

Capítulo 1

CONTROLE GEOMÉTRICO

O controle geométrico trata basicamente dos procedimentos de determinação de dimensões, forma e posição de elementos sólidos. Para isto deve-se considerar o comportamento metrológico do sistema de medição e a condição do objeto a medir.

Deve-se ter em mente que na fabricação de uma peça não se consegue obter a forma geométrica perfeita, assim ao usinar um cilindro tem-se erros de circularidade na seção transversal. Se este cilindro foi usinado em um torno comum, um torno de precisão ou uma retífica, naturalmente e de se esperar que os erros de circularidade sejam, respectivamente, de valor decrescente. Quanto mais sofisticado o processo de fabricação, menor será o valor da tolerância de fabricação estipulada para a geometria em questão.

Desse modo, para garantir que os desvios de fabricação não prejudiquem a montagem e o funcionamento perfeito das peças, o controle geométrico passa a ser necessário e é realizado através de especificações de tolerâncias geométricas.

1.1 TOLERÂNCIA GEOMÉTRICA

Os desvios geométricos permissíveis para a peça são previamente indicados, aplicando-se tolerâncias geométricas que são os limites dentro dos quais as dimensões e formas geométricas possam variar sem que haja comprometimento do funcionamento e intercambiabilidade das peças.

Tais desvios podem ser macrogeométricos, sendo *desvios macroscópicos* como retilidade, planeza, dimensões nominais e *desvios microgeométricos*, sendo desvios superficiais microscópicos como rugosidade e aspereza.

A figura 1.1 ilustra os tipos de tolerâncias que compõem as tolerâncias geométricas.

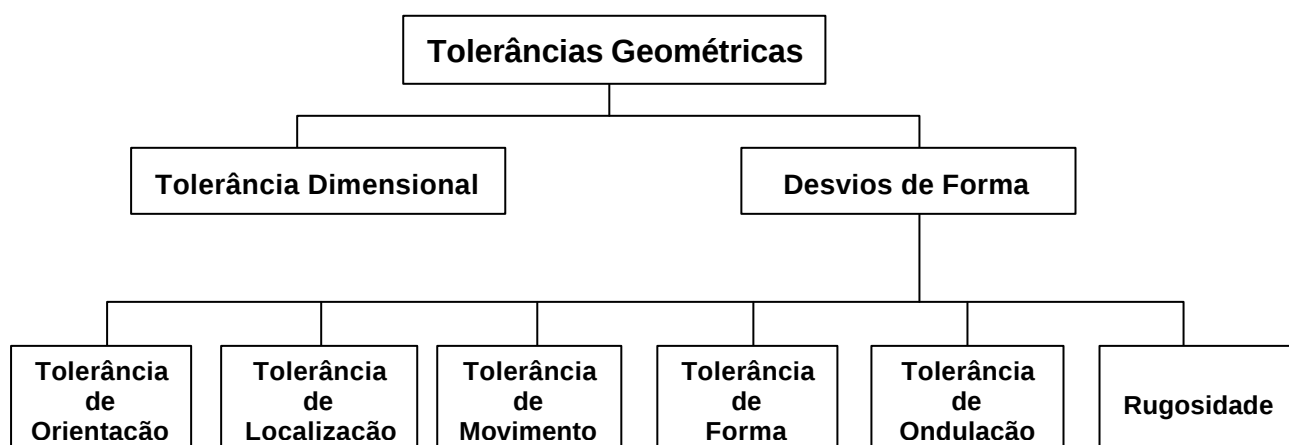


Figura 1.1 – Quadro geral das Tolerâncias Geométricas.

1.1.1 Tolerâncias Dimensionais (Tolerâncias de Fabricação)

Os limites de erros (tolerâncias dimensionais) que uma peça pode apresentar em sua geometria, são estabelecidos pelo projetista da mesma, em função da aplicação prevista para a peça.

A determinação destas tolerâncias é um problema de projeto mecânico e não será abordado neste curso. Esta determinação exige grande experiência e/ou o conhecimento de procedimentos normalizados.

Existem sistemas de tolerância e ajustes normalizados para os elementos geométricos rotineiramente utilizados, como: elementos unidimensionais (eixo/furo, cones, parafuso/roscas, engrenagens, etc).

A seguir, serão apresentados alguns conceitos sobre as tolerâncias dimensionais do sistema eixo/furo:

- *Dimensão nominal* (D ou d): dimensão teórica indicada no desenho ou projeto.
- *Dimensão efetiva* (D_e ou d_e): dimensão real da peça obtida através de instrumentos de medição.
- *Linha zero* (L_z): nos desenhos de peças que se faz necessária a indicação dos limites permissíveis para a dimensão efetiva, indica-se linha zero, que é uma linha tracejada, colocada exatamente na posição correspondente à dimensão nominal.
- *Dimensão máxima* ($D_{\max}$ ou $d_{\max}$): dimensão máxima permitida para a dimensão efetiva sem que a peça seja rejeitada.
- *Dimensão mínima* ($D_{\min}$ ou $d_{\min}$): dimensão mínima permitida para a dimensão efetiva sem que a peça seja rejeitada.
- *Afastamento superior* (A_s ou a_s): diferença entre a dimensão máxima e a dimensão nominal.

$$A_s = D_{\max} - D \quad (\text{para furos}) \quad \text{e} \quad a_s = d_{\max} - d \quad (\text{para eixos})$$

- *Afastamento inferior* (A_i ou a_i): diferença entre a dimensão mínima e a dimensão nominal.

$$A_i = D_{\min} - D \quad (\text{para furos}) \quad \text{e} \quad a_i = d_{\min} - d \quad (\text{para eixos})$$

- *tolerância dimensional* (t): variação permissível da dimensão, podendo ser dada pela diferença entre as dimensões máxima e mínima ou pela diferença entre os afastamentos superior e inferior.

$$t = d_{\max} - d_{\min} \quad \text{ou} \quad t = D_{\max} - D_{\min}$$

$$t = a_s - a_i \quad \text{ou} \quad t = A_s - A_i$$

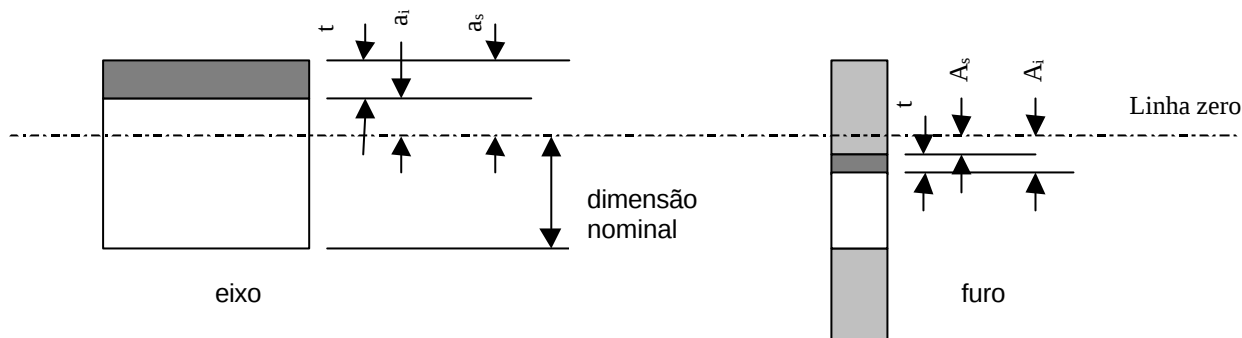


Figura 1.2 – Esquema dos afastamentos superiores e inferiores (eixos e furos).

Os afastamentos superiores e inferiores podem ser positivos ou negativos. Quando a dimensão máxima ou mínima está acima da linha zero, o afastamento correspondente é positivo; caso a dimensão máxima ou mínima esteja abaixo da linha zero, o afastamento é negativo.

O sistema de tolerâncias e ajustes para eixo/furo, por exemplo, prevê 18 níveis de qualidade. Escolhido o nível de qualidade a ser adotado na fabricação de um elemento da peça, a tolerância dimensional pode ser obtida pelo quadro da Tabela 1.1, em função do grupo de dimensão em que se enquadra.

Exemplo: Um eixo de 48 mm de diâmetro, qualidade 7, terá uma tolerância de fabricação de 25 μm .

A posição do campo de tolerância em relação a dimensão nominal (para mais, para menos, distribuído em relação ao mesmo ou outro) é um problema de ajuste, isto é, diz respeito ao tipo de encaixe que deverá ser assegurado.

O posicionamento do campo de tolerância para os diferentes ajustes, pode ser obtido a partir da tabela da Tabela 1.2.

