

INTRODUÇÃO À ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO MECÂNICA

2ª Edição

OLÍVIO NOVASKI

Blucher

INTRODUÇÃO À ENGENHARIA
DE FABRICAÇÃO MECÂNICA



Blucher

OLÍVIO NOVASKI

Professor Doutor da Faculdade de Engenharia Mecânica
da UNICAMP

**INTRODUÇÃO À ENGENHARIA
DE FABRICAÇÃO MECÂNICA**

2ª edição

Introdução à Engenharia de Fabricação Mecânica

© 2013 Olívio Novaski

2ª edição

Editora Edgard Blücher Ltda.

Blucher

Rua Pedroso Alvarenga, 1245, 4o andar
04531-012 – São Paulo – SP – Brasil
Tel.: 55 11 3078 5366
contato@blucher.com.br
www.blucher.com.br

Segundo Novo Acordo Ortográfico, conforme 5a ed. do
Vocabulário Ortográfico da Língua Portuguesa.
Academia Brasileira de Letras, março de 2009.

É proibida a reprodução total ou parcial por quaisquer
meios, sem autorização escrita da Editora.

Todos direitos reservados pela Editora Edgard Blücher Ltda.

Ficha Catalográfica

Novaski, Olívio
Introdução à Engenharia de Fabricação Mecânica /
Olívio Novaski. – 2. ed. - São Paulo : Blucher, 2013.

ISBN 978-85-212-0763-4

1. Engenharia mecânica 2. Engenharia de produção 3.
Processos de fabricação I. Título

12-0428

CDD 658.5

Índices para catálogo sistemático:

1. Engrenagens
2. Engenharia mecânica

PREFÁCIO

Tão logo foi impressa a primeira edição, foi observada pelo próprio autor uma série de erros e falhas, outras tantas apontadas por diversos colegas, alunos e usuários. A intenção era fazer essas correções imediatamente, mas problemas pessoais e compromissos profissionais sempre colocaram essa intenção em segundo plano. A tarefa de revisão, portanto, começou tão logo foi impressa a edição anterior, mas realizada aos poucos e não no ritmo desejado. Todavia, ao se revisar erros anteriores, com certeza outros surgem, e é uma tarefa sem fim, assim já me penitencio das possíveis imperfeições novas e algumas antigas que porventura deixei passar. Por outro lado, procurou-se aproveitar a oportunidade para fazer atualizações no que concerne aos temas tratados, ampliando alguns, e tentando-se, ao menos conceitualmente, basear-se nas normas vigentes, mas não necessariamente adotando-se a mesma simbologia e terminologia.

Com relação às referências, torna-se uma tarefa difícil fazer citações e mesmo manter ao longo deste tempo o acervo consultado. Optou-se, nesse quesito, em não se fazer citações e colocar, no fim do livro, as referências mais utilizadas, ou as consultadas mais recentemente e, ainda, resguardadas.

Espero que possa fazer uma contribuição, ainda que pequena, aos alunos, colegas e interessados, de maneira geral, pelo tema.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que, de um jeito ou de outro, colaboraram para a realização deste trabalho. Muitos anônimos, colegas e alunos que colaboraram comigo, principalmente na parte operacional, aos meus alunos de Iniciação Científica, em especial aqueles que trabalharam no Laboratório Didático de Metrologia da UNICAMP. Aos alunos da graduação, pelos comentários e apontamentos de diversas falhas surgidas ao longo do tempo, e apontadas durante as aulas, ao longo dos anos.

Uma menção especial à minha filha especial Letícia, companheira querida de todos os meus momentos, que sempre me perguntava “Pai, não vai trabalhar no livro hoje?”. Mesmo, às vezes, cansado e exausto, com problemas pessoais e profissionais, existe motivação maior do que essa?

Não poderia deixar de mencionar meu filho Gustavo, sempre solícito e incentivador do meu trabalho.

Ao meu amigo, Eng^o. Sérgio Luís Zarpellon, que se dispôs a auxiliar na revisão.

Aos que estiveram próximos de mim durante a execução deste trabalho.

Muito obrigado a todos!

Dedicatória

Dedico esta obra a duas joias preciosas
que iluminam minha vida:

Letícia e Gustavo

Meus filhos amados.

CONTEÚDO

Capítulo 1 – TOLERÂNCIAS E AJUSTES	15
1.1 Introdução	15
1.2 Evolução das tolerâncias	17
1.3 Terminologia básica	17
1.3.1 Exemplo	19
1.4 Terminologia de <i>tolerância</i>	19
1.4.1 Exemplos	23
1.5 Terminologia de ajustes	24
Capítulo 2 – SISTEMAS DE TOLERÂNCIAS E AJUSTES	33
2.1 Bases do sistema de tolerâncias e ajustes	33
2.2 Grupo de dimensões nominais	33
2.3 Graus de <i>tolerância-padrão</i>	34
2.3.1 Exemplos	35
Capítulo 3 – CAMPOS DE TOLERÂNCIA	39
3.1 Introdução	39
3.2 Derivação dos afastamentos fundamentais	40
3.2.1 Exemplos	43
3.3 Classes de <i>tolerâncias</i>	46
3.3.1 Representação da dimensão com tolerância	46
3.3.2 Exemplo	48
Capítulo 4 – SISTEMAS DE AJUSTES	51
4.1 Introdução	51
4.2 Sistema de ajuste eixo-base	52
4.3 Sistema de ajuste furo-base	52
4.4 Sistemas de ajustes	53
4.5 Cálculo das tolerâncias	54
4.5.1 Exemplo	55
4.6 Influência da temperatura nos ajustes	57
4.6.1 Exemplo	60
4.7 Recomendações práticas para a escolha de um ajuste	64
4.7.1 Acoplamentos entre eixos e carcaças em rolamentos	66
4.7.2 Exemplo	68
4.8 Exemplos gerais	68

