



ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

PMR 3203

Laboratório 2

Metrologia

2020.1



Fundamentos de metrologia



One accurate
measurement is worth
a thousand
expert opinions
Grace Hopper





Testes e medições dentro da metrologia industrial

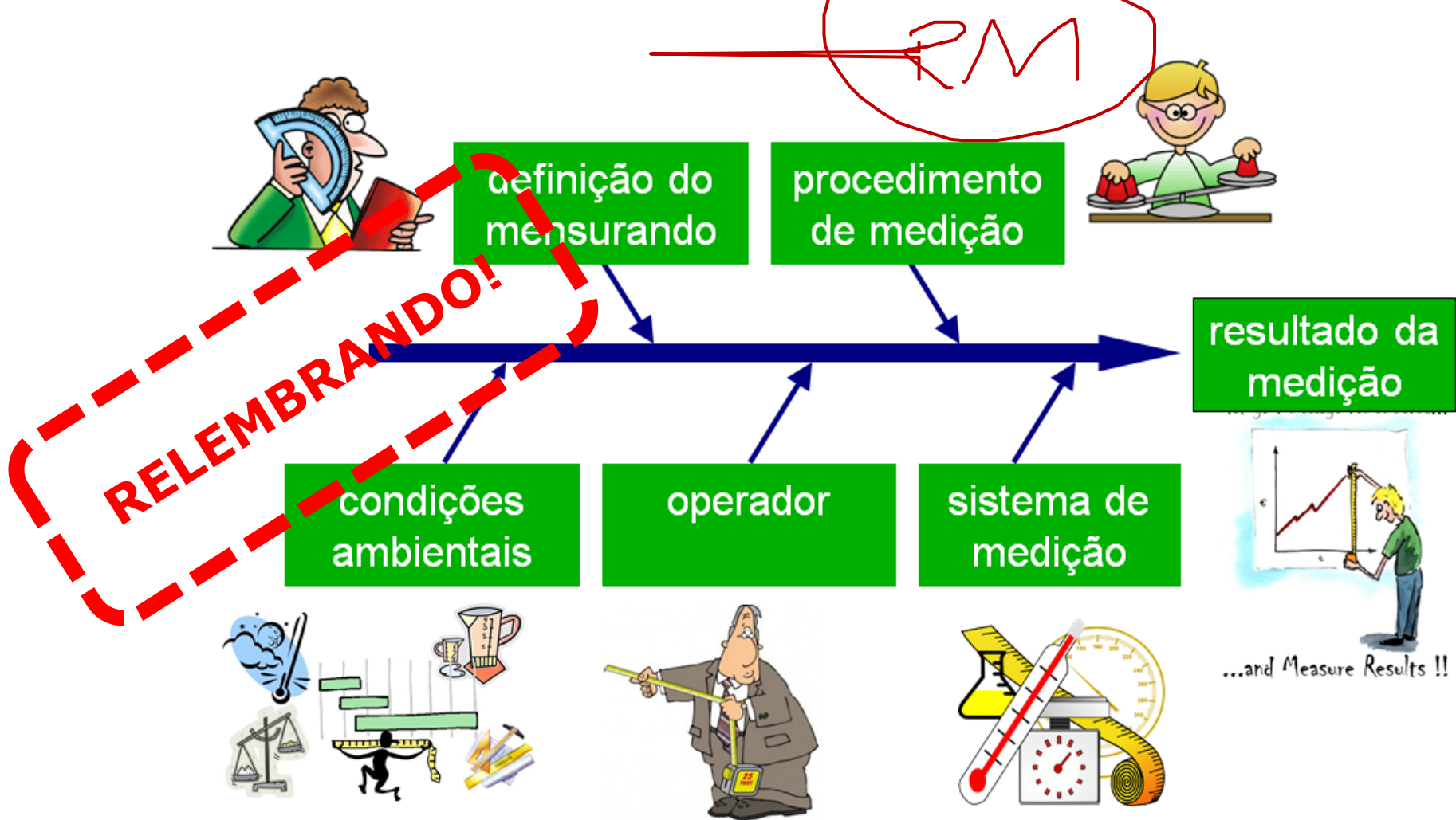
Testes de Materiais	Testes operacionais	Testes geométricos
 <p>Textura</p>	 <p>Força</p>	 <p>Formas</p>
 <p>Fratura</p>	 <p>Momento</p>	 <p>Dimensões</p>
 <p>Dureza</p>	 <p>Rotação</p>	 <p>Localização</p>
 <p>E, G, σ</p>	 <p>Ruído</p>	 <p>Rugosidade</p>

90% dos testes realizados dentro da Metrologia Industrial são Testes Geométricos

RELEMBRANDO!



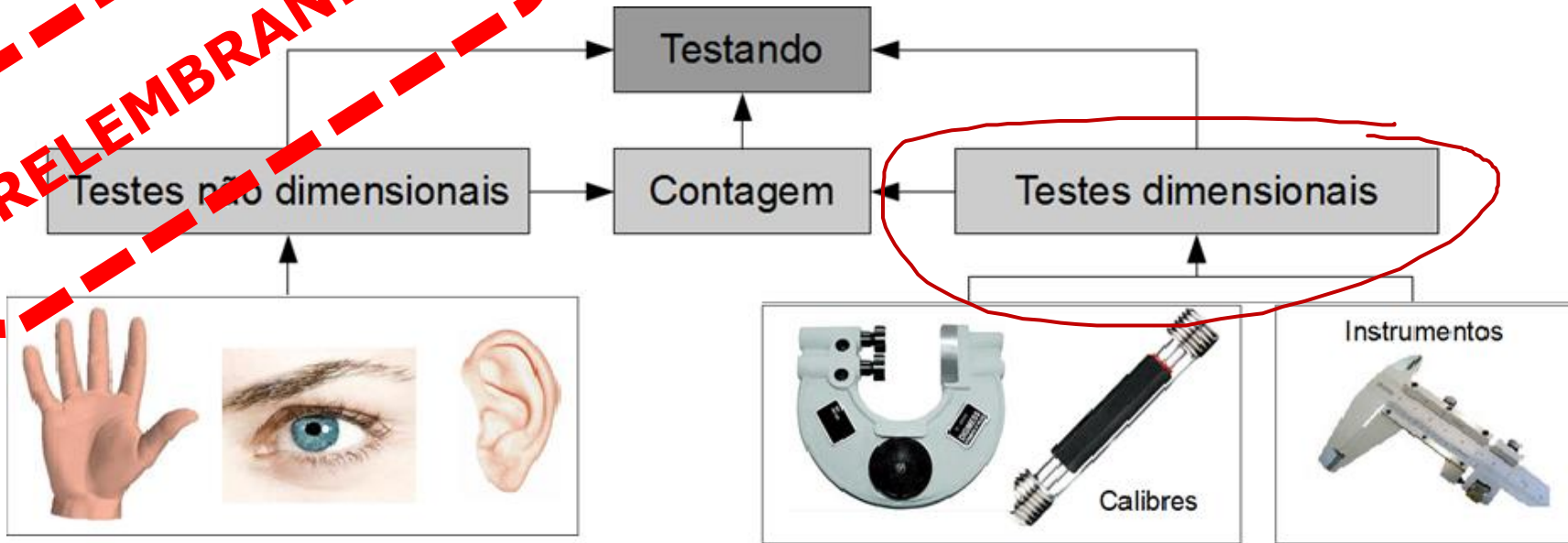
Relações que envolvem a qualidade de medição de uma peça



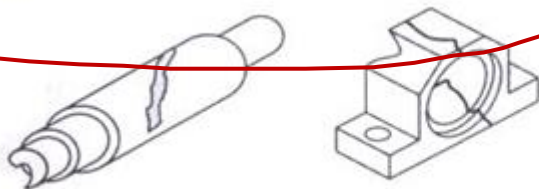


Formas de avaliação e quantificação dos erros de uma peça

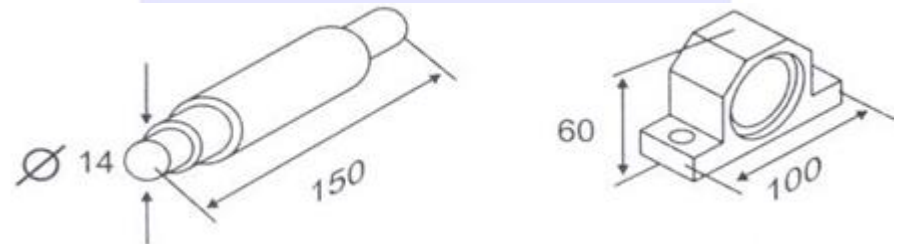
RELEBRANDO!