Exemplos: 1) O eixo com ajuste 48 g7, terá como limites de dimensão:

48,000 - 0,009 mm
 - 0,034 mm, isto é,
 diâmetro mínimo: 47,966 mm
 diâmetro máximo: 47,991 mm

2) Eixo com ajuste 48 p7:

48,000 + 0,051 mm
 + 0,026 mm, isto é,
 diâmetro mínimo: 48,051 mm
 diâmetro máximo: 48,026 mm

Grupos de dimensões	Qualidade IT (mm)																	
mm	01	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
³ 1	0.3	0.5	0.8	1.2	2.0	3	4	6	10	14	25	40	60					
> 1 £ 3	0.3	0.5	0.8	1.2	2.0	3	4	6	10	14	25	40	60	100	140	250	400	600
> 3 £ 6	0.4	0.6	1.0	1.5	2.5	4	5	8	12	18	30	48	75	120	180	300	480	750
> 6 £ 10	0.4	0.6	1.0	1.5	2.5	4	6	9	15	22	36	58	90	150	220	360	580	900
> 10 £ 18	0.5	0.8	1.2	2.0	3.0	5	8	11	18	27	43	70	110	180	270	430	700	1100
> 18 £ 30	0.6	1.0	1.5	2.5	4	6	9	13	21	33	52	84	130	210	330	520	840	1300
> 30 £ 50	0.6	1.0	1.5	2.5	4	7	11	16	25	39	62	100	160	250	390	620	1000	1600
> 50 £ 80	0.8	1.2	2.0	3	5	8	13	19	30	46	74	120	190	300	460	740	1200	1900
> 80 £ 120	1.0	1.5	2.5	4	6	10	15	22	35	54	87	140	220	350	540	870	1400	2200
> 120 £ 180	1.2	2.0	3.5	5	8	12	18	25	40	63	100	160	250	400	630	1000	1600	2500
> 180 £ 250	2.0	3.0	4.5	7	10	14	20	29	46	72	115	185	290	460	720	1150	1850	2700
> 250 £ 315	2.5	4	6	8	12	16	23	32	52	81	130	210	320	520	810	1300	2100	3200
> 315 £ 400	3	5	7	9	13	18	25	36	57	89	140	230	360	570	890	1400	2300	3600
> 400 £ 500	4	6	8	10	15	20	27	40	63	97	155	250	400	630	970	1550	2500	4000

Tabela 1.1 – Qualidade de fabricação IT e grupos de dimensões.

O ajuste é o acoplamento de dois elementos com a mesma dimensão nominal caracterizando-se pelas tolerâncias adotadas, grau de acabamento exigido para a execução das peças e pela diferença das dimensões efetivas do eixo e furo.

Existem três condições de ajuste:

- *com folga*: são aqueles que sempre apresentam um jogo efetivo entre os elementos, de forma que o eixo pode girar ou deslizar dentro do furo.
- *com Interferência*: são aqueles que sempre apresentam uma resistência ao acoplamento, caracterizando-se pela dimensão mínima do eixo superior à dimensão máxima do furo.
- *incertos*: entre dois elementos a serem acoplados, poderá existir uma interferência ou folga conforme as dimensões efetivas das peças, as quais devem manter-se entre os limites impostos. Para que ocorra o ajuste incerto, a dimensão máxima do furo é superior à dimensão máxima do eixo, enquanto que a dimensão mínima do furo é inferior à dimensão máxima do eixo.

Outros elementos geométricos caracterizados por duas ou mais dimensões tem seus próprios sistemas de tolerância e ajuste.

Exemplo: - Cones : (DIN 229)
 - Roscas : (DIN 13)

Grupo de dimensões mm	Posição																														
	a	b	c	cd	d	e	ef	f	fg	g	h	js	j5 j6	j7	j8	k4 a k7	k<3 k>7	m	n	p	r	s	t	u	v	x	y	z	za	zb	zc
0 a 1			-60	-34	-20	-14	-10	-6	-4	-2	0		-2	-4	-6	0	0	2	4	6	10	14		18		20		26	32	40	60
> 1 ≤ 3	-270	-140	-60	-34	-20	-14	-10	-6	-4	-2	0		-2	-4		1	0	2	4	6	10	14		18		20		26	32	40	60
> 3 ≤ 6	-270	-140	-70	-46	-30	-20	-14	-10	-6	-4	0		-2	-4		1	0	4	8	12	15	19		23		28		35	42	50	80
> 6 ≤ 10	-280	-150	-80	-56	-40	-25	-18	-13	-8	-5	0		-2	-5		1	0	6	10	15	19	23		28		34		42	52	67	97
> 10 ≤ 14	-290	-150	-95		-50	-32		-16		-6	0		-3	-6		1	0	7	12	18	23	28		33		40		50	64	90	130
> 14 ≤ 18	-290	-150	-95		-50	-32		-16		-6	0		-3	-6		1	0	7	12	18	23	28		33	39	45		60	77	108	150
> 18 ≤ 24	-300	-160	-110		-65	-40		-20		-7	0		-4	-8		2	0	8	15	22	28	35		41	47	54	63	73	98	136	188
> 24 ≤ 30	-300	-160	-110		-65	-40		-20		-7	0		-4	-8		2	0	8	15	22	28	35	41	48	55	64	75	88	118	160	218
> 30 ≤ 40	-310	-170	-120		-80	-50		-25		-9	0		-5	-10		2	0	9	17	26	34	43	48	60	68	80	94	112	148	200	274
> 40 ≤ 50	-320	-180	-130		-80	-50		-25		-9	0		-5	-10		2	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	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	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	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	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	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	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	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	17	31	50	77	122	166	236	284	350	425	520	670	890	1150
> 200 ≤ 225	-740	-380	-260		-170	-100		-50		-15	0		-13	-21		4	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	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	20	34	56	94	158	218	315	385	475	580	710	920	1200	1550
> 280 ≤ 315	-1050	-540	-330		-190	-110		-56		-17	0		-16	-26		4	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	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	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	23	40	68	126	232	330	490	595	740	920	1100	1450	1850	2400
> 450 ≤ 500	-1650	-840	-480		-230	-135		-68		-20	0		-20	-32		5	0	23	40	68	132	252	360	530	660	820	1000	1250	1600	2100	2600

Tabela 1.2 – Valores de afastamentos de referência para eixos (mm).

Observações:

- Para eixos com ajustes de “a até j”, os afastamentos da tabela são superiores, de “j até zc” são inferiores.
- Para furos, os afastamentos são iguais aos valores negativos dos tabelados.
- Para furos com ajustes de “A até H”, os afastamentos da tabela são inferiores, de “J até ZC” são inferiores.

1.1.2 Desvios de forma

1.1.2.1 Tolerâncias de Posição

Tolerância de posição	Posição para elementos associados	Posição de um elemento	
		Concentricidade e coaxialidade	
		Simetria	

Fig. 1.3 – Tolerâncias de Posição – simbologia.

- *Tolerância de posição*: definida como desvio tolerado de um determinado elemento (ponto, reta, plano) em relação a sua posição teórica.

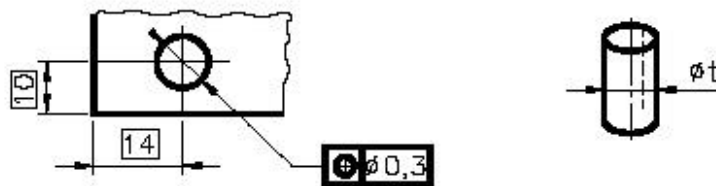


Fig. 1.4 – Tolerância de posição – especificação em desenho e interpretação.

- *Tolerância de simetria*: o campo de tolerância é limitado por duas retas paralelas, ou por dois planos paralelos, distantes no valor especificado e dispostos simetricamente em relação ao eixo (ou plano) de referência.

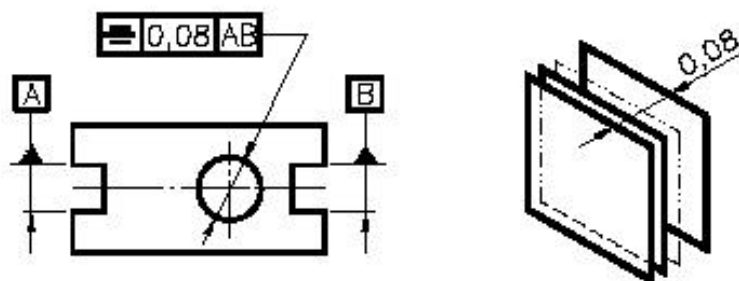


Fig. 1.5 – Tolerância de simetria – especificação em desenho e interpretação.

- *Tolerância de concentricidade*: define-se concentricidade como a condição segundo a qual os eixos de duas ou mais figuras geométricas, tais como cilindros, cones etc., são coincidentes.