Capítulo 5 – CALIBRADORES	73
5.1 Introdução	73
5.2 Cálculo de calibradores de fabricação	75
5.2.1 Calibradores para dimensões internas até 180 mm (calibradores tampão)	75
5.2.2 Calibradores para medidas internas acima de 180 mm (calibradores tampão)	76
5.2.3 Calibradores para medidas externas até 180 mm (calibradores anulares)	77
5.2.4 Calibradores para medidas externas acima de 180 mm (calibradores anulares)	77
5.3 Marcação dos calibradores de fabricação	78
5.3.1 Exemplos	78
Capítulo 6 – TRANSFERÊNCIA DE COTAS E TOLERÂNCIA GERAL DE TRABALHO	85
6.1 Transferência de cotas	85
6.1.1 Exemplos	89
6.2 Tolerância geral de trabalho em conjuntos montados	93
6.2.1 Exemplo	99
Capítulo 7 – TOLERÂNCIAS GEOMÉTRICAS	101
7.1 Introdução	101
7.2 Tolerâncias geométricas	108
7.2.1 Exemplo	114
7.3 Tolerâncias de forma	114
7.4 Tolerâncias de orientação	122
7.5 Tolerâncias de localização	127
7.6 Tolerâncias de batimento	133
Capítulo 8 – RUGOSIDADE DAS SUPERFÍCIES	135
8.1 Introdução	135
8.2 Principais parâmetros de rugosidade	144
8.2.1 Parâmetros de amplitude (pico e vale)	144
8.2.2 Parâmetro de amplitude (média das ordenadas)	145
8.2.3 Parâmetros de espaçamento	147
8.2.4 Curvas e parâmetros relacionados	147
8.3 Determinação do comprimento de amostragem (“cut-off”)	149
8.4 Indicação do estado da superfície em desenhos técnicos	150
8.5 Relação entre rugosidade, tolerância dimensional e processos de fabricação por usinagem	153

Capítulo 9 – NOÇÕES SOBRE CONTROLE ESTATÍSTICO DO PROCESSO	155
9.1 Introdução	155
9.2 Conceitos básicos	155
9.2.1 Exemplo	171
9.3 Limites do processo e sistemas de medição	175
9.3.1 Exemplo	176
Anexos	179
Referências	253

TOLERÂNCIAS E AJUSTES

1.1 INTRODUÇÃO

Na fabricação de conjuntos é importante que os componentes se ajustem reciprocamente na montagem, sem que sejam submetidos a um tratamento ou ajuste suplementares. A possibilidade de substituir umas peças por outras ao se montar ou consertar certo conjunto sem tratamento ou ajuste suplementar se denomina *intercambiabilidade*.

A premissa fundamental da *intercambiabilidade* é a escolha de um processo tecnológico que assegure a fabricação das peças com igual precisão. Por precisão entende-se o grau da correspondência entre as dimensões reais da peça e as indicadas no desenho. Nos ajustes é impossível conseguir precisão absoluta nas dimensões das peças ao confeccioná-las, em razão de certas inexatidões das máquinas, dos dispositivos ou instrumentos de medição. Como consequência dessas circunstâncias, é impossível obter dimensões absolutamente precisas que coincidam com as indicadas no desenho. As peças são, portanto, confeccionadas com dimensões que se afastam para mais ou para menos em relação a um valor nominal ou um valor de referência. Pode-se observar essa variação da dimensão nominal na Figura 1.1, na qual o parafuso 1 apresenta as dimensões nominais e os parafusos 2 e 3 são exemplos de parafusos obtidos no processo produtivo, mas que ainda se encontram utilizáveis por terem uma variação de comprimento admissível.

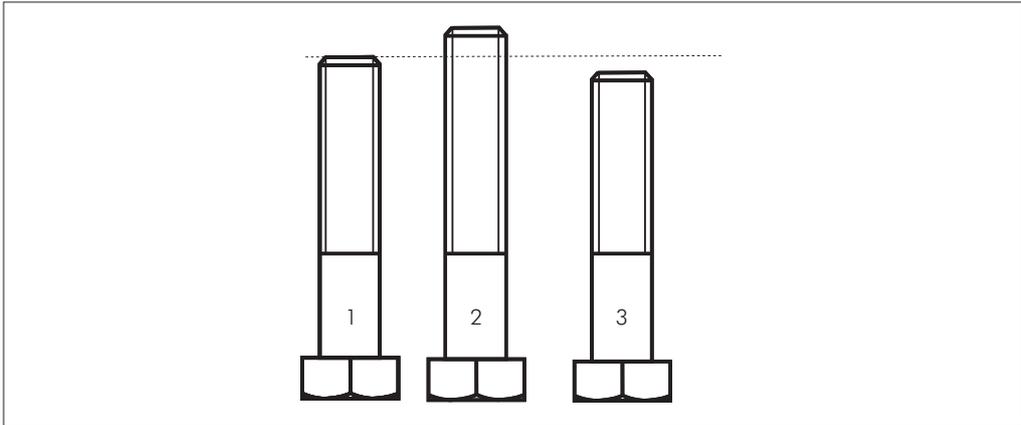


Figura 1.1: Exemplos de parafusos sextavados de uma linha de produção.

A *intercambiabilidade* está presente no cotidiano como: uma lâmpada que é encaixada no bocal, no rosqueamento de uma porca em um parafuso, ao se conectar um armazenador portátil de dados (“pen drive”) em um computador etc. Em tais situações, não há necessidade de ajustes adicionais para que os componentes se encaixem.

As dimensões reais de duas peças, inclusive as laboradas com um mesmo procedimento têm poucas possibilidades de serem exatamente iguais, variando dentro de certos limites. Em vista disso, a conjugação requerida de duas peças se assegura somente no caso em que as *dimensões limites* de tolerância das peças tenham sido estabelecidas de antemão. Desse modo, as *dimensões limites* são aquelas dentro das quais oscilam as reais. Uma delas se chama *dimensão limite máxima* e a outra *dimensão limite mínima*. Portanto, peças intercambiáveis são aquelas fabricadas com um grau de precisão previamente estabelecido em suas *dimensões limites*, de forma que peças fabricadas em lugares diferentes possam ser encaixadas sem nenhum ajuste adicional.

O limite de inexatidão admissível na fabricação da peça é determinado por sua *tolerância*, ou seja, pela diferença entre as *dimensões limites máxima* e *mínima*. Por exemplo, supondo que uma determinada dimensão nominal seja de 40,000 mm; a *dimensão limite máxima* seja 40,039 mm e a *dimensão limite mínima* seja 40,000 mm; então a *tolerância* de inexatidão será igual a 0,039 mm. Todas as peças cujas dimensões não ultrapassarem as *dimensões limites* serão úteis, ao passo que as demais serão defeituosas.

Entende-se por *ajuste* o modo de se conjugar duas peças introduzindo-se uma na outra, ou seja, o modo de assegurar a tal ou qual grau as peças são unidas firmemente, ou a liberdade de seu deslocamento relativo.

1.2 EVOLUÇÃO DAS TOLERÂNCIAS

O valor da *tolerância* dimensional tem diminuído ao longo do tempo de maneira constante e acentuada e a tendência é que se torne cada vez menor. Isso se deve ao fato de que a evolução tecnológica prevê peças com menor massa, menos ruídos nos conjuntos, mais controle das emissões etc.