Considerações qualitativas

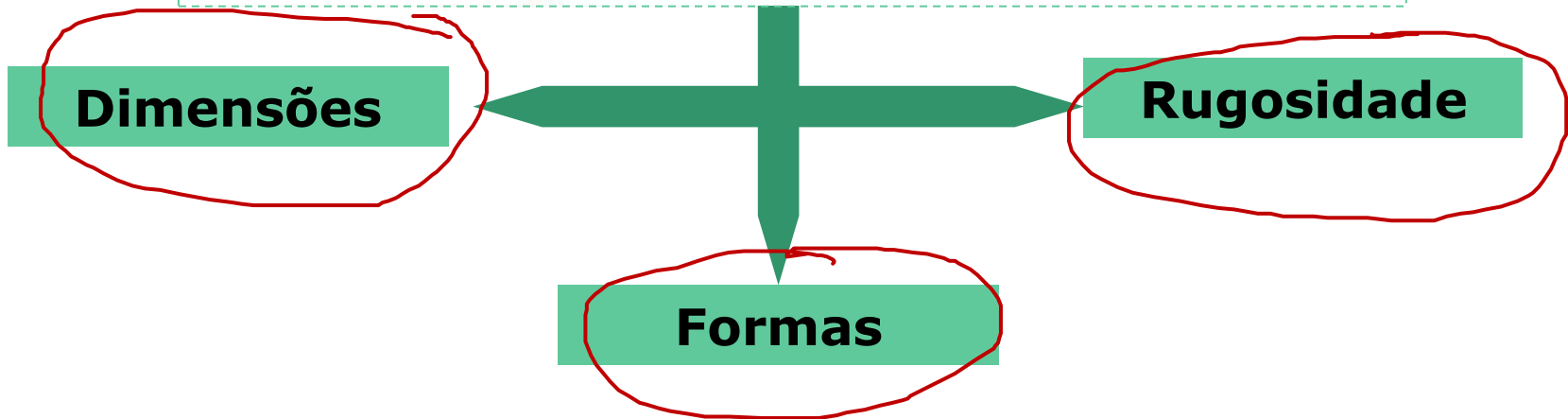
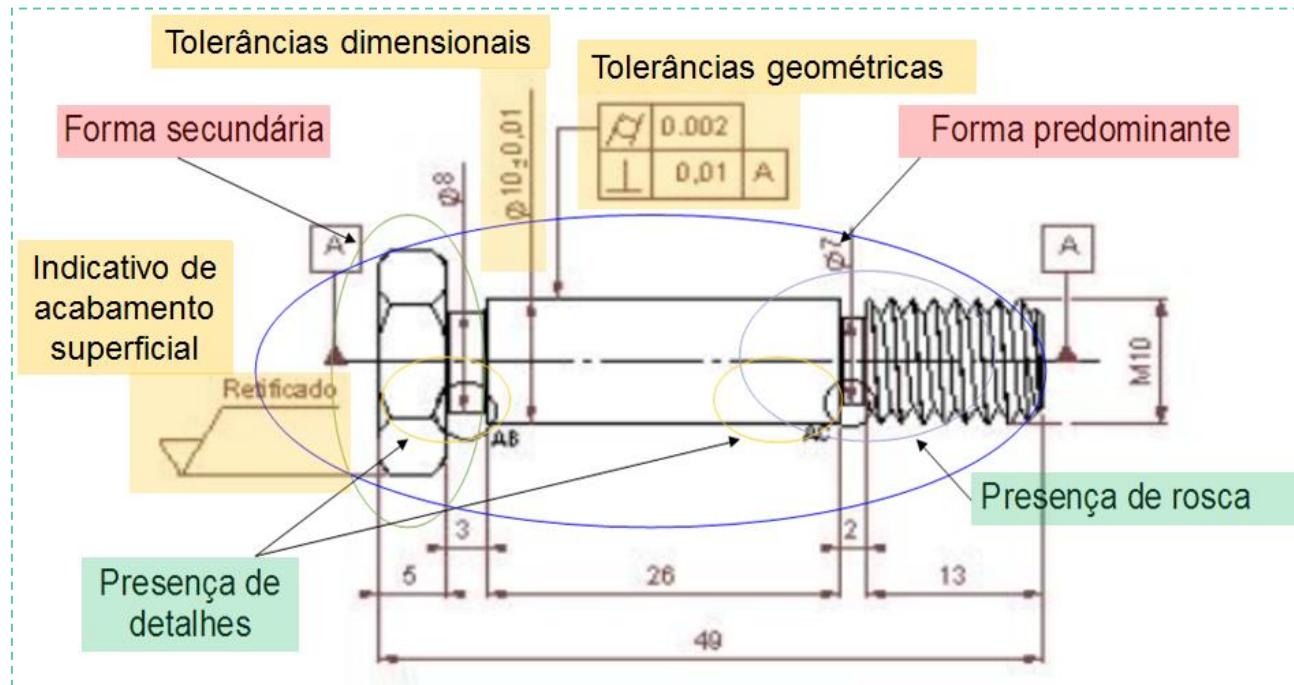