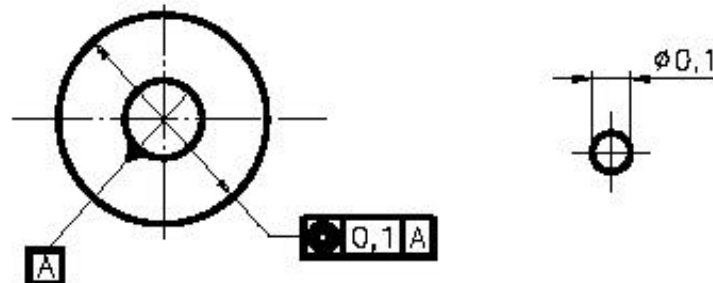


Fig. 1.6 – Tolerância de concentricidade – especificação em desenho e interpretação.

1.1.2.2 Tolerância de orientação

Orientação para elementos associados	Paralelismo	//
	Perpendicularidade	⊥
	Inclinação	∠

Fig. 1.7 – Tolerâncias de orientação – simbologia.

- *Tolerância de paralelismo*: é a condição de uma linha ou superfície ser equidistante em todos os seus pontos de um eixo ou plano de referência.

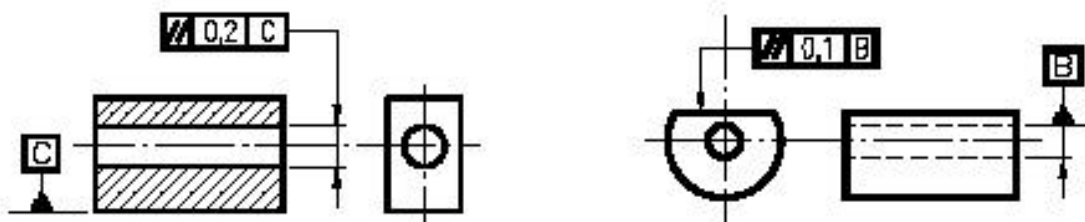


Fig. 1.8 – Tolerância de paralelismo – especificação em desenho e interpretação.

- **Tolerância de perpendicularidade:** é a condição pela qual o elemento deve estar dentro do desvio angular, tomado como referência o ângulo reto entre uma superfície, ou uma reta, e tendo como elemento de referência uma superfície ou uma reta, respectivamente.

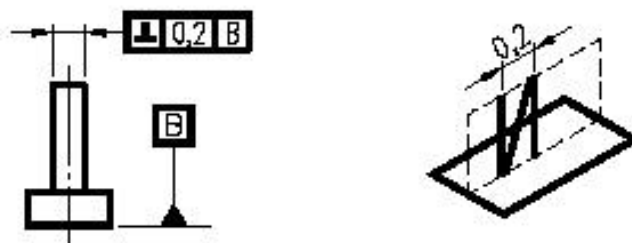


Fig. 1.9 – Tolerância de perpendicularidade – especificação em desenho e interpretação.

- **Tolerância de inclinação:** o campo de tolerância é limitado por dois planos paralelos, cuja distância é o valor da tolerância, e inclinados em relação à superfície de referência do ângulo especificado.

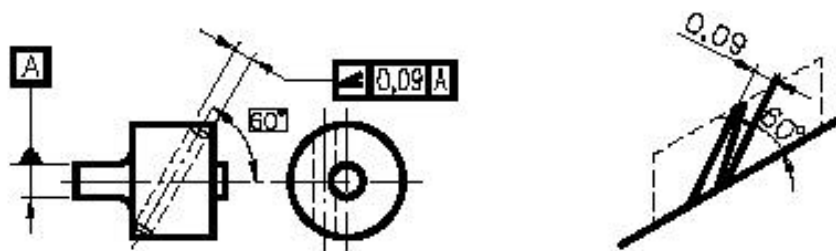


Fig. 1.10 – Tolerância de inclinação – especificação em desenho e interpretação.

1.1.2.3 Tolerância de forma

Características afetadas pelas tolerâncias		
FORMA para elementos isolados	Retilidade	—
	Planeza	▱
	Circularidade	○
	Cilindricidade	⊘
	Forma de uma linha qualquer	⌒
	Forma de uma superfície qualquer	⌒

Fig. 1.11 - Tolerâncias de forma – simbologia.

- *Tolerância de retilidade:* é a condição pela qual cada linha deve estar limitada dentro do valor de tolerância especificada.

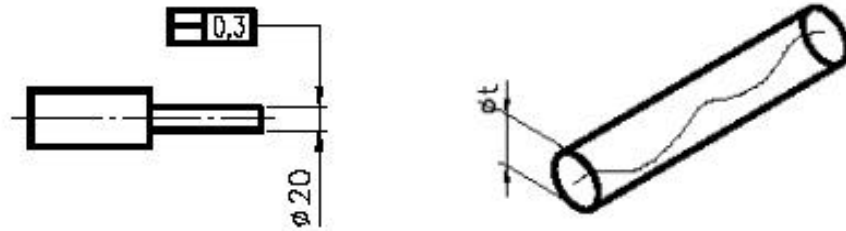


Fig. 1.12 – Tolerância de retilidade – especificação em desenho e interpretação.

- *Tolerância de planeza:* é a condição pela qual toda superfície deve estar limitada pela zona de tolerância “t”, compreendida entre dois planos paralelos, distantes de “t”.

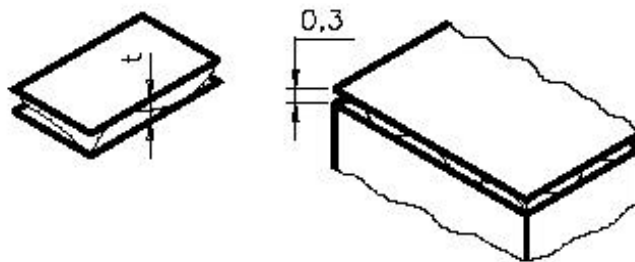


Fig. 1.13 – Tolerância de planeza – interpretação.

- *Tolerância de circularidade:* condição pela qual qualquer círculo deve estar dentro de uma faixa definida por dois círculos concêntricos, distantes no valor da tolerância especificada.

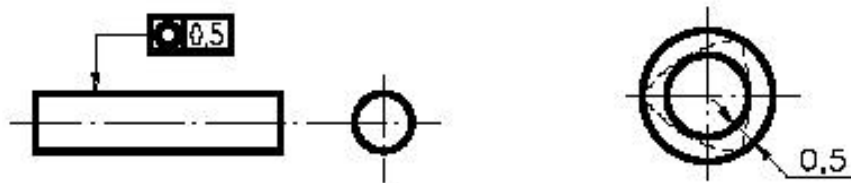


Fig. 1.14 – Tolerância de circularidade.

- *Tolerância de forma de superfície:* o campo de tolerância é limitado por duas superfícies envolvendo esferas de diâmetro igual à tolerância especificada e cujos centros estão situados sobre uma superfície que tem a forma geométrica correta.

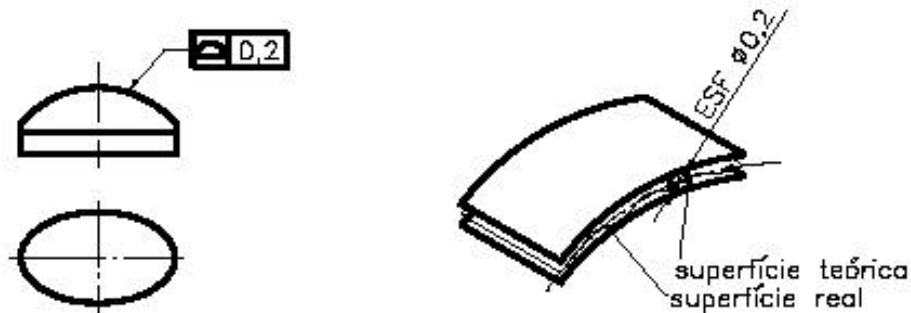


Fig. 1.15 – Tolerância de forma de superfície – especificação em desenho e interpretação.

- *Tolerância de cilindridade:* é a condição pela qual a zona de tolerância especificada é a distância radial entre dois cilindros coaxiais.



Fig. 1.16 – Tolerância de forma de cilindridade – especificação em desenho e interpretação.

1.1.2.4 Tolerância de movimentação

- *Tolerância de batimento radial:* é definida como um campo de distância t entre dois círculos concêntricos, medidos em um plano perpendicular ao eixo considerado.
- *Tolerância de batimento axial:* é definida como o campo de tolerância determinado por duas superfícies, paralelas entre si e perpendiculares ao eixo de rotação da peça, dentro do qual deverá estar a superfície real quando a peça efetuar uma volta, sempre referida a seu eixo de rotação.

