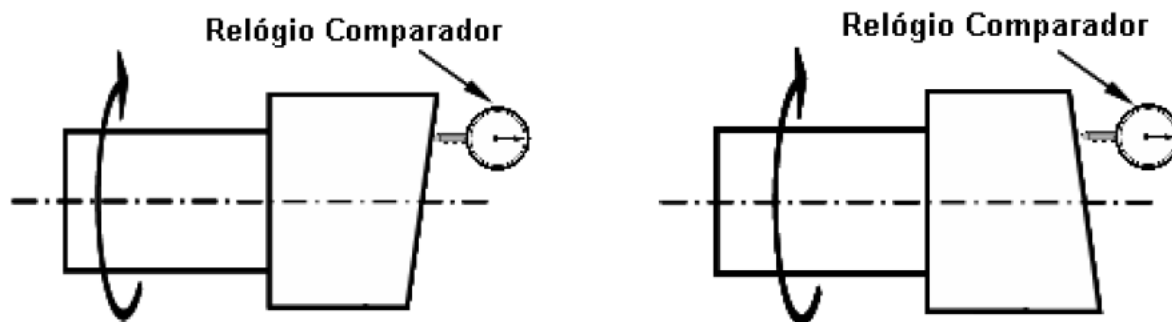


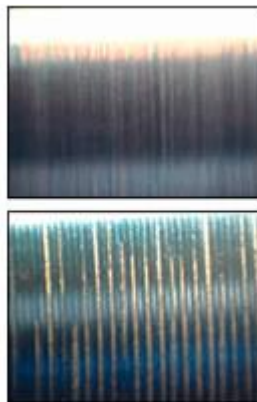
Figura 6.36 – Medição do desvio de batida axial

7 - ACABAMENTO SUPERFICIAL – RUGOSIDADE

As superfícies, depois de usinadas, não são perfeitamente lisas e apresentam irregularidades quando observadas em detalhes. Estas irregularidades são provocadas por sulcos ou marcas deixadas pela ferramenta que atuou sobre a superfície da peça. Os processos de torneamento, mandrilamento, alargamento e furação, por exemplo, deixam normalmente marcas helicoidais, enquanto que o fresamento deixa sulcos sucessivos na forma de semi-círculos. A Figura 7.1 mostra exemplos típicos de superfícies usinadas



(a) Superfície fresada



(b) Superfície torneada

Figura 7.1 – Exemplo de superfícies usinadas.

A importância do acabamento superficial se intensifica quando há precisão de ajuste entre peças a serem acopladas. Isto porque somente a precisão dimensional, de forma e de posição não é suficiente para garantir a funcionalidade de um par acoplado. A rugosidade deve ser compatível com as tolerâncias dimensionais e de forma, uma vez que peças com alta rugosidade não permitem acoplamentos deslizantes, por exemplo. Por outro lado, superfícies sem acoplamento não necessitam valores baixos de rugosidade e, muitas vezes o aspecto visual determina valores máximos de rugosidade. Dependendo do valor de rugosidade especificado, alguns processos de usinagem não capazes de atender, restringindo a gama de escolhas. O acabamento superficial também se torna fundamental em casos de superfícies deslizantes como guia, mancais, etc. Nestes casos valores de rugosidade e mesmo a forma da textura superficial se torna importante para minimizar desgaste, atrito, corrosão, resistência à fadiga, transmissão de calor, propriedades óticas, escoamento de fluidos e superfícies de medição (blocos-padrão, micrômetros, paquímetros, etc.). A Figura 7.2 mostra algumas faixas de valores típicos para rugosidade esperada em processos de usinagem, além de alguns outros processos de manufatura.