Alia-se a isso o desenvolvimento acentuado das máquinas e das ferramentas utilizadas na produção. *Tolerâncias dimensionais* obtidas anteriormente por processos de fabricação finais (normalmente utilizando ferramentas com geometria não definida, como o rebolo, em processos de retificação) são conseguidos por processos mais flexíveis e com ferramentas mais simples, que possuem geometria definida, como por exemplo, ferramentas de barra. Para a determinação dos valores das tolerâncias a serem colocadas nas peças individuais, há necessidade, a partir do conjunto, de conhecer a função que desempenharão dentro do conjunto. Nesse sentido, sempre se parte do desenho de conjunto para, posteriormente, tolerar as peças individuais.

1.3 TERMINOLOGIA BÁSICA

No processo de fabricação de uma peça, é necessário quantificar as grandezas dimensionais a fim de obter peças com dimensões dentro das especificações de projeto; essas peças para fins de tolerâncias e ajustes serão classificadas em Eixo e Furo. A parte em observação de uma peça será chamada *elemento* (no Capítulo 7 será introduzida uma diferença entre *elemento* e *elemento dimensional*. Por ora será utilizado o termo genérico *elemento*).

FURO: O conceito de furo, para fins de *tolerância* e ajuste, refere-se a todo *elemento* (incluindo *elementos* não cilíndricos) destinado a alojar uma característica externa de outra peça (Figura 1.2), indicado sempre com letras maiúsculas.

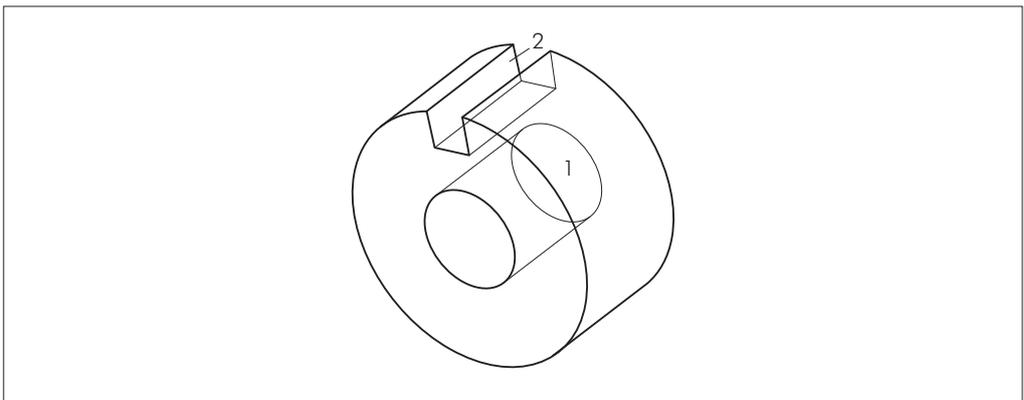


Figura 1.2: Representação de furos (elementos 1 e 2).

EIXO: O conceito de eixo para fins de tolerâncias e ajustes se refere ao *elemento* (incluindo também *elementos* não cilíndricos) destinado a acoplar-se em uma característica interna de outra peça (Figura 1.3), indicado sempre com letras minúsculas.

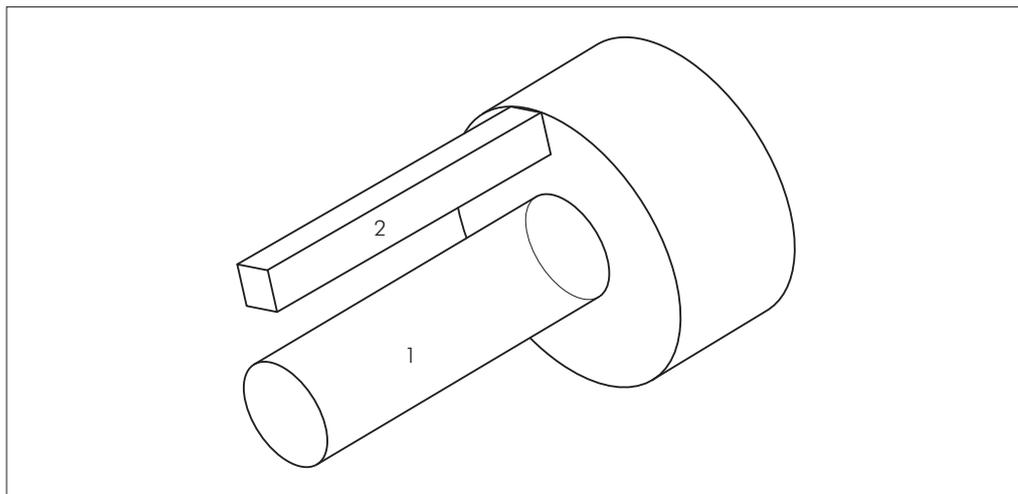


Figura 1.3: Representação de eixos (elementos 1 e 2).

Quando o eixo acoplar-se a um furo, esse acoplamento será caracterizado por um ajuste que poderá ser com folga ou interferência (Figura 1.4).

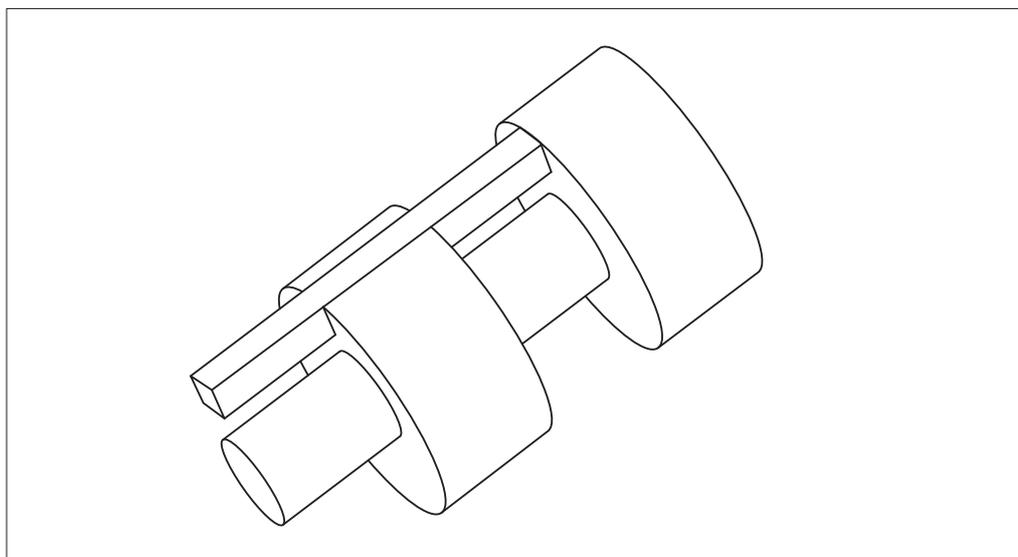


Figura 1.4: Ajuste das peças em uma montagem.