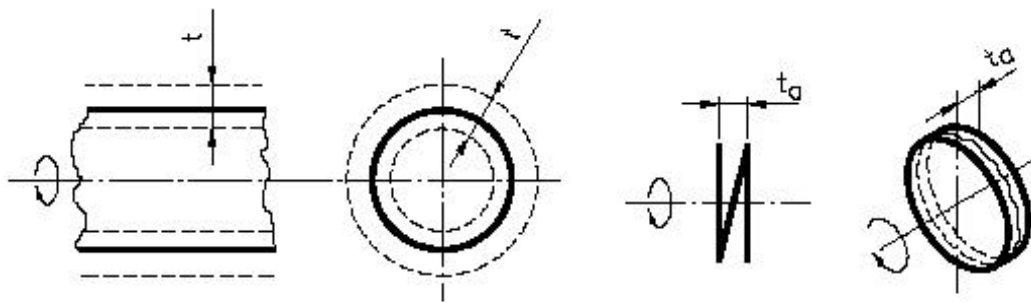


Fig. 1.17 – Tolerância de batimento radial e axial.

1.1.2.5 Rugosidade

É o conjunto de irregularidades, isto é, pequenas saliências e reentrâncias que caracterizam uma superfície. Essas irregularidades podem ser avaliadas com aparelhos eletrônicos, a exemplo do rugosímetro. A rugosidade desempenha um papel importante no comportamento dos componentes mecânicos. Ela influi na:

- qualidade de deslizamento;
- resistência ao desgaste;
- transferência de calor;
- qualidade de superfícies de padrões e componentes ópticos;
- possibilidade de ajuste do acoplamento forçado;
- resistência oferecida pela superfície ao escoamento de fluidos e lubrificantes;
- qualidade de aderência que a estrutura oferece às camadas protetoras;
- resistência à corrosão e à fadiga;
- vedação;
- aparência.

O parâmetro de rugosidade mais usado baseia-se nas medidas de profundidade da rugosidade. R_a é a média aritmética dos valores absolutos das ordenadas do perfil efetivo em relação à linha média num comprimento de amostragem. Pode ser calculado da seguinte forma:

$$R_a = \frac{1}{L} \cdot \int_0^L |y| \cdot dx \quad \text{ou} \quad R_a = \frac{A}{L_c}$$

onde: A = média da soma das áreas acima e abaixo da linha média;
 L_c = comprimento analisado para a obtenção de A .

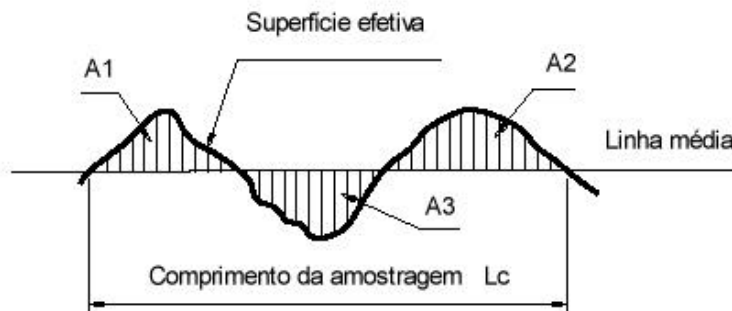


Fig. 1.18 – Rugosidade: ilustração esquemática para obtenção de R_a .

1.1.3 Causas dos desvios de forma

Os desvios de forma que afetam as dimensões nominais das peças podem ser ocasionados por diversos fatores, sendo os principais (conhecidos por 6M) listados a seguir:

- material da peça: usinabilidade, conformabilidade ou dureza;
- meio de medição: incerteza de medição, adequação do instrumento ao mensurando;
- máquina-ferramenta: ferramenta de corte, defeitos nas guias, erros de posicionamento;
- mão de obra: erros de interpretação, falta de treinamento;
- meio ambiente: variação de temperatura, limpeza do local de trabalho;
- método: processo de fabricação para obtenção da peça, parâmetros de corte.

1.2 MEDIÇÃO DE UM COMPRIMENTO

Na determinação de um comprimento ou de um ângulo de uma peça, procede-se da mesma forma como na determinação de qualquer outra grandeza física, para se alcançar a resultado da medição.

Segue-se aqui as orientações dada no capítulo 7 da apostila 1 de metrologia e controle geométrico, considerando-se, adicionalmente, as fontes de erro ligados a medição de comprimentos a serem analisados neste capítulo.

Caso o problema a ser resolvido é saber se a peça se enquadra nos limites de tolerância especificados no projeto, o encaminhamento do problema é distinto. Trata-se da execução de um controle dimensional.

1.3 CONTROLE DE UMA DIMENSÃO

Após a fabricação das peças inicia-se o trabalho do metrologista, ou seja, realizar a verificação se as peças produzidas tem dimensões dentro das especificações do projeto. Nesta verificação a

peça será classificada como boa ou refugo.

A partir do valor da tolerância de fabricação (IT ou t), especifica-se qual o máximo erro admissível que pode ocorrer na medição da grandeza em questão.

A relação entre a incerteza de medição do processo de medição, no controle do diâmetro de determinado eixo, e a faixa de tolerância do mesmo é mostrada na figura 1.19

Para efeito de aprovação ou rejeição da peça toma-se simplesmente a indicação dada pelo sistema de medição utilizado no processo de medição. Pelo fato da incerteza de medição ser um décimo do intervalo de tolerância IT, considera-se o processo de medição como perfeito.

No entanto nem sempre dispomos de um processo de medição cuja incerteza de medição é inferior a um décimo do intervalo de tolerância.

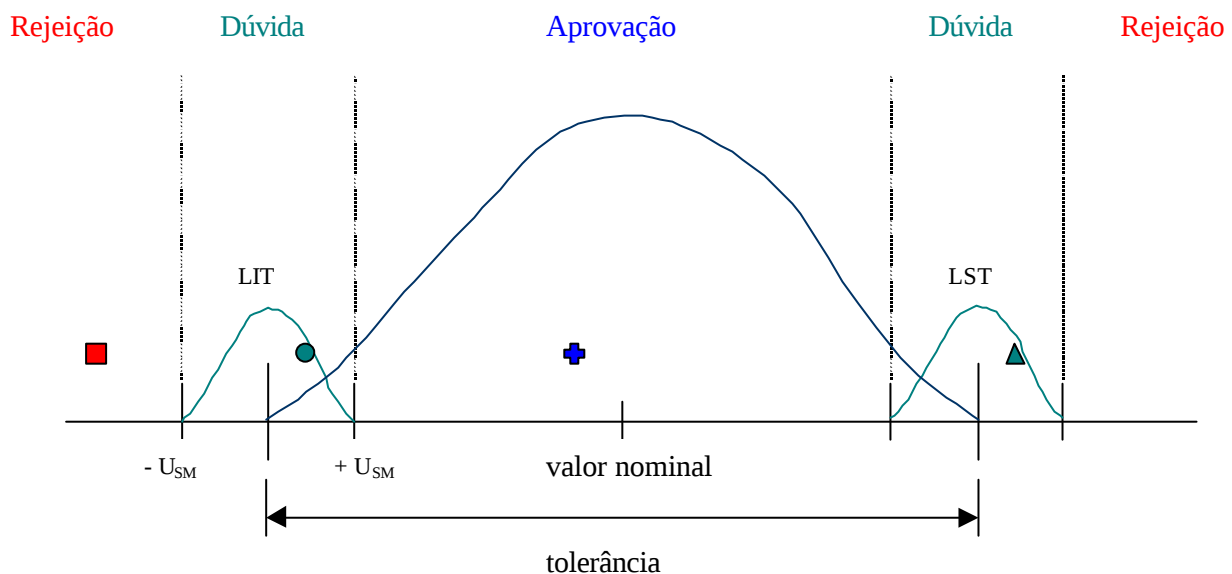


Fig. 1.19 - Controle de uma dimensão.

Legenda:

LIT: limite inferior da tolerância

LST: limite superior da tolerância

U_{SM} : incerteza do sistema de medição

Conforme demonstra a figura 1.19 é possível acontecer 4 casos diferentes de resultado da medição (resultado corrigido e incerteza associada) em relação aos limites de tolerância.

No primeiro caso (quadrado na figura 1.19), sentido da esquerda para direita, é possível afirmarmos que o produto deve ser refugado pois o resultado de medição apresenta-se integralmente fora dos limites de tolerância.

Já no segundo caso (círculo), o resultado corrigido do processo de medição está dentro do limite especificado para a tolerância do produto. No entanto, devido a incerteza de medição, está numa região de dúvida deste limite. Neste caso não é possível afirmar com segurança que o produto está dentro de tolerância para a dimensão medida. É possível afirmar somente que existe grande probabilidade do mesmo apresentar-se dentro dos limites de tolerância.