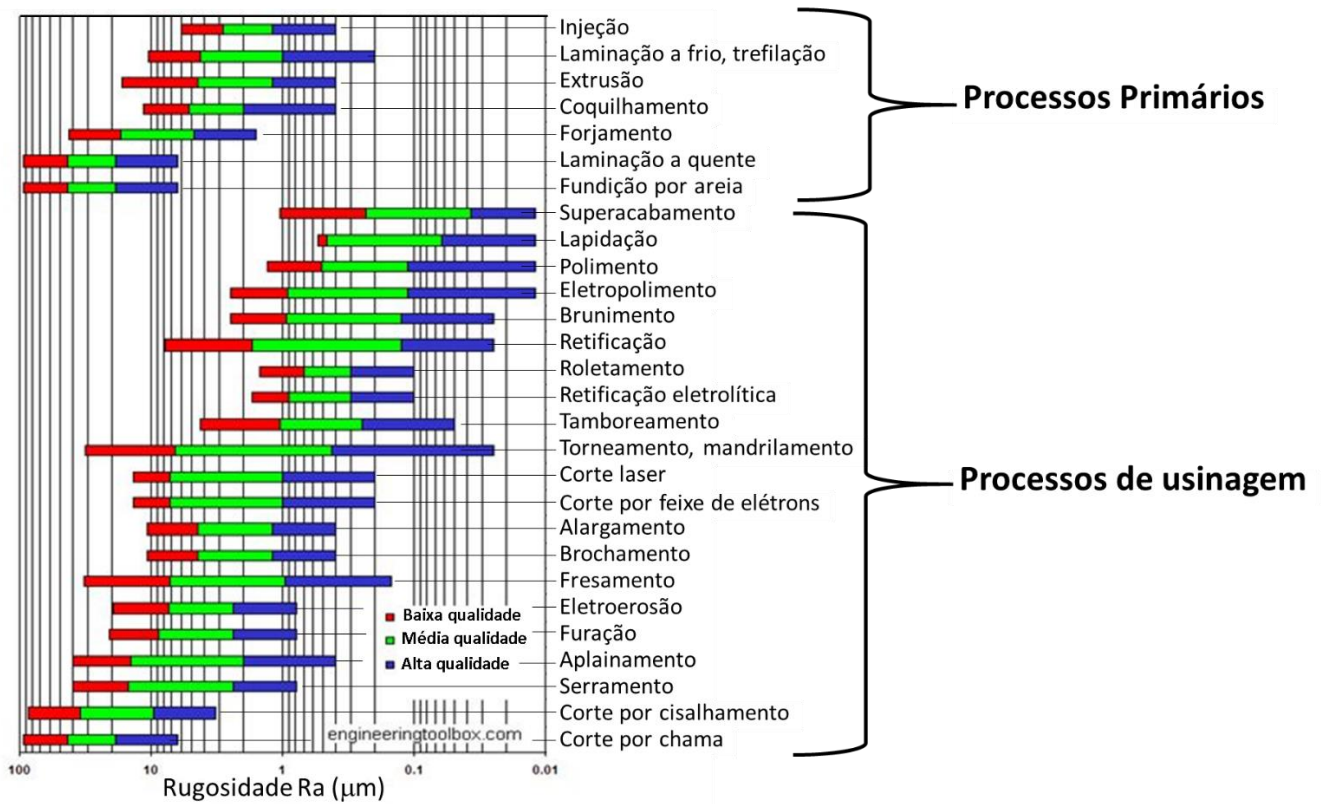


Figura 7.2 – Valores típicos de rugosidade esperada em diversos processos de manufatura, incluindo os de usinagem.

O acabamento superficial é medido por meio das medidas de rugosidade, as quais são expressas em micrometros (μm) normalizados pela ABNT NBR 6405-1985. Na mesma norma estão as maneiras de se indicar a rugosidade em desenhos, como mostra a Figura 7.3.

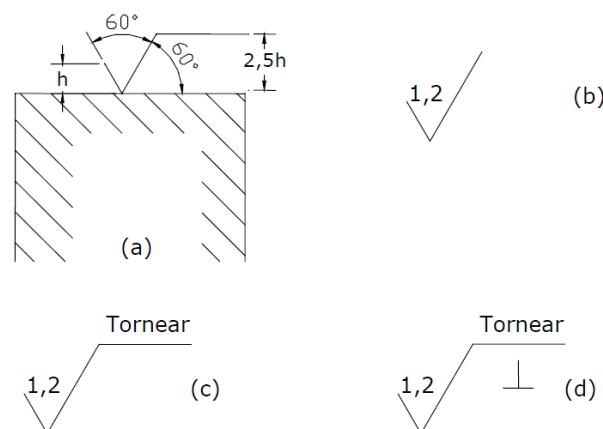


Figura 7.3 – Exemplos de indicação da rugosidade nos desenhos técnicos

Há diversas maneiras de se quantificar a rugosidade de uma superfície, mas as mais comuns são a rugosidade média aritmética, **Ra**, a rugosidade média, **Rz** e a rugosidade máxima, **Rmáx**. Adicionalmente

há alguns parâmetros adicionais, como o desvio médio quadrático, **Rq**, a altura máxima do pico mais elevado, **Rp** e a máxima profundidade do vale mais profundo, **Rm**. Há ainda fatores de assimetria do perfil avaliado (skewness), **Psk**, **Rsk**, **Wsk**, além de fatores de achatamento do perfil avaliado (kurtosis), **Pku**, **Rku**, **Wku** e alguns outros fatores para aplicações bastante específicas, os quais constam na norma.