Considerações quantitativas



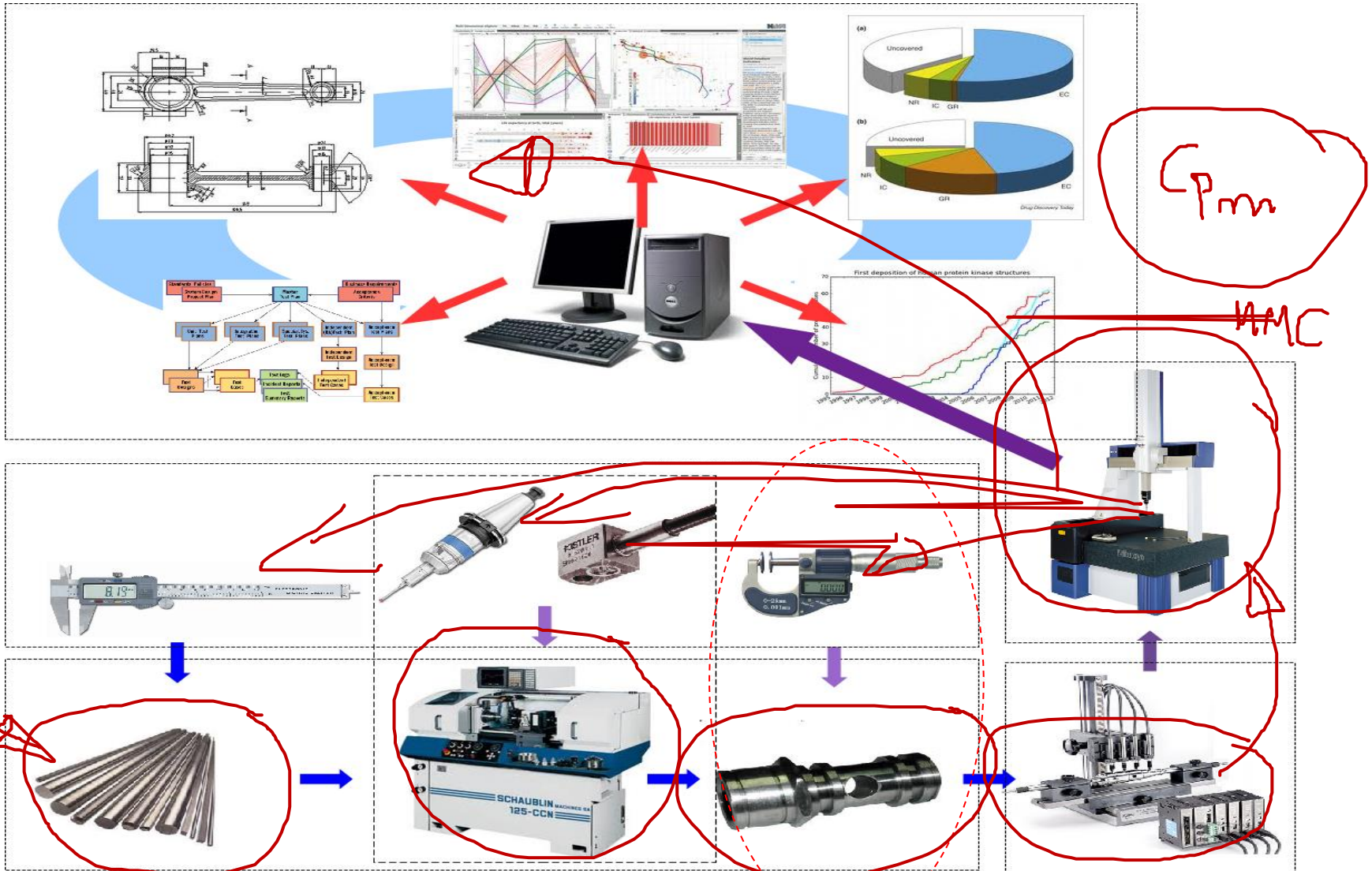


Tipo de medição mais comuns na indústria metal mecânica





Níveis de medição





Visão geral da metrologia industrial

Controle de qualidade clássico:

- assegurar a qualidade perfeita do produto através de testes de qualidade durante ou imediatamente após a produção
- Tradicionalmente estes envolvem todos os aspectos do planejamento dos testes, aquisição de dados e análise de dados

“Qualidade não pode ser testada!”



Definições

- **Resultado de medição**: refere-se ao valor estimado do valor verdadeiro do mensurado, o qual é obtido das medições
- $$R_M = M_M + \text{Erro}$$
- **Elemento de medição**: é um instrumento ou sistema de medição o qual se destina a medir o mensurado.
 - **Calibração**: refere-se a determinação da relação entre o mensurado ou valor esperado fornecido pela medição e o valor verdadeiro, ou valor correto apropriado a grandeza a medir existente.



Definições

- **Ajustagem:** é a operação realizar para alinhar ou posicionar o sistema de medição de forma a eliminar o máximo possível os desvios sistemáticos da medição.
- **Princípio de medição:** constitui-se da forma física da medição
- **Método de medição:** é um prodimento especificado para a medição e independe do princípio de medição
- **Procedimento de medição:** define a aplicação prática dos princípios de medição



Métodos de medições

- Existem dois métodos de medição: método direto e método indireto

Método direto

- Neste a quantidade a ser medida é diretamente comparada com um padrão que tem as mesmas dimensões físicas





Métodos de medições

Método indireto

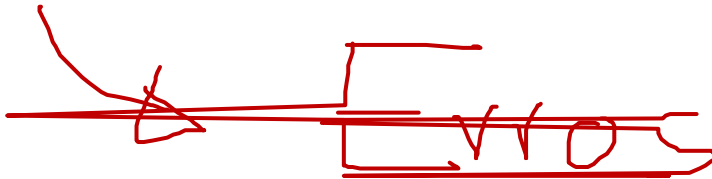
→ Neste a quantidade a ser medida não é quantificada de forma direta, mas é obtida por uma quantidade intermediária proporcional a grandeza a ser medida.





Estratégias de medições

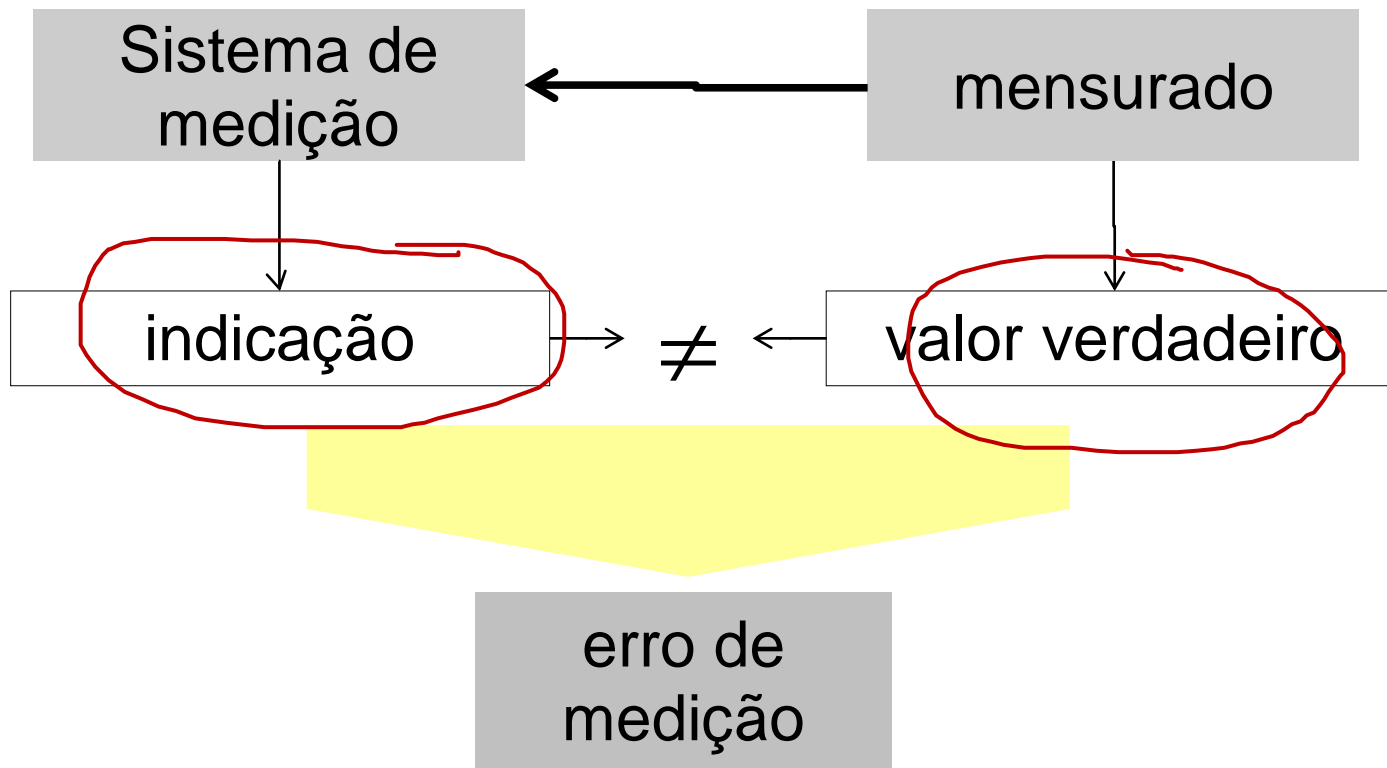
- A seleção dos métodos e procedimentos de medição devem ser feitas de formas a minimizar a influência dos erros, flexibilidade, tempo e custos.





Erros de medições

→ Neste





Incerteza e erros de medições

- Erro máximo - É o maior valor em módulo do erro que pode ser cometido pelo sistema de medição nas condições em que foi avaliado.
- Erro de medição - é o número que resulta da diferença entre a indicação de um sistema de medição e o valor verdadeiro do mensurando.
- Incerteza de medição - é o parâmetro, associado ao resultado de uma medição, que caracteriza a faixa dos valores que podem fundamentadamente ser atribuídos ao mensurando.



Tipos de erros de medições

→ Erro sistemático: é a parcela previsível do erro.

Corresponde ao erro médio.

→ Erro aleatório: é a parcela imprevisível do erro. É o agente que faz com que medições repetidas levem a distintas indicações.