No terceiro caso (cruz) da figura 1.19, o resultado corrigido e a incerteza associada estão dentro do limite de tolerância. Nesta situação podemos afirmar com segurança que o produto atende as especificações com relação a tolerância de fabricação.

No quarto caso (triângulo), o resultado corrigido do processo de medição está acima do limite superior de tolerância do produto. Neste caso não é possível afirmar com segurança que o produto está fora de tolerância para a dimensão medida, isto é, que o mesmo deveria ser refugado. Isto porque a incerteza do sistema de medição está abrangendo o valor da medida, caracterizando uma região de dúvida acerca dos resultados dentro dessa faixa de valores. É possível afirmar somente que existe grande probabilidade do mesmo apresentar-se fora dos limites de tolerância.

1.4 CAUSAS DE ERROS NAS MEDIÇÕES DE COMPRIMENTO

1.4.1 Fatores de Natureza Mecânico

a) Força de Medição

Na maioria dos casos o processo de medição a realização da medição, está associado a um contato mecânico entre os sensores do SM (apalpadores) e o objeto a medir. No caso de medição por processo óptico, eletroindutivo ou eletrocapacitivo não há contato mecânico direto e inexistente a força de medição.

Ao contato mecânico está associada uma força, denominada força de medição. Uma certa força é necessária para que o apalpador possa penetrar (ou deslocar para o lado) camadas de sujeira, de óleo, de graxa, de gases aderentes e semelhantes que aderem nas superfícies de contato.

Por outro lado, a força de medição provoca no objeto, bem como no sistema de medição e demais componentes mecânicos utilizados no processo, deformações de vários tipos introduzindo assim erros de medição, na forma de retroação.

Assim, é necessário manter-se a força de medição em valores mínimos necessários ao funcionamento dos SM e, adicionalmente, mantê-la constante ao máximo possível para se poder levar, eventualmente, em consideração nas correções.

A força de medição está, por exemplo, no caso de um micrômetro externo, na faixa entre 5 a 10 N. No relógio comparador comum usa-se a força de medição entre 0,8 até 1,5 N, com variação

da mesma de 0,4 N no máximo; no caso de alguns relógios comparadores, a força de medição é de 3 até 6 N, ou por outro lado, apenas 0,15 a 0,40 N. Interessante é que deixando-se descer a haste do relógio comparador bruscamente de uma altura de 20 mm apenas, ocorre um 'pico' de força de medição dinâmica de até 70 N apesar da força estática ser de somente algumas unidades de N.

b) Deformações

Deformações que ocorrem na medição não devem ser, sob hipótese alguma, de caráter permanente, mas sim, exclusivamente, elásticas. Deste ponto de vista há certo perigo nas áreas de contato entre o sensor (especialmente o de forma arredondada) e o objeto quando ocorrer um choque dinâmico.

Deformações indesejáveis podem ocorrer, também, pelo peso próprio, quer do sistema de medição, quer do objeto a medir especialmente se for usado apoio inadequado para os mesmos.

As inevitáveis deformações ou são mantidas dentro de determinados limites através de dimensionamento adequado da peça, ou são isoladas e convenientemente consideradas (correções introduzidas) no resultado da medição. Os limites admissíveis das deformações dependem das correspondentes exigências quanto a incerteza de medição máxima permitida para o processo.

As deformações podem ter caráter de variação de comprimento (encurtamento ou alongamento), de flexão, de distorção ou de achatamento na região de contato.

b.1) Variação de comprimento:

A variação elástica de comprimento L em (mm) calcula-se com base na lei de Hooke:

$$\Delta L = \frac{F \cdot L}{E \cdot A}$$

onde:

F (N):	Força atuante
L (mm):	Comprimento sujeito a variação
E (N/mm ²):	Módulo de elasticidade
A (mm ²):	Área da seção transversal

Exemplo numérico: Uma régua de $E = 21,5 \cdot 10^4$ N/mm², de aço com dimensões 9 x 35 mm, $A = 315$ mm², $L = 1000$ mm, sendo carregada axialmente por uma força de medição de 10 N, sofrerá encurtamento,

$$\Delta L = (10) \cdot (1000) / (315) \cdot (21,5 \cdot 10^4) = 0,000147 \text{ mm} = 0,15 \text{ } \mu\text{m}$$

b.2) Flexão:

As deformações transversais de elementos dos sistemas de medição ou objetos, podem ser calculadas em casos simples usando-se as fórmulas para vigas sobre dois apoios ou engastadas.

A flecha máxima y (μm) de um mandril cilíndrico apoiado pelas extremidades, entre pontas de medição, calcular-se-á pela fórmula:

$$Y = 425 \cdot \frac{P \cdot L^3}{E \cdot d^4}$$

onde P (N) é a força de medição atuando na metade do comprimento L (mm) entre apoios, e d (mm) é o diâmetro do mandril.

A flecha devido ao peso próprio do mesmo mandril de aço com módulo de elasticidade ($E = 21,5 \cdot 10^4 \text{ N/mm}^2$, e densidade = $0,078 \text{ (N/cm}^3\text{)}$) calcula-se pela fórmula:

$$Y = 7,6 \cdot \frac{L^4}{d^2} \cdot 10^{-8}$$

Para se ter uma idéia sobre valores absolutos observar-se-ão alguns exemplos numéricos:

- O mandril de aço, de comprimento $L = 500 \text{ mm}$, de diâmetro $d = 30 \text{ mm}$ flete, por peso próprio no meio em $5 \mu\text{m}$. O mesmo mandril, sob força de medição de 1 N flete no meio em $0,3 \mu\text{m}$.
- Um suporte de relógio comparador, de aço, cuja parte vertical tem o comprimento $L = 200 \text{ mm}$ e a parte horizontal em balanço de comprimento $a = 70 \text{ mm}$, sendo a seção transversal das duas partes circular, de diâmetro $d = 20 \text{ mm}$, recua verticalmente, na sua extremidade em balanço, sob força de medição de 1 N , em $0,6 \mu\text{m}$.

Em alguns casos, por escolha adequada dos pontos de apoio, pode-se obter deflexões mais convenientes.

Por exemplo, um bloco padrão longo, apoiado em dois cutelos colocados a uma distância das extremidades de $a = 0,2113 \cdot L$ (figura 1.20a) (onde L é o comprimento total do bloco) manterá ambos os planos extremos (superfícies de medição) paralelos apesar da deflexão transversal. A mesma distância entre apoios é recomendável para escalas, com divisões na parte superior da régua.

Para as escalas, cujas divisões são gravados na linha neutra da seção transversal, o apoio em "pontos de Bessel", na distância de $a = 0,22031 L$, proporciona o encurtamento mínimo do comprimento total L (figura 1.20b).

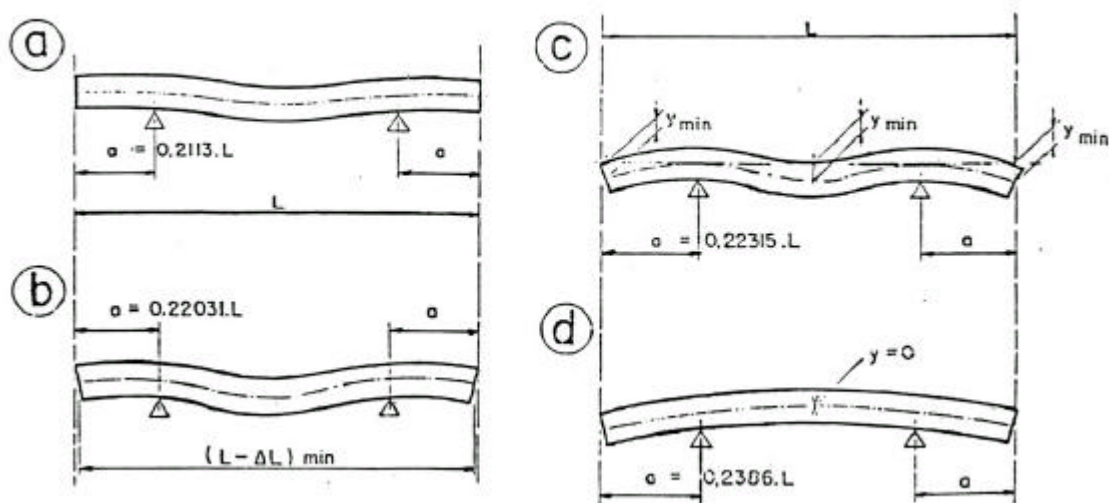


Fig. 1.20 – Deformações devido ao peso próprio.

No caso de uma régua ser usada em seu comprimento total, recomenda-se que os pontos de apoio estejam ajustados de $a = 0,22315.L$ dos extremos. Neste caso, obtém-se a deflexão transversal mínima, sendo a deformação nos extremos igual à flecha no meio da régua (figura 1.20c).