1.3.1 Exemplo

1) Um eixo é acoplado a um motor por meio de uma polia. Quando o motor é acionado deseja-se transmitir o torque do motor ao eixo. No conjunto entre eixo e polia, para que o torque seja transmitido da polia para o eixo, tem-se a chaveta. Identificar neste acoplamento, os eixos e os furos (Figura 1.5).

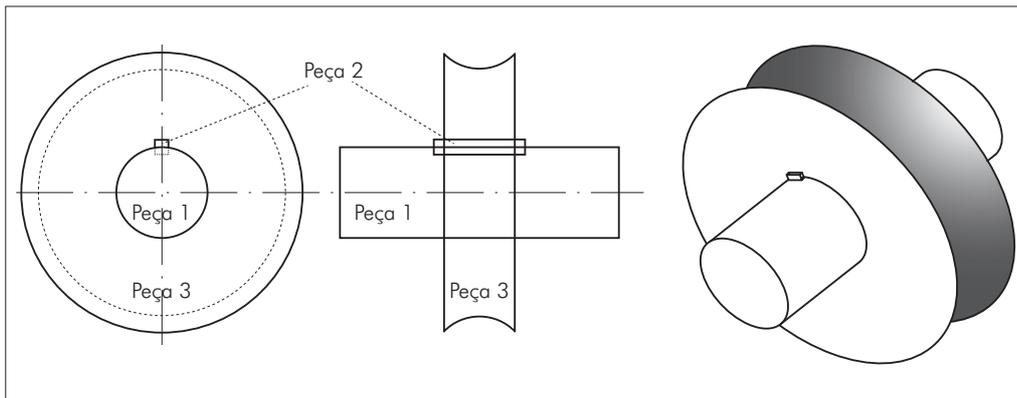


Figura 1.5: Acoplamento polia – eixo.

Resolução:

- No acoplamento entre a peça 1 e a peça 3:
A peça 1 é o eixo e a peça 3 é o furo.
- No acoplamento entre a peça 1 e a peça 2:
A peça 2 se encaixa na peça 1, portanto, a peça 2 é o eixo; a peça 1 recebe o encaixe, logo, é o furo.
- No acoplamento entre a peça 3 e a peça 2:
A peça 2 se encaixa na peça 3, portanto a peça 2 é o eixo e a peça 3 é o furo.

1.4 TERMINOLOGIA DE TOLERÂNCIA

DIMENSÃO NOMINAL: É uma dimensão teórica que pode ser indicada no desenho.

A partir desta dimensão são calculadas as *dimensões limites* pela aplicação dos afastamentos superior e inferior. Essa dimensão serve de base para as *dimensões limites* (Figura 1.6).

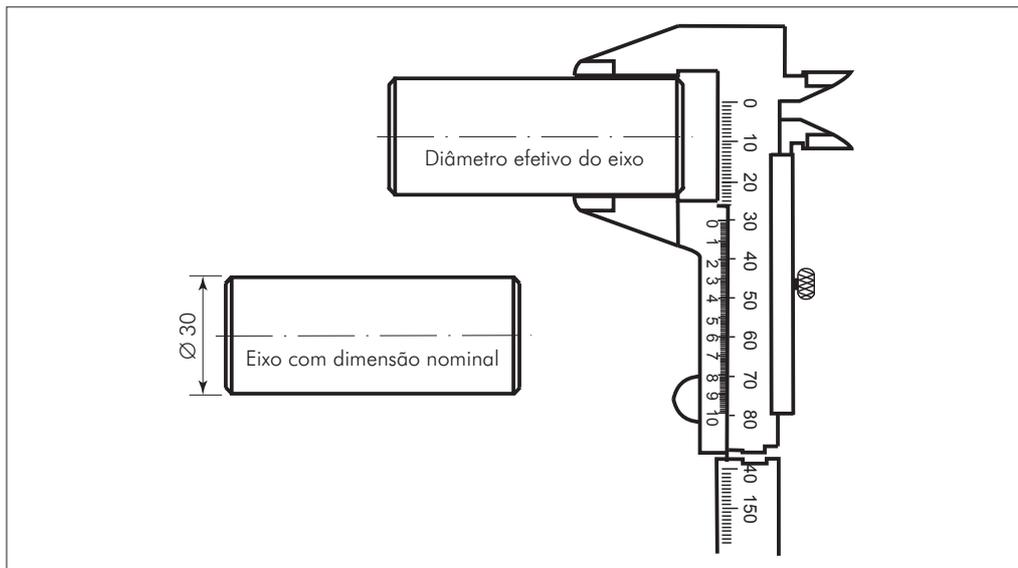


Figura 1.6: Dimensões nominal e efetiva de um eixo.

DIMENSÃO EFETIVA: Após as operações de fabricação, as peças serão submetidas a uma operação instrumentada, ou seja, por meio de um sistema de medição será quantificado o *elemento* em observação.

A dimensão que se obtém medindo a parte em observação da peça, ou seja, medindo um *elemento* é a *dimensão efetiva*. Na Figura 1.6 a dimensão nominal é 30 mm e a *dimensão efetiva* (medida) é de 30,02 mm.

DIMENSÕES LIMITES: Por meio da operação instrumentada determina-se a *dimensão efetiva* e esta definirá se o valor obtido fará a peça ser aprovada. Assim, é necessário conhecer as dimensões extremas permissíveis para o *elemento* em observação, ou seja, os valores máximo e mínimo admissíveis para a *dimensão efetiva*; estes são chamados *dimensões limites*.

DIMENSÃO MÁXIMA: É o valor máximo admissível para a *dimensão efetiva*, ou seja, a maior dimensão admissível para um *elemento* (Figura 1.7).

Simbologia: $D_{\text{máx}}$ para furos e $d_{\text{máx}}$ para eixos.

DIMENSÃO MÍNIMA: É o valor mínimo admissível para a *dimensão efetiva*, ou seja, a menor dimensão admissível para um *elemento* (Figura 1.7).

Simbologia: $D_{\text{mín}}$ para furos e $d_{\text{mín}}$ para eixos.

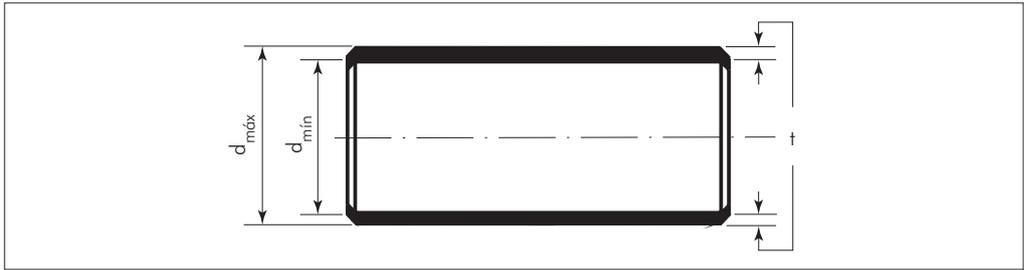


Figura 1.7: Ilustração das *dimensões máxima e mínima e tolerância t*.