7.1 – Rugosidade média aritmética, Ra.

É a média aritmética dos valores absolutos das ordenadas dos afastamentos dos pontos do perfil de rugosidade, em relação à linha média, dentro do percurso de medição **lm**. Ra pode ser calculada pela Equação:

$$Ra = \frac{1}{L} \int_0^L |y| dx = \frac{A}{L} \quad (7.1)$$

Ou aproximadamente por:

$$Ra = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y| \quad (7.2)$$

onde **n** é o número de ordenadas consideradas. A ABNT recomenda o parâmetro **Ra** para avaliação da rugosidade (em µm). A Figura 7.4 mostra Ra esquematicamente.

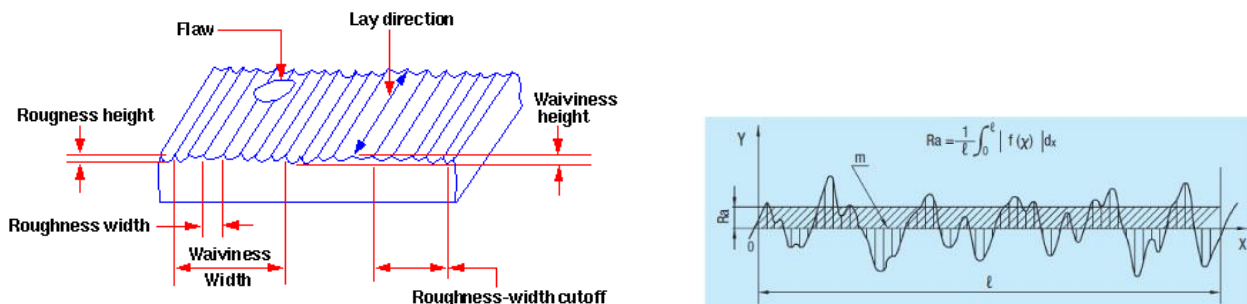
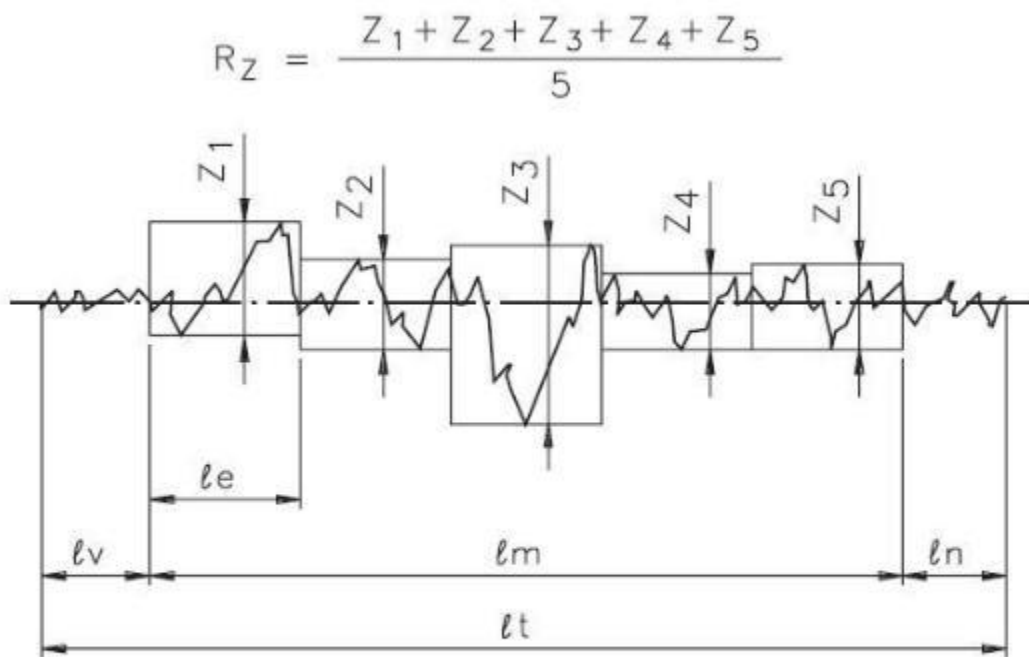


Figura 7.4 – Esquema para avaliação de Ra.