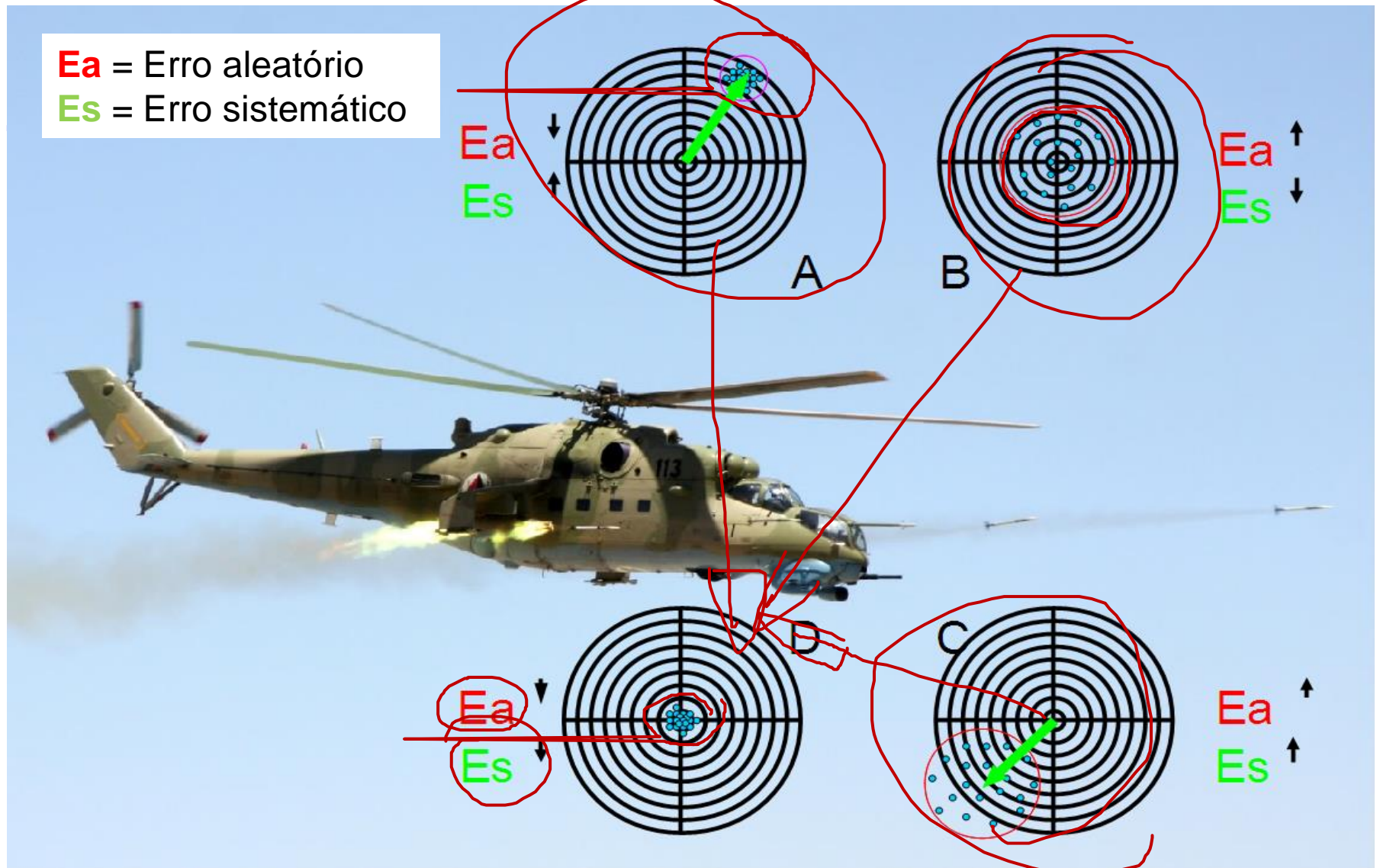


Exatidão e precisão

- São parâmetros qualitativos associados ao desempenho de um sistema.
- Um sistema com ótima precisão repete bem, com pequena dispersão.
- Um sistema com excelente exatidão praticamente não apresenta erros.

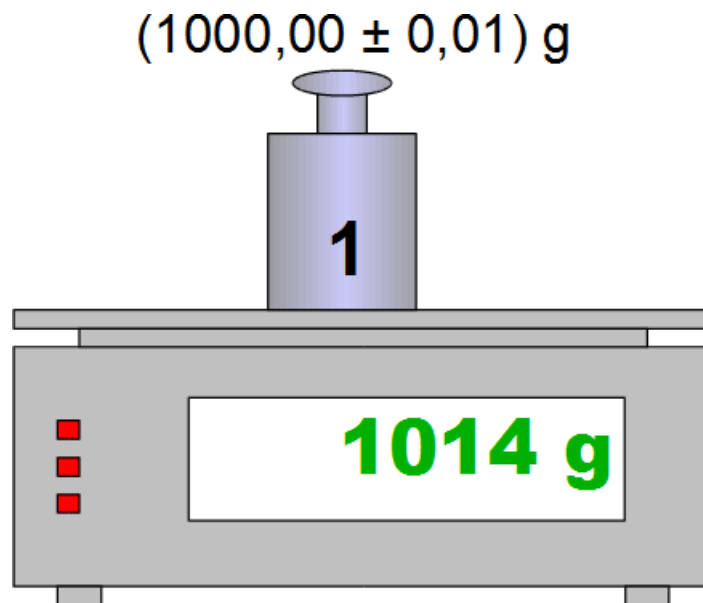


Erros de medições





Erros de medição



$$E = I - VVC$$

$$E = 1014 - 1000$$

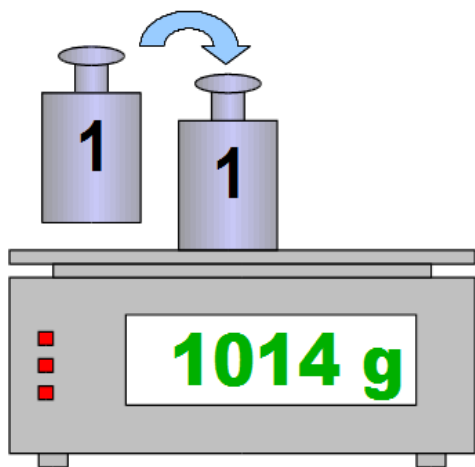
$$E = + 14 \text{ g}$$

O sistema de
Medição (balança)
Indica a mais do que
deveria!