AFASTAMENTO: É a diferença algébrica entre as *dimensões limites* e a dimensão nominal (quando indicada).

Como os afastamentos são a diferença entre as *dimensões limites* e a dimensão nominal, então, se tem dois afastamentos: o superior e o inferior.

- **AFASTAMENTO SUPERIOR:** O afastamento superior é determinado pela diferença algébrica entre a dimensão máxima e a correspondente dimensão nominal.

Simbologia: A_s para furos e a_s para eixos.

Obs.: a norma brasileira adota a simbologia E para os afastamentos, no caso E_s e e_s . Neste livro optou-se por manter as iniciais em português.

Assim, tem-se:

$$A_s = D_{máx} - D_{furos} \text{ (furos) ou } a_s = d_{máx} - d_{eixos} \text{ (eixos)} \quad (1.1)$$

- **AFASTAMENTO INFERIOR:** O afastamento inferior é determinado pela diferença algébrica entre a dimensão mínima e a correspondente dimensão nominal.

Simbologia: A_i para furos e a_i para eixos.

Assim, tem-se:

$$A_i = D_{mín} - D_{furos} \text{ (furos) ou } a_i = d_{mín} - d_{eixos} \text{ (eixos)} \quad (1.2)$$

TOLERÂNCIA: É a variação permissível de um *elemento*, dada pela diferença entre a dimensão máxima e dimensão mínima ou entre o afastamento superior e o afastamento inferior, indicada pelo símbolo t (Figura 1.7).

$$t = D_{m\acute{a}x} - D_{m\acute{i}n} \text{ (furos)} \quad \text{ou} \quad t = d_{m\acute{a}x} - d_{m\acute{i}n} \text{ (eixos)} \quad (1.3)$$

$$t = A_s - A_i \text{ (furos)} \quad \text{ou} \quad t = a_s - a_i \text{ (eixos)} \quad (1.4)$$

onde:

t : tolerância (mm);

$D_{m\acute{a}x}$: dimensão máxima do furo (mm);

$D_{m\acute{i}n}$: dimensão mínima do furo (mm);

$d_{m\acute{a}x}$: dimensão máxima do eixo (mm);

$d_{m\acute{i}n}$: dimensão mínima do eixo (mm);

A_s : afastamento superior do furo (mm);

A_i : afastamento inferior do furo (mm);

a_s : afastamento superior do eixo (mm);

a_i : afastamento inferior do eixo (mm).

LINHA ZERO: Em uma representação gráfica de tolerâncias e ajustes, a linha zero indica a dimensão nominal (quando existente) e serve de origem aos afastamentos. Assim, todos os afastamentos (superior e inferior) situados acima da linha zero serão positivos, ao passo que os afastamentos situados abaixo da linha zero serão negativos (Figura 1.8).

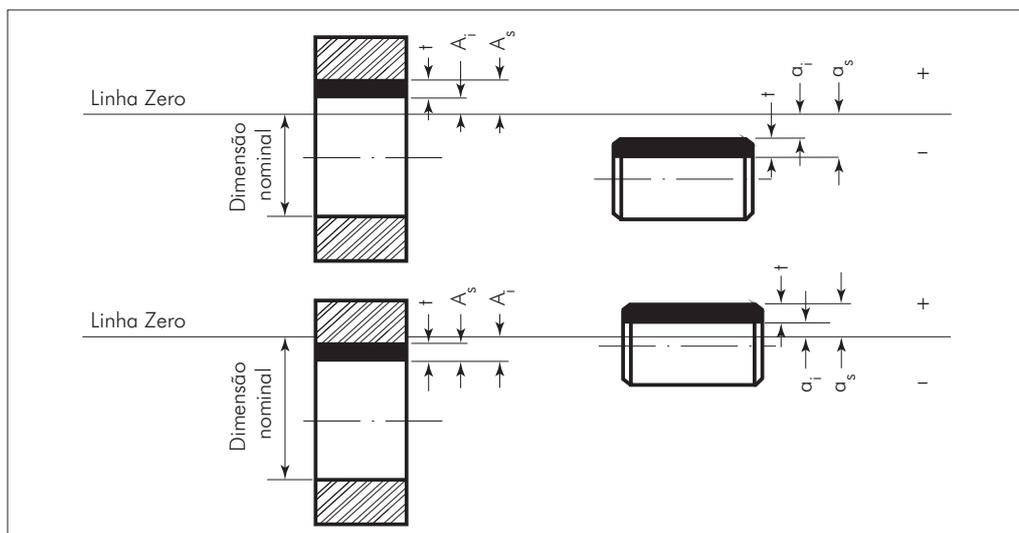


Figura 1.8: Ilustração da linha zero, afastamentos superior e inferior e tolerância.

Como exemplo, em uma dimensão $D = 40$ G7 (furo), os valores indicados para os afastamentos superior e inferior são $+0,034$ mm e $+0,009$ mm. Nesse caso, a linha de referência (linha zero) passará exatamente pela cota $40,000$ mm,

sendo que ambos os valores dos afastamentos estarão acima dessa linha, ou seja, a *dimensão efetiva* deste furo deve estar compreendida entre 40,034 mm e 40,009 mm, sendo que todas as peças com dimensões fora desse intervalo, deverão ser refugadas. Por meio deste exemplo, nota-se que:

$$D_{m\acute{a}x} = D + A_s \text{ (para furos)} \quad \text{e} \quad d_{m\acute{a}x} = d + a_s \text{ (para eixos)} \quad (1.5)$$

$$D_{m\grave{i}n} = D + A_i \text{ (para furos)} \quad \text{e} \quad d_{m\grave{i}n} = d + a_i \text{ (para eixos)} \quad (1.6)$$

1.4.1 Exemplos

- 1) Um eixo tem dimensão nominal $\varnothing = 30$ mm e afastamentos superior e inferior respectivamente +0,036 mm e +0,015 mm.
 - a) Determinar as *dimensões limites*.
 - b) Determinar a *tolerância*.
 - c) Representar em um esquema a linha zero, as *dimensões limites*, os afastamentos e as *tolerâncias*.

Resolução:

- a) Para se determinar as *dimensões máxima e mínima*, utiliza-se as expressões (1.5) e (1.6):

$$d_{m\acute{a}x} = d + a_s; \quad d_{m\acute{a}x} = 30,000 + 0,036 = 30,036 \text{ mm}$$

$$d_{m\grave{i}n} = d + a_i; \quad d_{m\grave{i}n} = 30,000 + 0,015 = 30,015 \text{ mm}$$

- b) Para o cálculo da *tolerância*, no caso de eixos, usa-se a expressão (1.4):

$$t = a_s - a_i$$

$$t = 0,036 - 0,015 = 0,021 \text{ mm}$$

- c) A Figura 1.9 mostra o esquema dos valores obtidos.