Se a régua for usada apenas na sua parte central entre os apoios, é vantajoso colocar os cutelos de apoio na distância de $a = 0,2386.L$ das extremidades. Neste caso a deformação transversal na região entre os apoios será pequena, sendo igual a zero na metade da distância (figura 1.20d).

b.3) Achatamento:

Por achatamento se entende a aproximação que ocorre ente o sensor do sistema de medição e a peça após o primeiro contato físico, em função da ação de uma força de medição. Pode ser calculado, para os casos simples de contato, pelas equações de Hertz, porém, com coeficientes estabelecidos experimentalmente.

Nas fórmulas que seguem, tem-se:

- a (μm) = valor do achatamento;
- F (N) = força de medição que aperta uma superfície contra a outra
- d (mm) = diâmetro da esfera ou do cilindro;
- L (mm) = comprimento de contato (se aplicável).

As fórmulas que seguem são válidas para peças e sensores de aço:

- Duas esferas iguais, ou cilíndricos cruzados

$$a = 0,52575 \cdot \sqrt[3]{\frac{F^2}{d}}$$

- Esfera sobre um plano

$$a = 0,4173 \cdot \sqrt[3]{\frac{F^2}{d}}$$

- Cilindro sobre um plano

$$a = 0,047 \cdot \frac{F}{L} \cdot \sqrt[3]{\frac{L}{d}}$$

Para ilustração, um apalpador semi esférico atuando sobre um bloco padrão provoca um achatamento $a = 0,5 \mu\text{m}$, se $F = 3 \text{ N}$ e $d = 5 \text{ mm}$.

c) Desgaste:

O desgaste ocorre nas superfícies de medição de um instrumento sempre quando há um movimento relativo entre as superfícies em contato e, portanto, quando se tem atrito.

Deve-se pois, dentro do possível, evitar o movimento da superfície de medição sobre a peça e/ou reduzir o atrito.

Em muitos casos, entretanto, tem-se de contar para as superfícies em contato dos instrumentos de medição, materiais de alta resistência ao desgaste: aços de ferramentas com liga especial, camadas de cromo duro, minerais (por exemplo: ágata).

Não só as superfícies de medição estão sujeitas ao desgaste, mas todas as superfícies móveis de um SM, nas quais ocorre atrito.

Recomenda-se então, já por ocasião do projeto, providenciar elementos e/ou mecanismos que possibilitem ajustagem e, conseqüentemente, eliminação adicional do desgaste.

O usuário por sua vez deve inspecionar os sistemas de medição periodicamente e, se necessário, fazer a reajustagem. O problema é que em virtude da interação de diversos fatores, o desgaste não decorre nas superfícies uniformemente: superfícies planas tornam-se côncavas ou convexas, guias apresentam folgas maiores apenas em certos lugares, e semelhantemente. A eliminação completa do desgaste ocorrido torna-se, pois, muito difícil e as superfícies desgastadas dão origem a erros de medição.

1.4.2 Fatores de Natureza Geométrica

a) Forma geométrica da peça a medir:

Uma peça mecânica é representada, num desenho técnico, sempre em sua forma ideal e com dimensões nominais. A peça depois de executada, não só diverge deste ideal em suas dimensões mas, também, em sua forma geométrica.

De acordo com a técnica utilizada na fabricação a superfície apresenta diferentes rugosidades, asperezas, etc., que são chamadas de erros microgeométricos.

Os desvios da forma geométrica geral (retilidade, cilindridade, planeza de superfícies) são denominados erros da macrogeometria.

Os desvios macrogeométricos afetam o processo de medição e por isso as relações geométricas de posição entre o sistema de medição e peça devem ser conhecidas, com clareza, para evitar erros de medida.

Isto exige que se meça de tal modo que os desvios macrogeométricos possam ser identificados.

Assim, tendo-se, por exemplo, uma placa retangular fabricada - erroneamente - em forma de um quadrilátero (figura 1.21a) e tomando-se a medida em dois sentidos perpendiculares, em dois lugares a e b, apenas, obtém-se, por exemplo, para a medida a um valor completamente deliberado (que dependerá do lugar da medida, a_1 , a_2 , a_3 , etc.) e o operador não perceberá o desvio da forma. Para identificar os erros de forma geométrica da peça é necessário medi-la em vários lugares, (por exemplo, a_1 , a_2 , b_1 , b_2 na figura 1.21b).

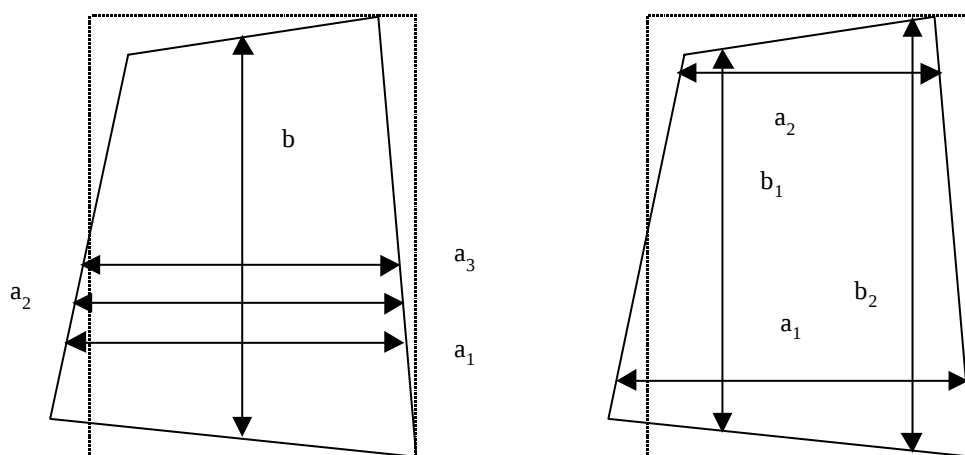


Fig. 1.21 – Erros macrogeométricos em peças.

Peças cilíndricas, eixos ou pinos, podem afastar-se da forma circular em vários pontos de sua secção transversal, além disso, afastar-se da forma cilíndrica reta em vários pontos na direção axial. A figura 1.22 apresenta alguns exemplos esquemáticos.

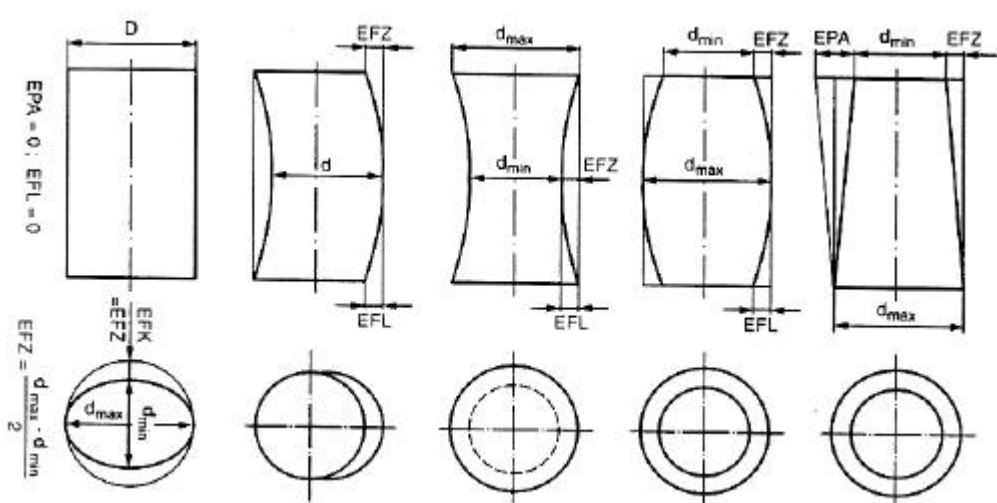


Fig. 1.22 – Erros macrogeométricos em peças cilíndricas.

Se em lugar da forma circular exata ocorre uma forma oval (figura 1.23a) então pode-se determinar o diâmetro máximo e mínimo da mesma com duas superfícies de medição paralelas, a, b, por exemplo, num paquímetro, micrômetro, etc, obtendo-se a diferença A ("ovalidade").

Usando-se, neste caso, um prisma (figura 1.23b) como apoio para a medição com um relógio comparador R, a diferença B entre os diâmetros apresenta-se apenas em proporção reduzida (sendo $B < A$).