Erros de medição

$(1000,00 \pm 0,01) \text{ g}$



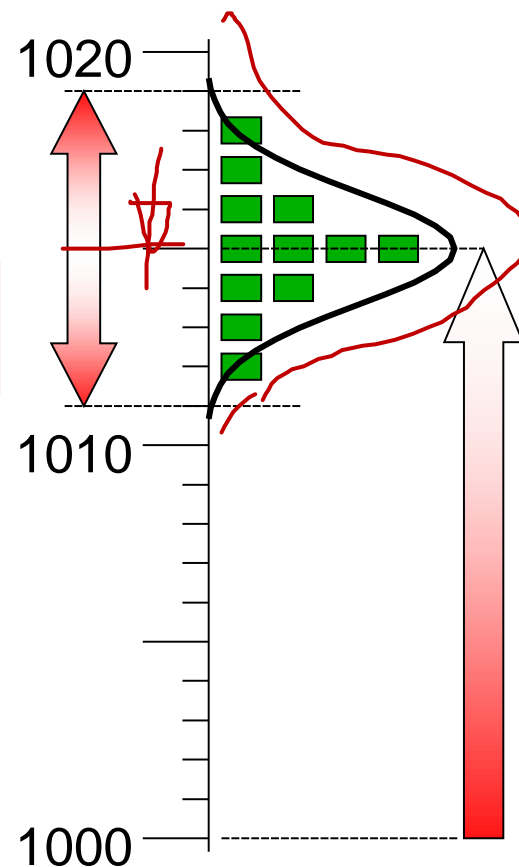
$$E = I - VVC$$

$$E = 1014 - 1000$$

$$E = +14 \text{ g}$$

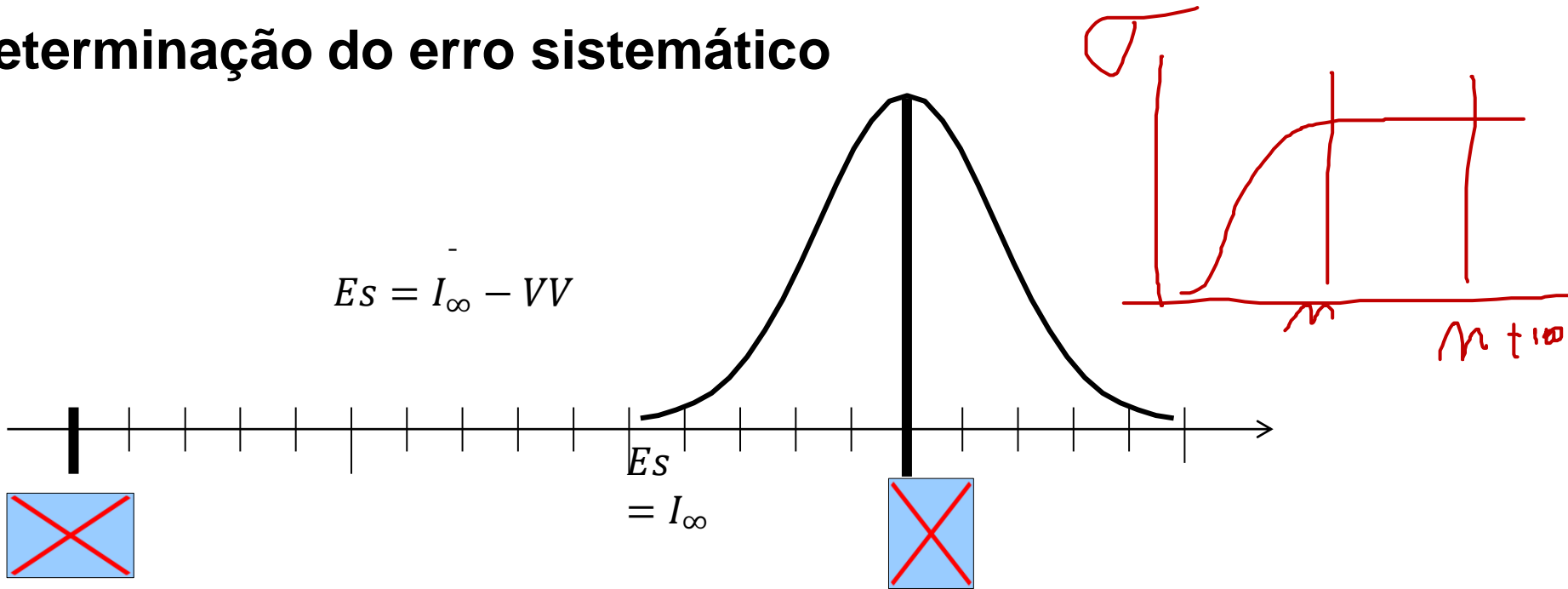
O sistema de Medição (balança) Indica a mais do que deveria!

- 1012 g
- 1015 g
- 1018 g
- 1014 g
- 1017 g
- 1015 g
- 1016 g
- 1014 g
- 1010 g
- 1013 g
- 1016 g
- 1015 g





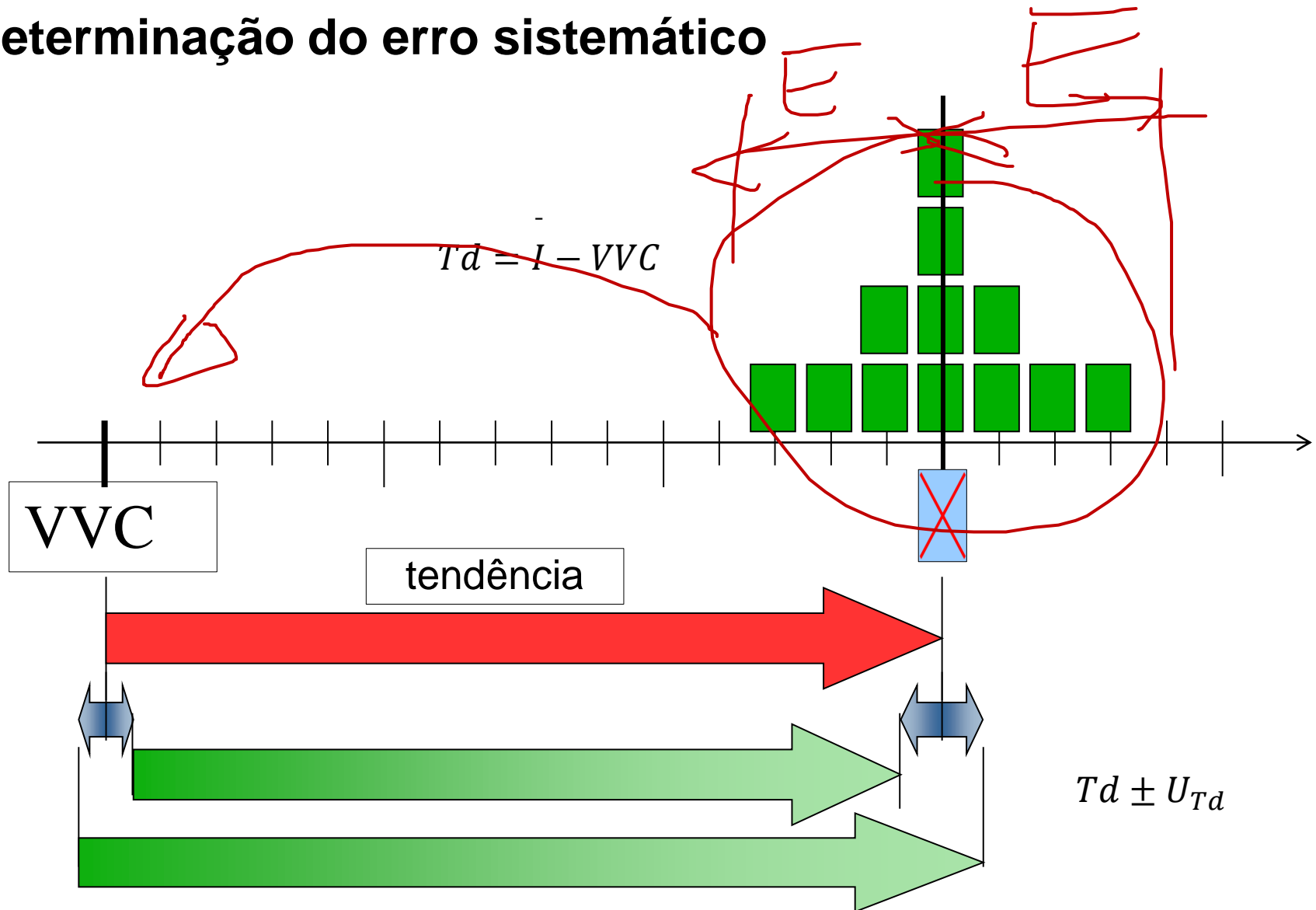
Determinação do erro sistemático



condições: {
 média de infinitas indicações
 valor verdadeiro conhecido exatamente



Determinação do erro sistemático





Erro sistemático, tendências e correções

Definições

→ Tendência (T_d)

- é uma estimativa do Erro Sistemático

→ Valor Verdadeiro Convencional (VVC)

- é uma estimativa do valor verdadeiro

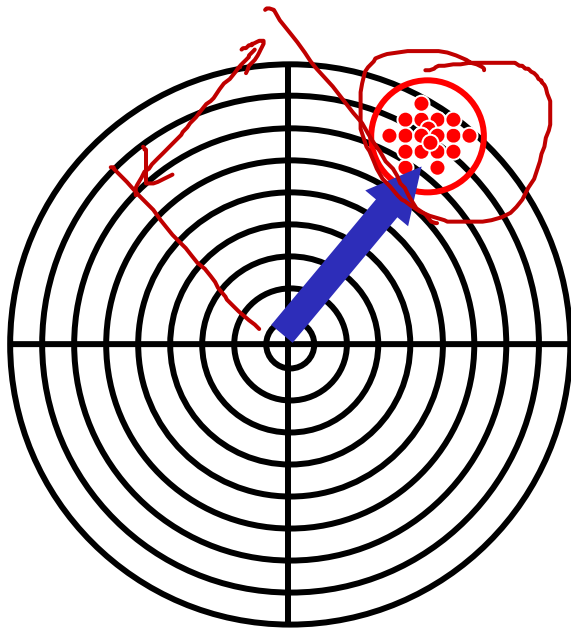
→ Correção (C)

- é a constante que, ao ser adicionada à indicação, compensa os erros sistemáticos
- é igual à tendência com sinal trocado