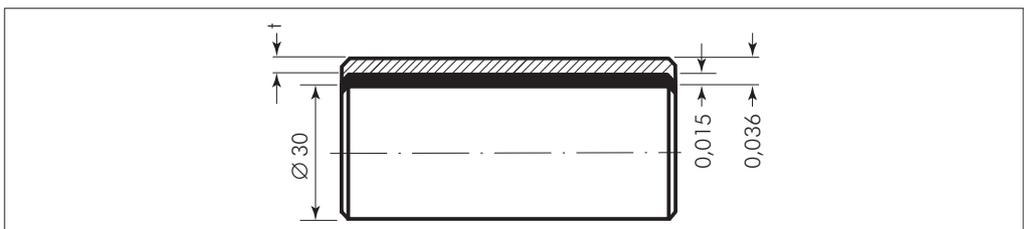


Figura 1.9: Representação do eixo com os afastamentos superior e inferior.

- 2) Um eixo tem a dimensão $\varnothing = 30$ mm e afastamentos superior e inferior respectivamente $+0,013$ mm e $-0,008$ mm. Calcular a *tolerância* t e as *dimensões máxima e mínima*.

Resolução:

Nesse caso, tendo em vista o valor negativo do afastamento inferior ($-0,008$ mm), este estará abaixo da linha zero, sendo que o afastamento superior estará acima da linha zero (Figura 1.10).

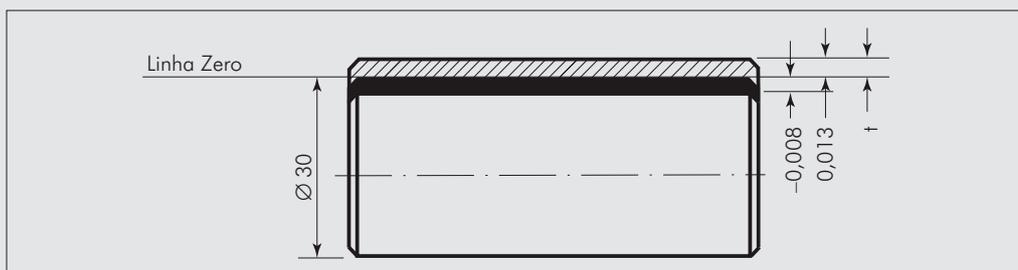


Figura 1.10: Representação do eixo com os afastamentos superior e inferior e *tolerância* t .

A expressão (1.4) apresenta, para t , no caso de eixos:

$$t = a_s - a_i$$

$$t = 0,013 - (-0,008) = 0,021 \mu\text{m}$$

A *dimensão máxima* pode ser calculada com o auxílio da expressão (1.5) (para eixos):

$$d_{\text{máx}} = d + a_s; d_{\text{máx}} = 30,000 + 0,013 = 30,013 \text{ mm}$$

A *dimensão mínima* pode ser calculada com o auxílio da expressão (1.6) (para eixos):

$$d_{\text{mín}} = d + a_i; d_{\text{mín}} = 30,000 + (-0,008) = 29,992 \text{ mm}$$

1.5 TERMINOLOGIA DE AJUSTES

EIXO-BASE: É aquele cujo afastamento superior é igual à zero, ou seja, é o eixo cuja *dimensão máxima* é igual à dimensão nominal (Figura 1.11).

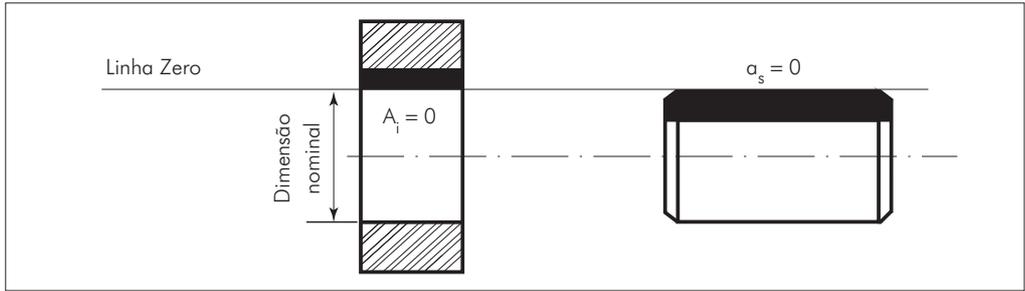


Figura 1.11: Furo-base e eixo-base.

FURO-BASE: É aquele cujo afastamento inferior é igual à zero, ou seja, é o furo cuja *dimensão mínima* é igual à dimensão nominal (Figura 1.11).

AFASTAMENTO FUNDAMENTAL: É o afastamento que define a posição do campo de *tolerância* em relação à linha zero, podendo ser o superior ou o inferior, mas por convenção, é aquele mais próximo da linha zero. Os afastamentos fundamentais dos eixos são calculados por fórmulas e os afastamentos fundamentais dos furos podem ser obtidos a partir dos afastamentos calculados dos eixos. Estas fórmulas são empíricas e encontram-se na norma NBR 6158 (1995). A Figura 1.12 mostra um exemplo de afastamento fundamental para um furo.

FOLGA: É a diferença positiva, em um acoplamento eixo-furo, entre as dimensões do furo e do eixo, quando a dimensão do eixo em seus limites for menor que a dimensão do furo em seus limites. Indicada pelo símbolo F (Figura 1.13).

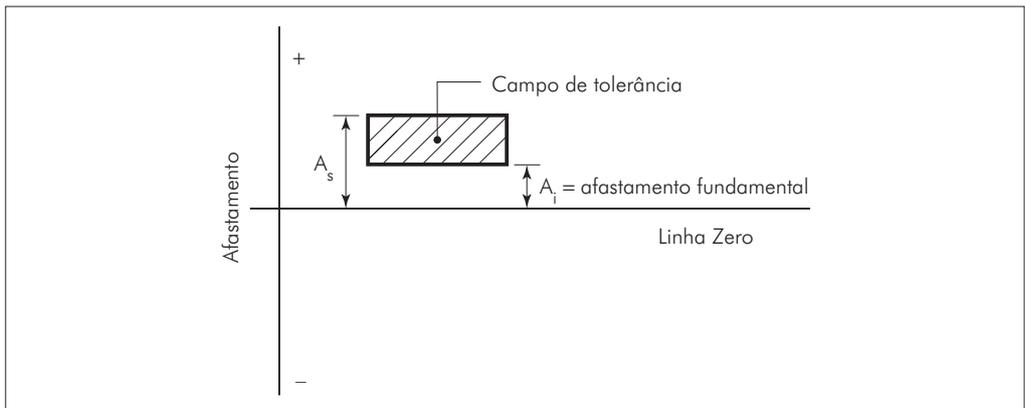


Figura 1.12: Exemplo de afastamento fundamental para furos.