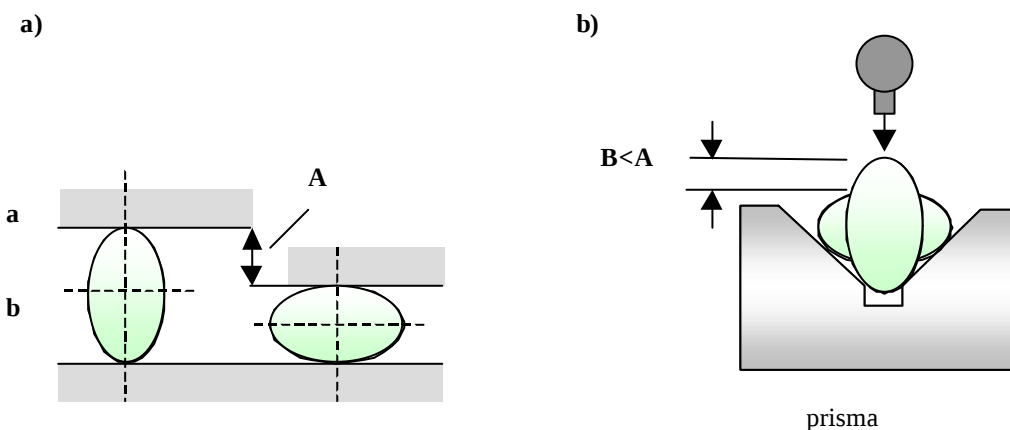


Fig. 1.23 – Erros geométricos de circularidade – ovalidade.

Se ocorrer, por outro lado, um iso-espesso E, figura 1.24, a medição entre planos paralelos não registrará o erro de circularidade. O registro da excentricidade faz-se com auxílio de prisma. O melhor resultado oferece o prisma cujo ângulo é relacionado com o número n de lados do iso-espesso de acordo com a fórmula.

$$\alpha = 180^\circ - k \cdot \frac{360^\circ}{n}$$

onde k são os números inteiros 1, 2, 3, ... , assim, obtém-se a seguinte tabela:

NÚMERO DE LADOS DO ISO-ESPESSO	ÂNGULO DO PRISMA EM (°)
3	60
5	108 ou 36
7	128,6 ou 77,1
9	140 ou 100 ou 160

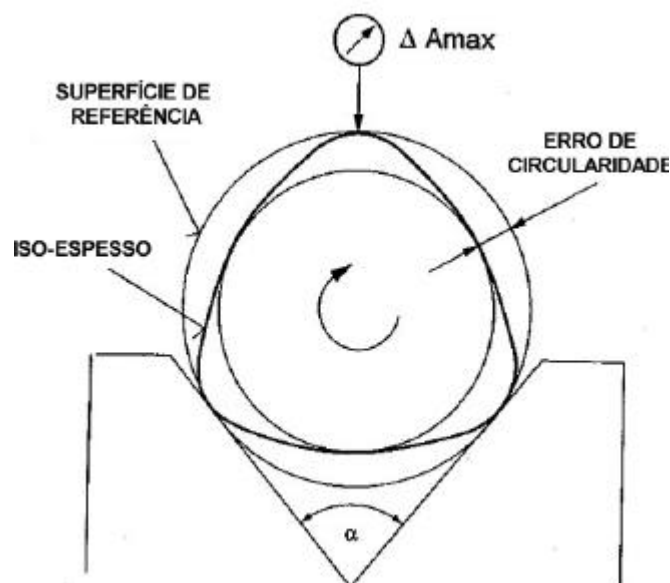


Fig. 1.24 – Erros macrogeométricos de circularidade – iso-espesso.

Quando se suspeita da presença de algum desvio da forma circular, porém, não se sabe se se trata do oval (ou alguma forma do mesmo com o número par dos lados) ou de iso-espesso (cujo número de lados é desconhecido), a medição procede-se entre dois planos paralelos e depois pelo menos em dois prismas diferentes, de ângulos 60° e 90°, respectivamente. O ângulo de 90°, apesar de que não constar na tabela acima, é suficientemente perto dos valores 108° ou 77,1° citados.

Os problemas da influência da forma geométrica estão intimamente relacionados com as dimensões das medidas e das tolerâncias. Para a técnica de medição de comprimentos, deve ficar claro que, para a determinação da configuração real de uma peça, jamais basta uma única medida, mas que sempre é necessário considerar várias medidas, bem como a relação entre as mesmas.

b) Erro de Contato

Os elementos do instrumento de medição que tocam a peça a medir, ou seja, os sensores de medição, devem ter a forma correspondente a configuração da peça, a fim de que se obtenha o contato geometricamente bem definido: se a peça a medir é plana, o sensor de medição é geralmente esférico, figura 1.25a. Se por outro lado, a peça é esférica ou cilíndrica, usam-se sensores planos de medição, figura 1.25b. Na medição de roscas utilizam-se pontas sensoras de forma cônica, cilíndrica ou esférica.

Se o contato entre a peça a medir e a superfície de medição, devido a erros de forma de uma ou de outra não tem uma relação geométrica exata, correspondente ao recobrimento geométrico desejado, acontece então o que denominamos de erro do contato.

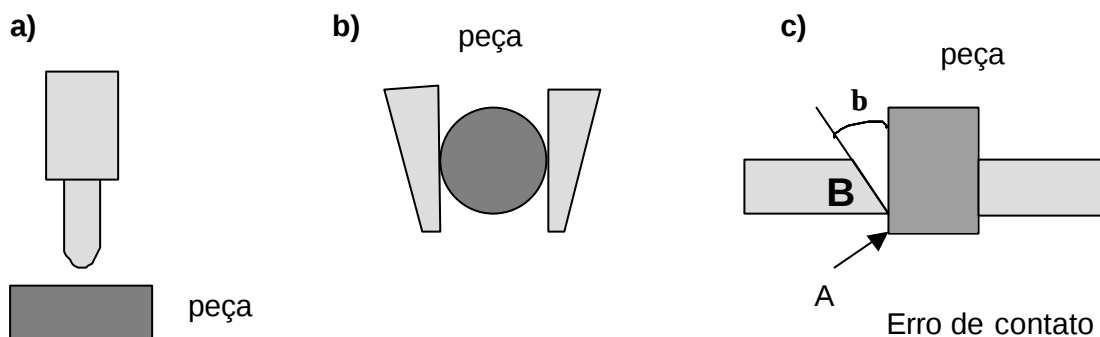


Fig. 1.25 – Contato entre sensor do sistema de medição e a peça a medir.

Na figura 1.25c tem-se o erro de contato em sua forma mais simples, quando não há recobrimento geométrico entre a superfície plana da peça A e a superfície plana de medição B de modo que as duas tocam uma a outra em ângulo (fortemente exagerado no desenho). Este é um exemplo típico de situação que acontece, por exemplo, quando medimos uma peça com um micrômetro ou uma máquina de medir em que os sensores de medição apresentam erros de paralelismo acentuado, gerando efetivamente erros de medição significativos.

A maioria dos problemas com erro de contato elimina-se por uma forma geométrica impecável das superfícies de medição.

c) Relações Geométricas de Posição:

Erros geométricos de posição de medição são evitados, de forma mais segura pelo emprego do método da substituição. A dimensão da peça é captada com auxílio de um dispositivo e depois comparado a padrões de medição colocados exatamente no lugar e na posição da peça. Assim, não podem ocorrer erros de posição devidos a movimentação de cursores (não perfeição de guias) ou problemas semelhantes.

Se o método da substituição não puder ser aplicado, deve-se ao menos obedecer ao princípio de ABBE, enunciado por Ernst Abbé, que exige que “o trecho a medir deve constituir o prolongamento retilíneo da escala que serve como dispositivo de medição”. Ambos, trecho a

medir, bem como o padrão de medida, devem ser dispostos no mesmo eixo um atrás do outro.

No esquema de um paquímetro na figura 1.26, observa-se, que o princípio de Abbé não é respeitado na configuração do instrumento o que implica na menor confiabilidade dos resultados: o trecho a medir " d_A " (diâmetro de uma peça) encontra-se paralelo a escala de medição. Observa-se que no instante da medição ocorre um erro em função da distância S entre a escala do instrumento e o ponto de contato entre os sensores de medição e a peça. Nestes casos deve-se realizar as medições posicionando-se a peça a medir o mais próximo possível da escala do instrumento de medição, de modo a diminuir a distância S , e portanto, reduzir o erro de medição.