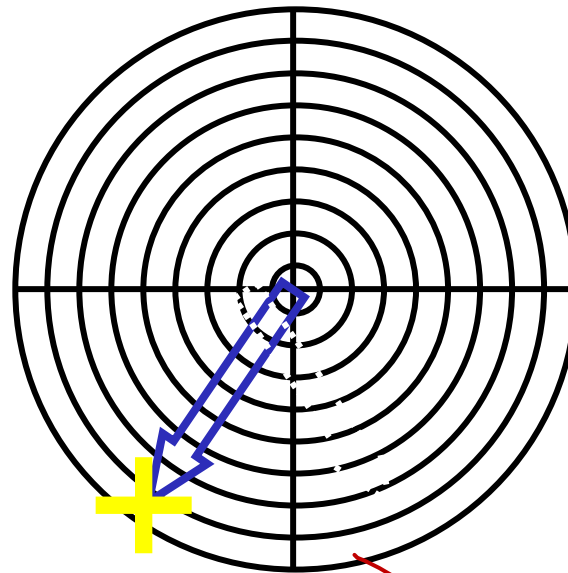


Correções dos erros sistemáticos

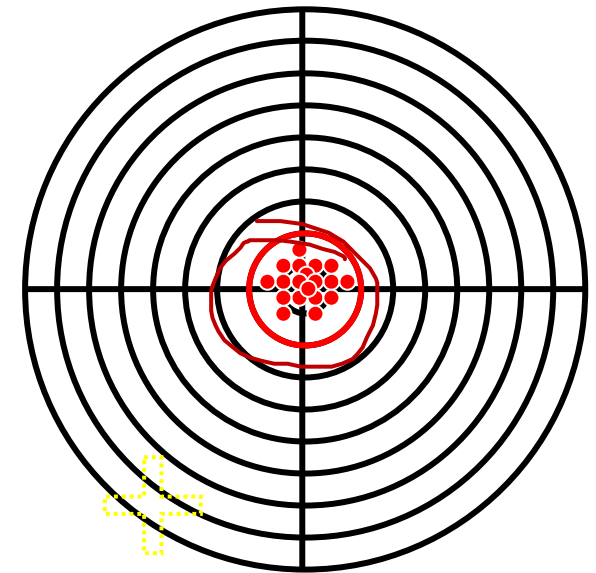
→



T_d



$C = -T_d$





Indicação corrigida

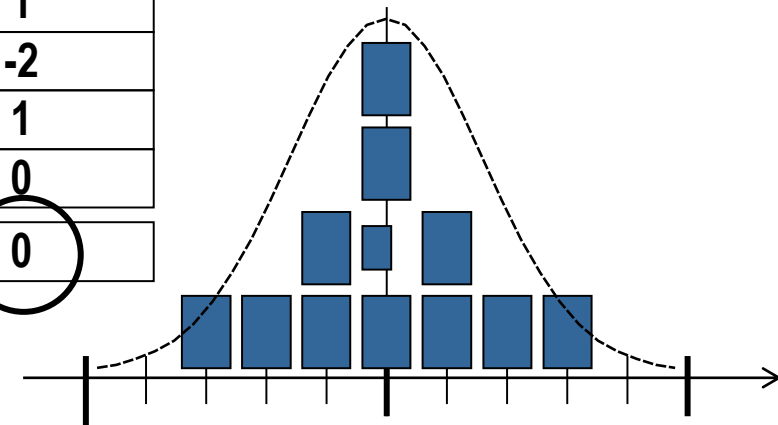
Nº	I	C	Ic	Ea
1	1014	-15	999	-1
2	1015	-15	1000	0
3	1017	-15	1002	2
4	1012	-15	997	-3
5	1015	-15	1000	0
6	1018	-15	1003	3
7	1014	-15	999	-1
8	1015	-15	1000	0
9	1016	-15	1001	1
10	1013	-15	998	-2
11	1016	-15	1001	1
12	1015	-15	1000	0
média	1015	-15	1000	0

$$C = -Td$$

$$C = VVC - I$$

$$C = 1000 - 1015$$

$$C = -15 \text{ g}$$





Erro aleatório, incerteza padrão e repetitividade

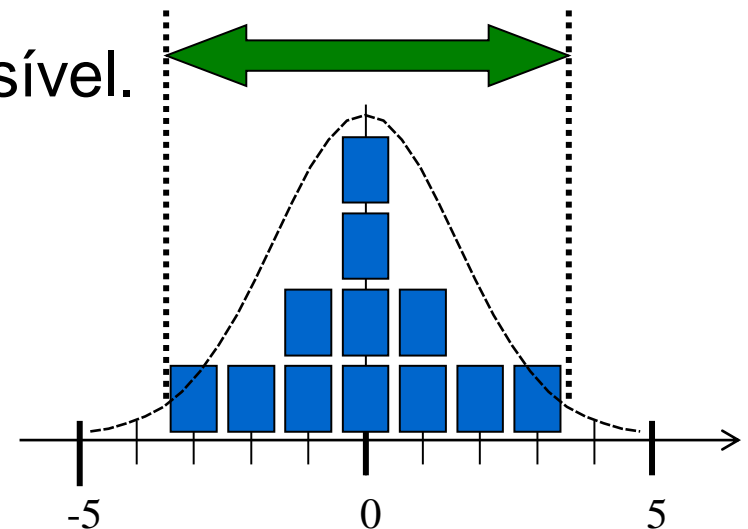
→ Erro aleatório e repetitividade

$$Ea_i = I_i - \bar{I}$$

→ O valor do erro aleatório é imprevisível.

→ A repetitividade define a faixa dentro da qual espera-se que o erro aleatório esteja contido

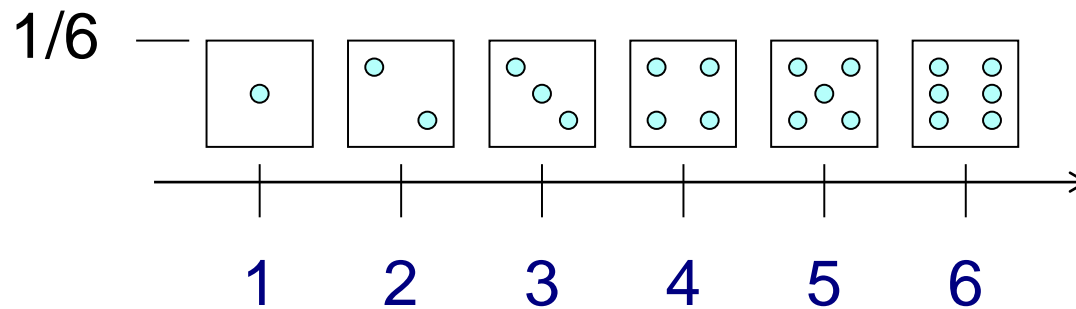
→ O valor do erro aleatório é imprevisível.