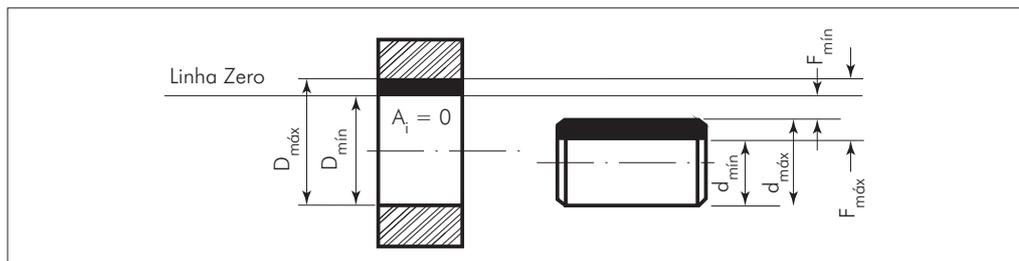


Figura 1.13: Representação de folga com as respectivas folgas máxima e mínima.

- **FOLGA MÁXIMA:** É a diferença positiva, entre a dimensão máxima do furo e a dimensão mínima do eixo, quando o eixo em seu limite mínimo, for menor que o furo em seu limite máximo. Indicada pelo símbolo F_{\max} .

$$F_{\max} = D_{\max} - d_{\min} \quad (1.7)$$

onde:

F_{\max} : folga máxima (mm);

D_{\max} : dimensão máxima do furo (mm);

d_{\min} : dimensão mínima do eixo (mm).

Sabendo-se, da expressão (1.1) (para furos), que:

$$A_s = D_{\max} - D, \text{ tem-se,}$$

$$D_{\max} = A_s + D \quad (1.8)$$

Da expressão (1.2) (para eixos), tem-se:

$$a_i = d_{\min} - d, \text{ e:}$$

$$d_{\min} = a_i + d \quad (1.9)$$

Substituindo-se as expressões (1.8) e (1.9) em (1.7), tem-se:

$$F_{\max} = (A_s + D) - (a_i + d) \quad (1.10)$$

Uma vez que em um ajuste $D = d$ (as dimensões nominais do furo e eixo têm que ser iguais), obtém-se:

$$F_{\max} = A_s - a_i \quad (1.11)$$

- **FOLGA MÍNIMA:** É a diferença positiva, entre a dimensão mínima do furo e a dimensão máxima do eixo, quando o eixo em seu limite máximo, for menor que o furo em seu limite mínimo. Indicada pelo símbolo F_{\min} .

$$F_{\min} = D_{\min} - d_{\max} \quad (1.12)$$

onde:

F_{\min} : folga mínima (mm);

D_{\min} : dimensão mínima do furo (mm);

d_{\max} : dimensão máxima do eixo (mm).

Sabendo-se, da expressão (1.2) (para furos), que:

$$A_i = D_{\min} - D, \text{ tem-se:}$$

$$D_{\min} = A_i + D \quad (1.13)$$

Da expressão (1.1) (para eixos), tem-se:

$$a_s = d_{\max} - d, \text{ assim:}$$

$$d_{\max} = a_s + d \quad (1.14)$$

Substituindo-se as expressões (1.13) e (1.14) em (1.12), tem-se:

$$F_{\min} = (A_i + D) - (a_s + d)$$

Uma vez que em um ajuste $D = d$, obtém-se:

$$F_{\min} = A_i - a_s \quad (1.15)$$

INTERFERÊNCIA: É a diferença negativa, em um acoplamento eixo-furo, entre as dimensões do furo e do eixo, quando a dimensão do eixo em seus limites for maior que a dimensão do furo em seus limites. Indicada pelo símbolo I (Figura 1.14).

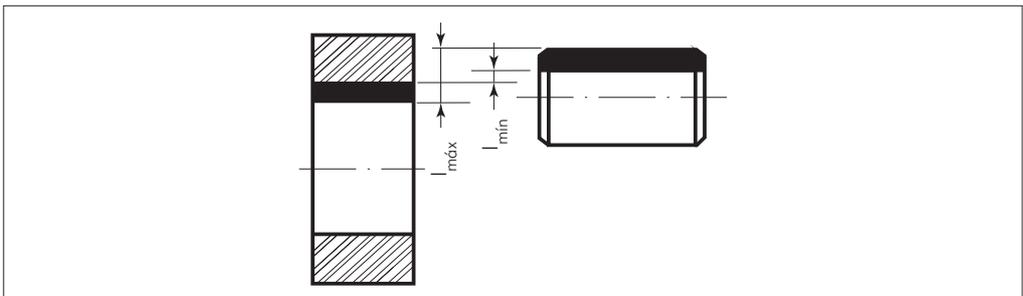


Figura 1.14: Representação de interferência com as respectivas interferências máxima e mínima.

- **INTERFERÊNCIA MÁXIMA:** É a diferença negativa, entre a dimensão mínima do furo e a dimensão máxima do eixo, quando o eixo em seu limite máximo for maior que o furo em seu limite mínimo. Indicada pelo símbolo $I_{máx}$.

$$I_{máx} = D_{mín} - d_{máx} \quad (1.16)$$

onde:

$I_{máx}$: interferência máxima (mm);

$D_{mín}$: dimensão mínima do furo (mm);

$d_{máx}$: dimensão máxima do eixo (mm).

Substituindo-se as expressões (1.13) e (1.14) em (1.16), obtém-se:

$$I_{máx} = (A_i + D) - (a_s + d) \quad (1.17)$$

Como $D = d$, tem-se:

$$I_{máx} = A_i - a_s \text{ (os resultados são valores negativos)} \quad (1.18)$$

Ou seja, a $I_{máx} = -F_{mín}$.

- **INTERFERÊNCIA MÍNIMA:** É a diferença negativa, entre a dimensão máxima do furo e a dimensão mínima do eixo, quando o eixo em seu limite mínimo for maior que o furo em seu limite máximo. Indicada pelo símbolo $I_{mín}$.

$$I_{mín} = D_{máx} - d_{mín} \quad (1.19)$$

onde:

$I_{máx}$: Interferência mínima (mm);

$D_{máx}$: Dimensão máxima do furo (mm);

$d_{mín}$: Dimensão mínima do eixo (mm).