No sistema imperial de medidas, Ra equivale a CLA (*Center Line Average*), mais usado na Inglaterra e a AA (*Aritmetical Average*) nos Estados Unidos, sendo sempre medida em µin (micro inches). **Ra** é um valor médio e é uma maneira muito simples de fornecer uma medida geral do estado da superfície. Em determinadas aplicações específicas pode ser mais útil a especificação de outros parâmetros de rugosidade.

7.2 – Rugosidade média, R_z

Corresponde à média aritmética dos 5 valores de rugosidade parcial, sendo que se define por rugosidade parcial (Z_i) a soma dos valores absolutos das ordenadas dos pontos de maior afastamento, acima e abaixo da linha média, existentes dentro de um comprimento de amostragem (*cut off*). Na representação gráfica do perfil, este valor corresponde à altura entre os pontos máximo e mínimo do valor corresponde à altura entre os pontos máximo e mínimo do perfil, dentro do comprimento de amostragem (l_e). A Figura 7.5 mostra esquematicamente como a rugosidade média R_z é calculada.



Rugosidade parcial Z_i para definir R_z .

Figura 7.5 – Esquema para a rugosidade média R_z .

7.3 – Rugosidade máxima, $R_{\text{máx}}$

É o maior valor das rugosidades parciais Z_i , que se apresenta no percurso de medição l_m (Figura 7.6).

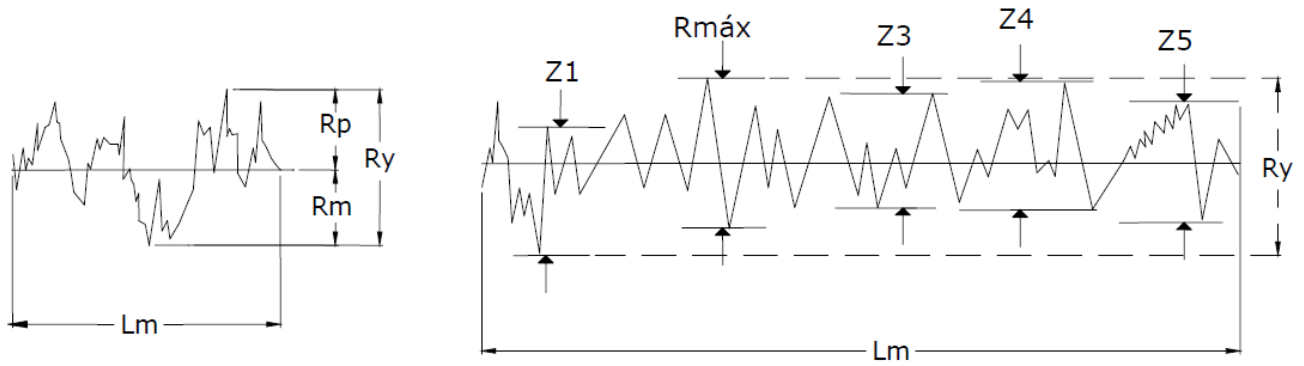


Figura 7.6 – Esquema para a rugosidade máxima **Rmáx**.

Também pode ser designada como **Ry**, segundo a norma DIN 4762 (de 1984. **Ry** é a máxima distância pico-vale. **Rmáx** é o maior valor das rugosidades parciais e **Ry** é a máxima distância pico-vale.

7.4 – Desvio Médio Quadrático (**Rq**), altura máxima do pico mais elevado (**Rp**) e a máxima profundidade do vale (**Rm**)

É um parâmetro correspondente ao Ra. É o desvio médio quadrático (Figura 7.7a).