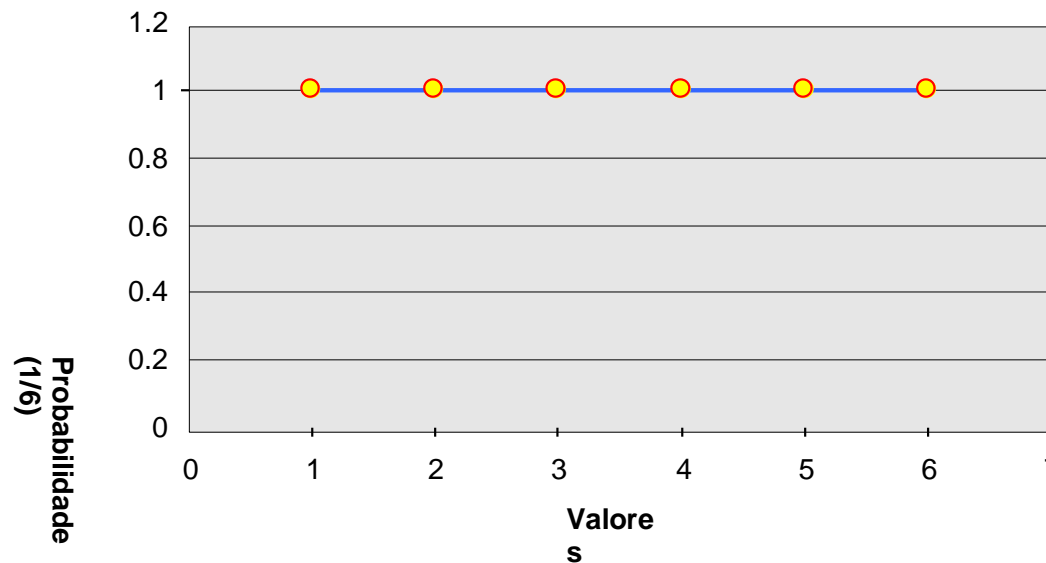


Distribuição de probabilidade uniforme ou retangular

→ probabilidade



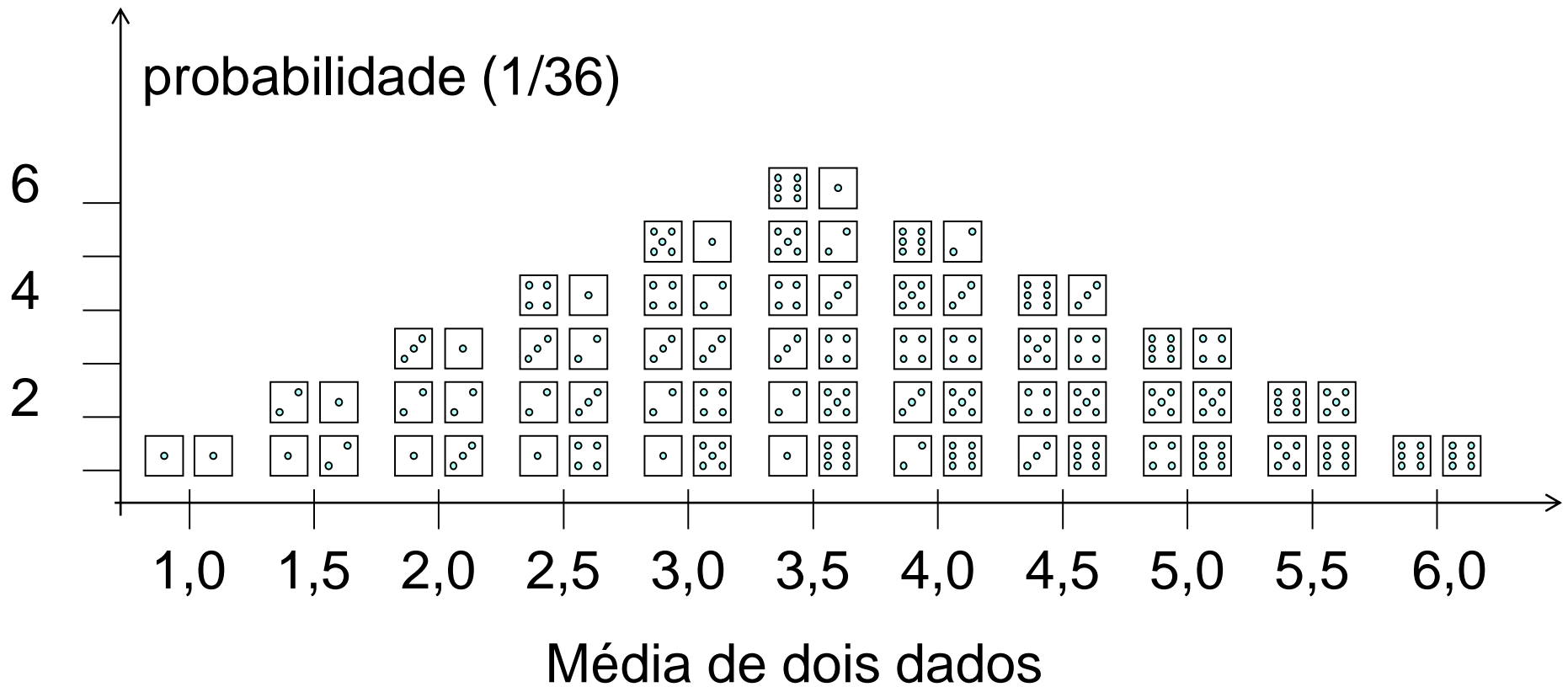
Lançamento de um dado





Distribuição de probabilidade triangular

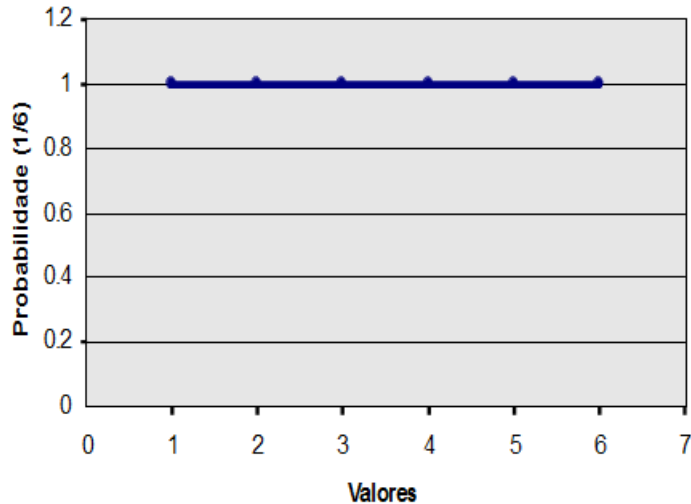
→ probabilidade



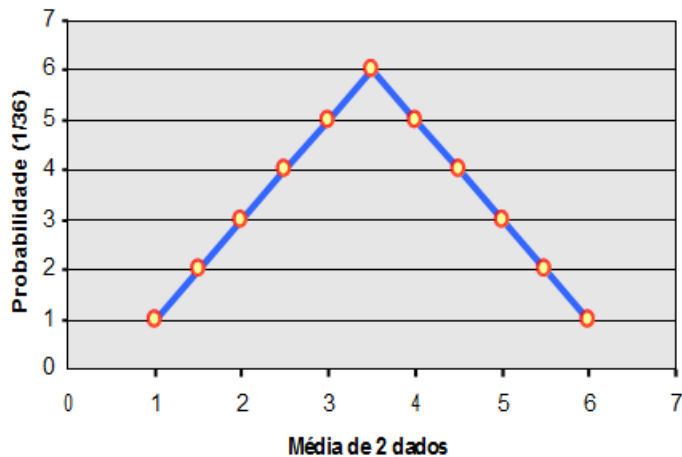


Distribuição de probabilidade triangular

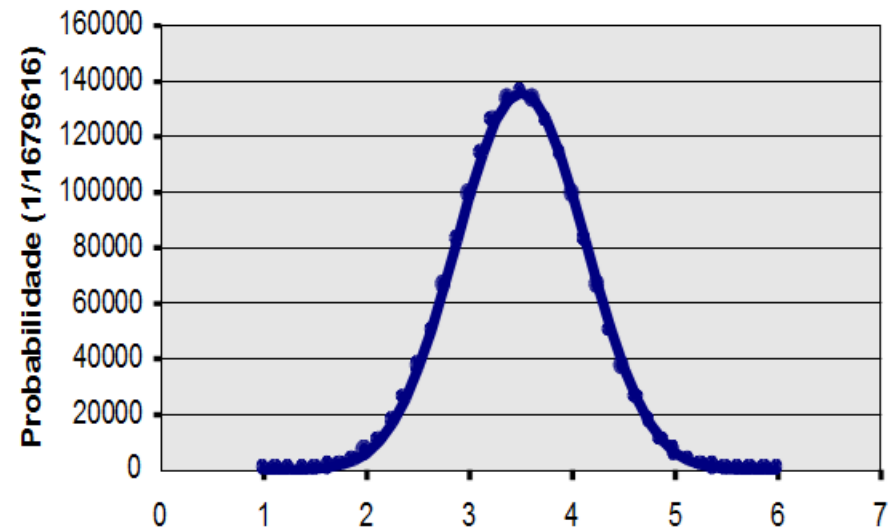
→ Média de 1 dado



→ Média de 2 dados



→ Média de 8 dados



Para n dados

Distribuição Gaussiana

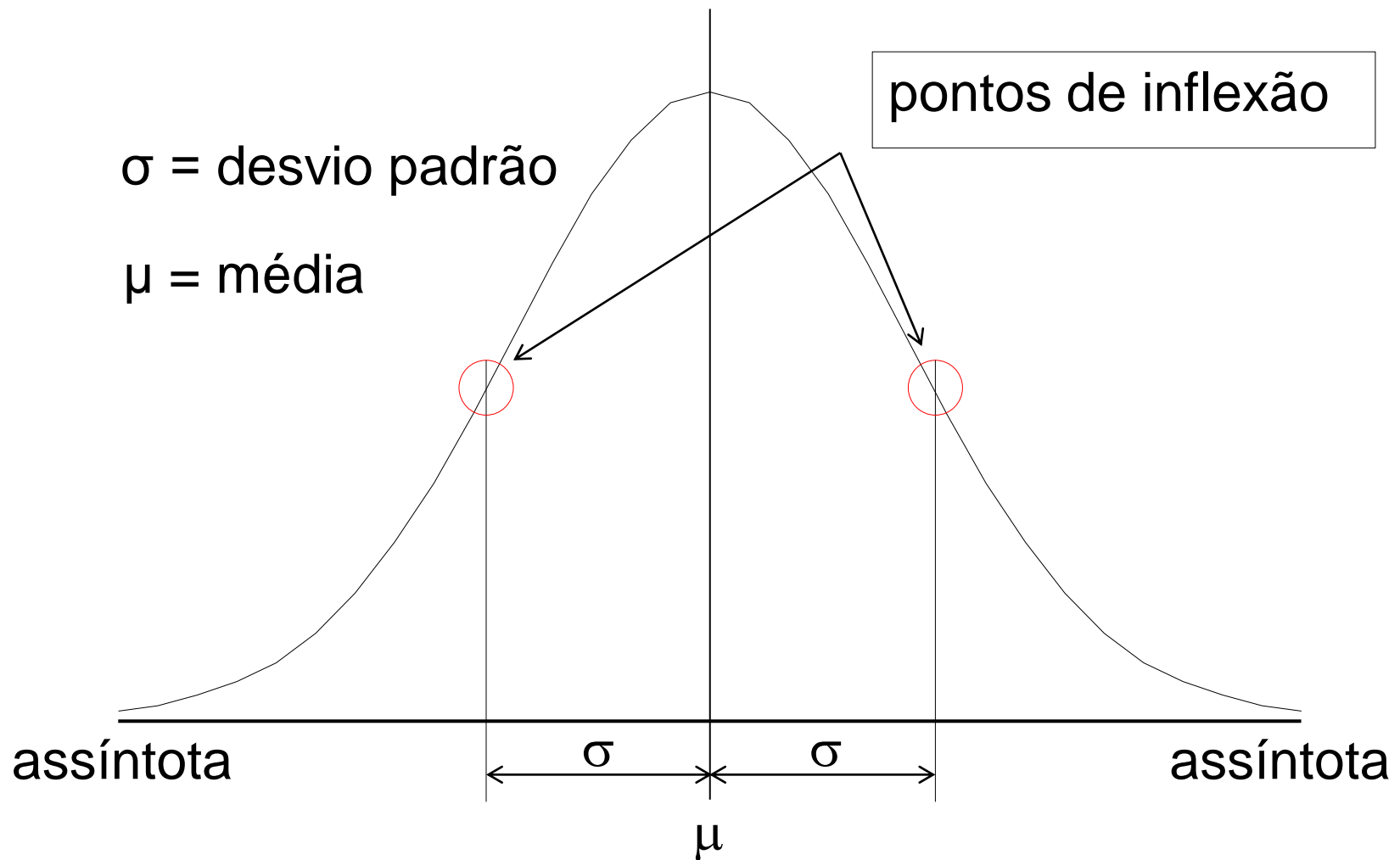


Teorema central do limite

→ *Quanto mais variáveis aleatórias forem combinadas, tanto mais o comportamento da combinação se aproximará do comportamento de uma distribuição normal (ou gaussiana).*