Substituindo-se as expressões (1.8) e (1.9) em (1.19), obtém-se:

$$I_{mín} = (A_s + D) - (a_i + d) \quad (1.20)$$

Como $D = d$, tem-se:

$$I_{mín} = A_s - a_i \text{ (os resultados são valores negativos)} \quad (1.21)$$

Ou seja, a $I_{mín} = -F_{máx}$.

AJUSTE: Ajuste é o comportamento entre dois *elementos* (eixo e furo) a serem acoplados, ambos com a mesma dimensão nominal, ou seja, é a relação resultante da diferença, antes da montagem, entre as dimensões dos dois *elementos* a serem montados. O ajuste será caracterizado pela folga ou interferência apresentada no acoplamento entre os *elementos*.

- **AJUSTE COM FOLGA:** É aquele em que o afastamento superior do eixo é menor ou igual ao afastamento inferior do furo. Neste ajuste, sempre ocorrerá uma folga entre o furo e o eixo quando montados, ou seja, a dimensão máxima do eixo é sempre menor ou em caso extremo igual à dimensão mínima do furo. Há de se notar que por convenção, nos casos em que a folga mínima for zero, o ajuste é chamado ajuste com folga. Assim, o ajuste será com folga sempre que:

$$d_{\max} \leq D_{\min} \quad \text{ou} \quad a_s \leq A_i$$

Neste ajuste, quando um eixo acoplar-se a um furo, será caracterizado por apresentar uma folga máxima e uma folga mínima (Figura 1.13).

- **AJUSTE COM INTERFERÊNCIA:** É aquele em que o afastamento superior do furo é menor que o afastamento inferior do eixo. Neste ajuste ocorrerá uma interferência entre o furo e o eixo quando montados, ou seja, a dimensão máxima do furo é sempre menor que a dimensão mínima do eixo (Figura 1.14). Este ajuste se caracteriza por apresentar interferências máxima mínima, ou seja, o ajuste será com interferência sempre que:

$$d_{\min} > D_{\max} \quad \text{ou} \quad a_i > A_s$$

- **AJUSTE INCERTO:** É aquele no qual o afastamento superior do eixo (a_s) é maior que o afastamento inferior do furo (A_i) e o afastamento superior do furo (A_s) é maior ou igual ao afastamento inferior do eixo (a_i). Neste ajuste pode ocorrer uma folga ou uma interferência entre o furo e o eixo quando montados, ou seja, a dimensão máxima do eixo (d_{\max}) é maior que a dimensão mínima do furo (D_{\min}) – interferência; e a dimensão máxima do furo (D_{\max}) é maior ou igual à dimensão mínima do eixo (d_{\min}) – folga. (Figura 1.15). Portanto, o ajuste será incerto sempre que:

$$d_{\max} > D_{\min} \quad \text{ou} \quad a_s > A_i \quad \text{e}$$

(interferência)

$$d_{\min} \leq D_{\max} \quad \text{ou} \quad a_i \leq A_s$$

(folga)

Nos ajustes incertos determinam-se as folgas e interferências máximas.

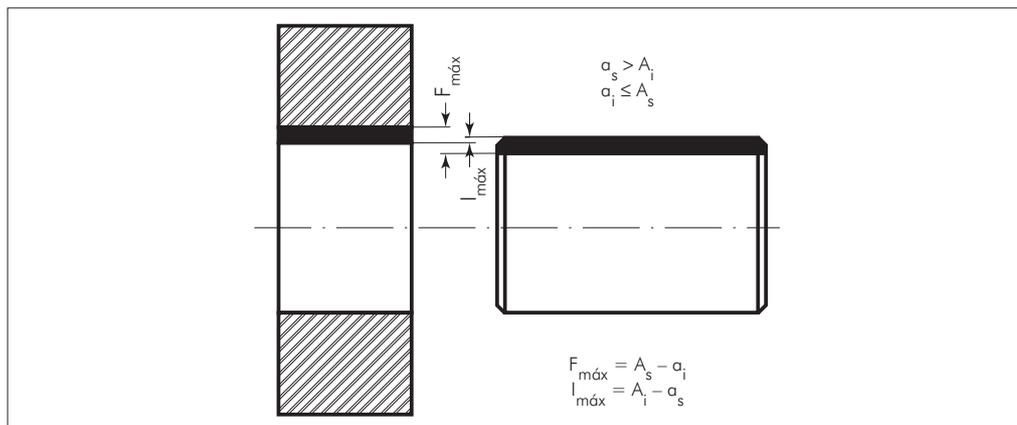


Figura 1.15: Ajuste incerto, em que, dependendo das dimensões efetivas das peças se terá um ajuste com folga ou interferência.

TOLERÂNCIA-PADRÃO (IT): A *tolerância-padrão* é a *tolerância* calculada para cada grau de *tolerância-padrão* e cada grupo de dimensões em função do fator de *tolerância-padrão* i ou I . A simbologia IT vem de I de ISO e T de Tolerance.

GRAU DE TOLERÂNCIA-PADRÃO (IT): Trata-se de um grupo de tolerância correspondente ao mesmo nível de precisão para todas as dimensões nominais. Os graus de *tolerância-padrão* são designados pelas letras IT e por um número (por exemplo, $IT7$), mas quando associados a um campo de *tolerância*, representado por letra, as letras IT são omitidas (exemplo $h7$)

CAMPO DE TOLERÂNCIA: É o conjunto de valores compreendidos entre os afastamentos superior e inferior. A *tolerância* é medida em milímetro (mm) ou micrômetro (μm). A relação entre mm e μm é:

$$1 \text{ mm} = 1000 \mu\text{m}$$

CLASSE DE TOLERÂNCIA: Classe de *tolerância* é uma combinação de letras e números que representam respectivamente os afastamentos fundamentais e os graus de *tolerância-padrão*. Exemplos: H7 (para furos) e h7 (para eixos).

FATOR DE TOLERÂNCIA-PADRÃO (i, I): O fator de *tolerância-padrão* é um valor numérico calculado em função da dimensão nominal e que serve de base ao desenvolvimento da *tolerância-padrão* do sistema. O fator de *tolerância-padrão* será indicado por i , quando aplicado para dimensão nominal menor que 500 mm e indicado por I , quando aplicado à dimensão nominal maior que 500 mm.

VARIAÇÃO DE UM AJUSTE: A variação de um ajuste é definida como sendo a soma aritmética das tolerâncias dos dois *elementos*, ou seja,

$$t_{aj} = t_{eixo} + t_{furo} \quad (1.22)$$

SISTEMA DE TOLERÂNCIAS: Conjunto de princípios, regras, fórmulas e tabelas que permitem a escolha racional de tolerâncias para produção de peças intercambiáveis.

SISTEMA DE AJUSTES: Sistema compreendendo eixos e furos pertencentes a um sistema de tolerâncias.