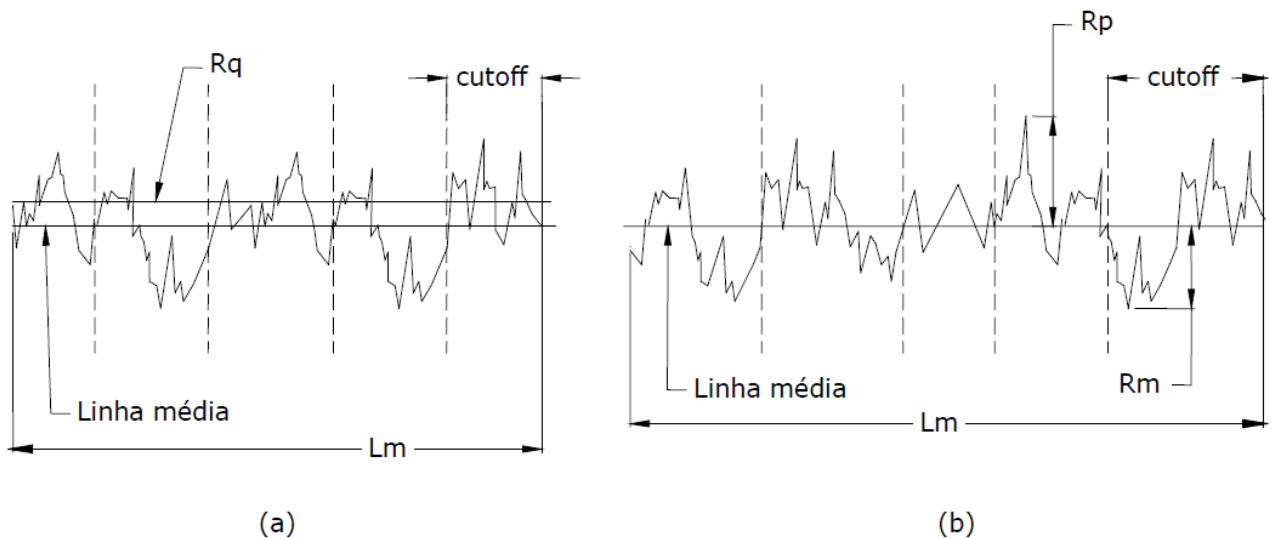


Figura 7.7 - Esquema para a os desvios **Rq**, **Rp** e **Rm**.

Rq é também denominado RMS (Root Mean Square) e pode ser calculado pela equação:

$$Rq = \sqrt{\frac{1}{L} \int_0^L y^2 dx} \approx \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{y_i^2}{n}}$$

(7.3)

Rp, por sua vez é a altura máxima do pico mais elevado da rugosidade, situado acima da linha média e **Rm**, é a máxima profundidade do vale mais profundo da rugosidade, situado abaixo da linha média, definidos pela Figura 7.7.

A norma ABNT recomenda o uso do parâmetro Ra para a maioria das aplicações quando não há nenhuma particularidade de maior exigência para a superfície. A Tabela 7.1 mostra algumas recomendações de valores de Ra e Rz, segundo algumas aplicações.

Tabela 7.1. -Recomendações de valores de Ra e Rz segundo aplicações típicas.

Exemplos		Rz μm															
		Ra μm															
1	Superfícies onde existem grandes exigências de uniformidade.	f															
	Superfícies de escorregamento, em peças que são delicadas de um ponto de vista funcional.	m															
	Instrumentos cirurgicos, de medição, calibres, etc.	g															
2	Superfícies de sustentação, (revestimentos), superfícies de escorregamento.	f															
	Rolamentos de esferas e de rolos, esferas, rolos, caminhos para rolos.	m															
	Superfícies de contacto para transmissão de electricidade. Instrumentos de medição, calibres.	g															
3	Camisas de cilindros. Superfícies de guiamento e superfícies de escorregamento.	f															
	Moentes. Chumaceiras para veios.	m															
	Transições radiais em peças sujeitas a fadiga. Sedes de rolamentos de esferas e rolos.	g															
4	Sedes de válvulas. Superfícies de veios sujeitos a tensões elevadas, por exemplo, veios com torção.	f															
	Superfícies de vedação para peças de borracha de vedações móveis. Superfícies polidas para revestimentos de superfície. Superfícies conjugadas com graus de tolerância IT5 – 7.	m															
	Rugosidade de superfície geral para veios maquinados sujeitos a carregamento. Superfícies de vedação para peças de borracha de vedações fixas. Superfícies para revestimento. Anilhas de contacto axial. Superfícies de contacto. Superfícies conjugadas com graus de tolerância IT6 – 8.	g															
5	Rugosidade de superfície geral para veios maquinados sujeitos a carregamento. Superfícies de vedação para peças de borracha de vedações fixas. Superfícies para revestimento. Anilhas de contacto axial. Superfícies de contacto. Superfícies conjugadas com graus de tolerância IT6 – 8.	f															
	Superfícies dos flancos de roscas, rodas dentadas e acoplamentos por estrias (rectificadas).	m															
	Superfícies de chapas laminadas a frio. Superfícies de vedação sem junta intermédia. Superfícies para revestimentos. Superfícies conjugadas com graus de tolerância IT7 – 9.	g															
6	Superfícies dos flancos de roscas, rodas dentadas e acoplamentos por estrias (rectificadas).	f															
	Superfícies de chapas laminadas a frio. Superfícies de vedação sem junta intermédia. Superfícies para revestimentos. Superfícies conjugadas com graus de tolerância IT7 – 9.	m															
	Superfícies dos flancos de roscas, rodas dentadas e acoplamentos por estrias (rectificadas).	g															