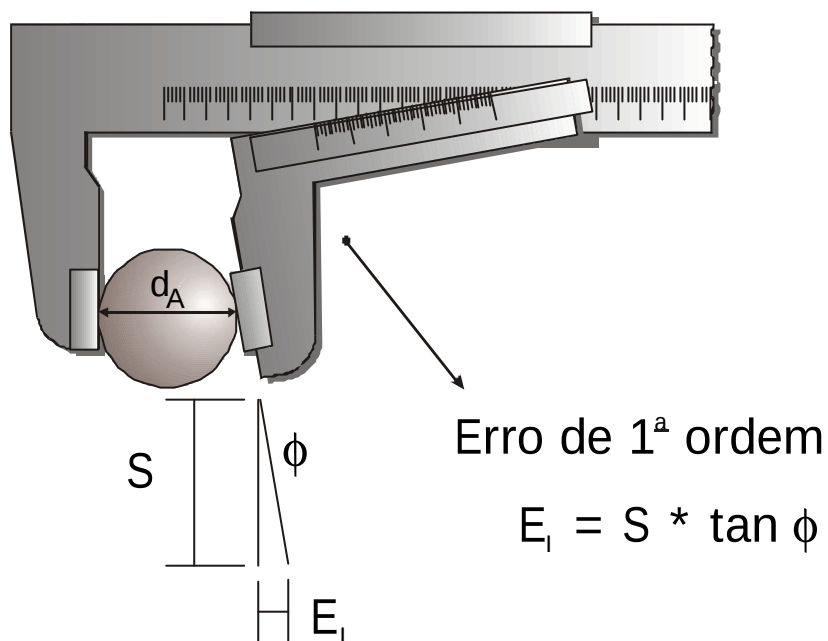


Fig. 1.26 – Erro de primeira ordem – disposição paralela do padrão com a peça.

Já no caso de um micrômetro (figura 1.27) o trecho a medir " L " situa-se no prolongamento retilíneo da escala de medição que, neste caso, fica realizada pelo parafuso de medição do micrômetro. Respeitado o princípio de Abbé, obtém-se resultados com substancial minimização de erros, já que ocorrem somente os de 2º ordem.

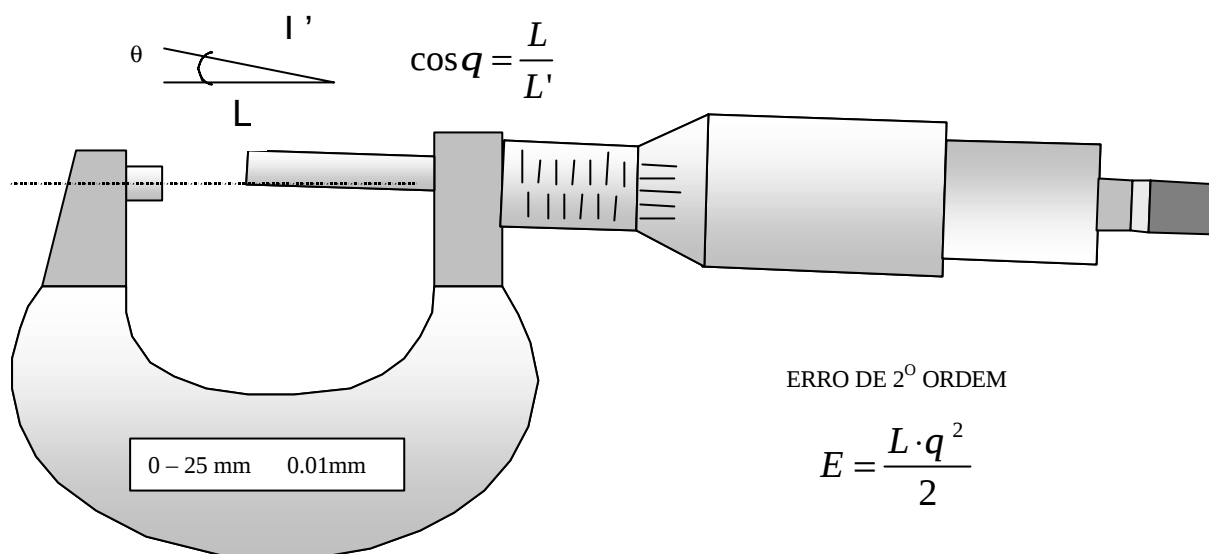


Fig. 1.27 – Erro de segunda ordem – disposição alinhada do padrão com a peça.

1.4.3 Fator de Natureza Física

Deformação térmica:

Como o volume dos materiais metálicos sofre alteração com a variação da temperatura, é extremamente importante estabelecer uma temperatura de referência.

A temperatura de 20,0 °C é hoje adotada internacionalmente como temperatura de referência para apresentação de resultados de medição ou calibração de instrumentos de medição da Área de Metrologia Dimensional. Assim, os resultados do comprimento de blocos padrão, os resultados da calibração de uma Máquina de Medir por Coordenadas, entre outros, são válidos para a temperatura de 20,0 °C.

Nas medições de comprimento é necessário dar uma atenção toda especial à temperatura em virtude da deformação térmica sofrida pelos instrumentos, padrões, alguns dispositivos utilizados no processo de medição, além das deformações sofridas pelas próprias peças sujeitas a medição.

A variação de comprimento é calculada pela fórmula:

$$\Delta L = L \cdot \Delta t \cdot \alpha$$

onde: ΔL - Variação de comprimento (encurtamento ou alongamento do comprimento L);

- L - comprimento original;
- α - coeficiente de expansão térmica;
- Δt - a diferença de temperaturas.

Exemplo: Um bloco prismático de aço de comprimento de 1 metro a 20,0 °C, terá na temperatura ambiente de 26,0 °C o comprimento de 1000,069 mm, já que

$$L + \Delta L = 1000 + 1000 \cdot 11,5 \cdot 10^{-6} \cdot 6 = 1000,069 \text{ mm}$$

Para o aço, o coeficiente $\alpha = 11,5 \mu\text{m/m.K}$

Se a peça a medir tem o mesmo coeficiente de expansão térmica do padrão usado (escala, bloco padrão, etc.), com o qual será comparado, não ocorrerá erro de medição por razões térmicas, mesmo quando a medição se efetua em temperatura diferente da de referência (20,0 °C) já que o padrão se deforma na mesma proporção que a peça a medir. Evidentemente isto só ocorrerá se ambos, peça e padrão/instrumento estiverem na mesma temperatura (o que pode ser obtido deixando-se peça e padrão/instrumento estabilizando termicamente por um período de tempo suficiente para atingir-se o equilíbrio térmico). Este é o motivo pelo qual os metais leves só podem ser usados em instrumentos de medição mediante cuidados especiais a não ser no caso particular em que as próprias peças são de metal leve. Por razões semelhantes não se utilizam calibradores e padrões de vidro, apesar de serem mais baratos e bastante resistentes ao desgaste.

Se a peça tiver um coeficiente de expansão térmica distinto do padrão (o que às vezes é inevitável), como por exemplo, padrão de aço e peça de latão, então ocorrerá um erro quando a temperatura de medição diferir da temperatura de referência de 20,0 °C. Se, além disso houver ainda diferença de temperatura entre peça e padrão (instrumento de medição utilizado no processo de medição), podem ocorrer erros ponderáveis de medição devidos a efeitos térmicos.

Se as temperaturas do padrão e da peça a medir diferirem de 20 °C em Δt_1 e Δt_2 e se os coeficientes de expansão térmica forem α_1 e α_2 , respectivamente, o erro de medição ΔL para um comprimento L será:

$$\Delta L = L \cdot (\Delta t_1 \cdot \alpha_1 - \Delta t_2 \cdot \alpha_2)$$

Do anterior exposto, conclui-se uma aplicação importante para a prática de medição. Deve-se assegurar que a temperatura da peça e do sistema de medição sejam próximas tanto quanto possível da temperatura de referência. Isto se obtém deixando ambos durante certo tempo num ambiente a 20 °C. O tempo necessário para a equalização da temperatura depende do porte e tipo de cada um dos elementos, e da diferença inicial de temperaturas, variando para as peças usuais entre 4 e 24 horas. Favoravelmente influi se ambos elementos repousam sobre a mesma base metálica.

Se o tempo para equalização de temperaturas foi insuficiente corre-se o risco de que diversas partes da peça ou do padrão apresentem diferenças de temperaturas entre si, o que provocará não só erros em dimensões, mas também erros de forma. Semelhantemente, deve-se impedir que ocorram variações de temperatura durante a própria medição.

O quadro apresentado a seguir sintetiza as diversas possibilidades de combinações entre

materiais e temperatura:

CASO	PEÇA		SM		ERRO
	MATERIAL	TEMPERATURA	MATERIAL	TEMPERATURA	
1	A	20 °C	A	20 °C	-
2	A	$T \neq 20 \text{ °C}$	A	T	-
3	A	T	A	$t \neq T$	$\alpha_A(T-t)L$
4	A	20 °C	B	20 °C	-
5	A	$T \neq 20 \text{ °C}$	B	T	$[\alpha_A(T-20) - \alpha_B(T-20)]L$
6	A	T	B	$t \neq T$	$[\alpha_A(T-20) - \alpha_B(t-20)]L$

Onde: α_A = coeficiente de dilatação térmica do material A ($\mu\text{m}/\text{m.K}$)
 α_B = coeficiente de dilatação térmica do material B ($\mu\text{m}/\text{m.K}$)
L = comprimento medido (m)

O erro é determinado em μm .