Por outro lado, as especificações de rugosidade devem também ser compatíveis com a tolerância dimensional da peça e a Tabela 7.2 mostra algumas recomendações para

Tabela 7.2 – Recomendações de valores máximos de Ra de acordo com a classe de tolerância IT da peça.

VALORES DE RUGOSIDADE MÁXIMA Ra COMPATÍVEIS COM AS TOLERÂNCIAS ISO (μm)										
Tolerâncias ISO	Grupos de dimensões (mm)									
	≤ 3		$> 3 \leq 18$		$> 18 \leq 80$		$> 80 \leq 250$		> 250	
	Tol.	Ra	Tol.	Ra	Tol.	Ra	Tol.	Ra	Tol.	Ra
IT 6	6	0,2	8 + 11	0,3	13 + 19	0,5	22 + 29	0,8	32 + 40	1,2
IT 7	10	0,3	12 + 18	0,5	21 + 30	0,8	35 + 46	1,2	52 + 63	2
IT 8	14	0,5	18 + 27	0,8	33 + 46	1,2	54 + 72	2	81 + 97	3
IT 9	25	0,8	30 + 43	1,2	52 + 74	2	87 + 115	3	130 + 155	5
IT 10	40	1,2	48 + 70	2	84 + 120	3	140 + 185	5	210 + 250	8
IT 11	60	2	75 + 110	3	130 + 190	5	220 + 290	8	320 + 400	12
IT 12	100	3	120 + 180	5	210 + 300	8	350 + 460	12	520 + 630	20
IT 13	140	5	180 + 270	8	330 + 460	12	540 + 720	20	810 + 970	—
IT 14	250	8	300 + 430	12	520 + 740	20	870 + 1150	—	1300 + 1550	—

A escolha de outros parâmetros para especificar a rugosidade de uma peça deve ser adaptada à sua função. Por exemplo, peças de vedação podem necessitar a especificação de **R_{máx}**, uma vez que sulcos profundos podem levar a vazamentos indesejados. Para superfícies porosas, as especificações de Ra ou Rq pode ser mais interessante, ainda dependendo da aplicação da peça.

7.5 - Determinação do Comprimento de amostragem, **le** ("Cut-Off") e o percurso de medição, **lm**

Para a avaliação de rugosidade deve-se antes definir o percurso de medição, **lm**, o qual é a extensão do trecho útil do perfil de rugosidade usado diretamente na avaliação, projetado sobre a linha média e comprimento de amostragem, **le**, ou o “**cut off**”, Este é igual a um quinto do percurso de medição, ou seja, **le = lm/5**. O comprimento de amostragem, **le**, deve ser o suficiente para avaliar a rugosidade, isto é, deve conter todos os elementos representativos de rugosidade. Para perfis que resultam periódicos (torneamento, aplainamento, etc.), recomenda-se a utilização da Tab. 7.3 para a escolha do comprimento de amostragem e demais parâmetros. A distância entre sulcos é aproximadamente igual ao avanço.

Tabela 7.3 - Determinação do comprimento de amostragem, de acordo da distância entre sulcos

Distância entre sulcos (mm)	l_e (mm)	l_m (mm)
de 0,01 até 0,032	0,08	0,4
de 0,032 até 0,1	0,25	1,25
de 0,1 até 0,32	0,8	4
de 0,32 até 1	2,5	12,5
de 1 até 3,2	8	40

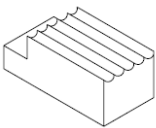
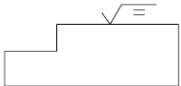
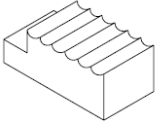
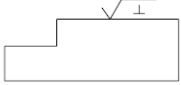
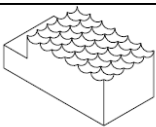
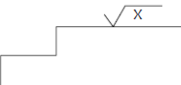
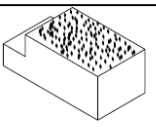
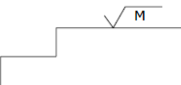
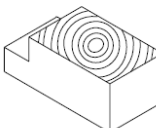
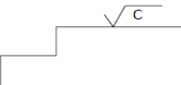
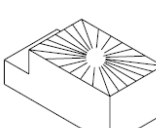
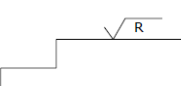
Para perfis nos quais não há periodicidade da ondulação (superfícies obtidas por retificação, conformação plástica, etc.) sugere-se a utilização da Tabela 7.4.

Tabela 7.4 - Determinação do comprimento de amostragem para perfis aperiódicos baseados no parâmetro R_a , R_z ou $R_{máx}$.

Rugosidade R_a (μm)	Rugosidade R_z ou $R_{máx}$ (μm)	l_e (mm)	l_m (mm)
até 0,1	até 0,5	0,25	1,25
de 0,1 até 2,0	de 0,5 até 10,0	0,80	4,00
de 2,0 até 10,0	de 10,0 até 50	2,50	12,50
acima de 10,0	acima de 50,0	8,00	40,00

Também de acordo com o processo de fabricação, pode-se indicar nos desenhos a orientação desejada para os sulcos na superfície da peça. Tal especificação deve ser usada com cuidado de somente onde for necessário para fins estéticos, ou como forma de texturização para fins de desempenho da superfície em serviço. A Tabela 7.5 mostra as possibilidades normalizadas.

Tabela 7.5 – Designação normalizadas para orientação de sulcos em superfícies usinadas

Sinais convencionais	PERSPECTIVA ESQUEMÁTICA	INDICAÇÃO DO DESENHO	ORIENTAÇÃO DOS SULCOS	DIREÇÃO DA MEDIÇÃO DA RUGOSIDADE OU DO PLANO DE PERFIL
=			Os sulcos devem ser orientados paralelamente ao traço da superfície sobre a qual o símbolo se apóia, no desenho	Perpendicular à direção dos sulcos
			Os sulcos devem ser orientados em direção normal ao traço da superfície sobre a qual o símbolo se apóia no desenho	Perpendicular à direção dos sulcos
X			Os sulcos devem ser orientados segundo duas direções cruzadas	Segundo a bissetriz dos ângulos formados pelas direções dos sulcos
M			Os sulcos devem ser orientados segundo várias direções (sulcos multi-direcionais)	Em qualquer direção
C			Os sulcos devem ser aproximadamente concêntricos com o centro da superfície à qual o símbolo se refere	Radial
R			Os sulcos devem ser orientados segundo direções aproximadamente radiais em relação ao centro da superfície à qual o símbolo se refere	Normal a um raio

7.6 – Medição de Rugosidade

A medição da rugosidade das peças efetua-se, geralmente, pelo uso de aparelhos chamados de rugosímetros, os quais avaliam uma seção ao longo da superfície, de forma bidimensional. De acordo com as dimensões da peça sendo avaliada, podem utilizar-se rugosímetros fixos ou portáteis. A Figura 7.8 mostra um rugosímetro fixo, o qual exige que a peça seja colocada sobre a mesa de medição.



Figura 7.8 – Exemplos de rugosímetros de bancada usados para avaliação de rugosidade.

Para casos mais particulares, nos quais a peça seja muito grande ou pesada para colocar sobre o aparelho, há rugosímetros portáteis, como mostrado na Figura 7.9.



Figura 7.9 - Exemplos de rugosímetros portáteis usados para avaliação de rugosidade

8 – Bibliografia

NBR ISO 4287- (2002) - Especificações geométricas do produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Termos, definições e parâmetros da rugosidade.

Stout, K.J., (2004), Development of Methods for the Characterization of Roughness in 3D, Penton Press, Londres.

Farago, F.T., Curtis, M.A., (2007), Handbook of Dimensional Measurements, 4th ed. Industrial Press Inc.