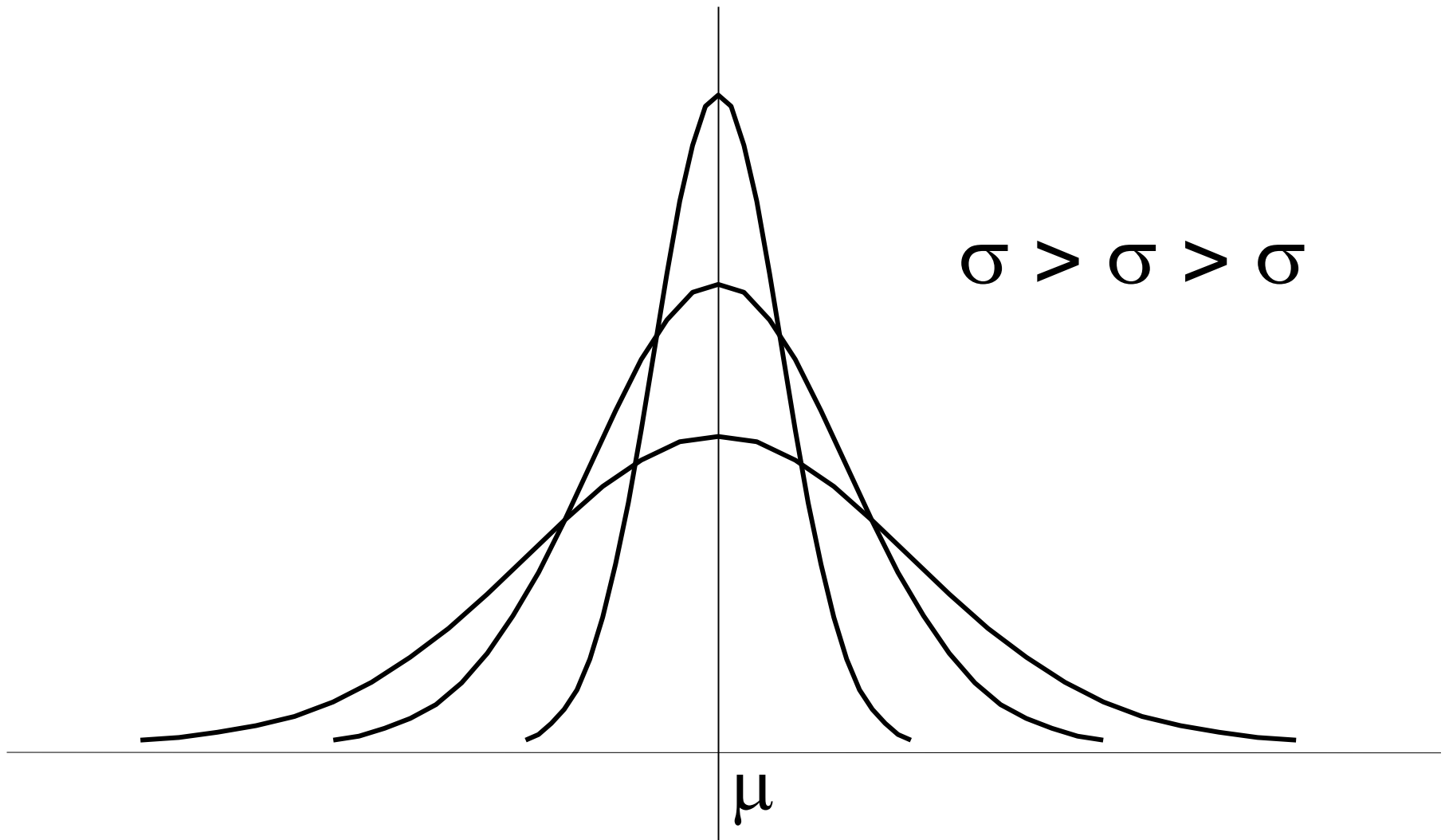


Curva normal





Efeito do desvio padrão





Cálculo e estimativa do desvio padrão

cálculo exato:
(da população)

$$\sigma = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{\sum_{i=1,n} (I_i - \bar{I})^2}{n}}$$

estimativa:
(da amostra)

$$s = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{\sum_{i=1,n} (I_i - \bar{I})^2}{n - 1}}$$

I_i	i-ésima indicação
\bar{I}	média das "n" indicações
n	número de medições repetitivas efetuadas



Incerteza padrão (u)

→ medida da intensidade da componente aleatória do erro de medição.

•corresponde à estimativa do desvio padrão da distribuição dos erros de medição.

• $u = s$

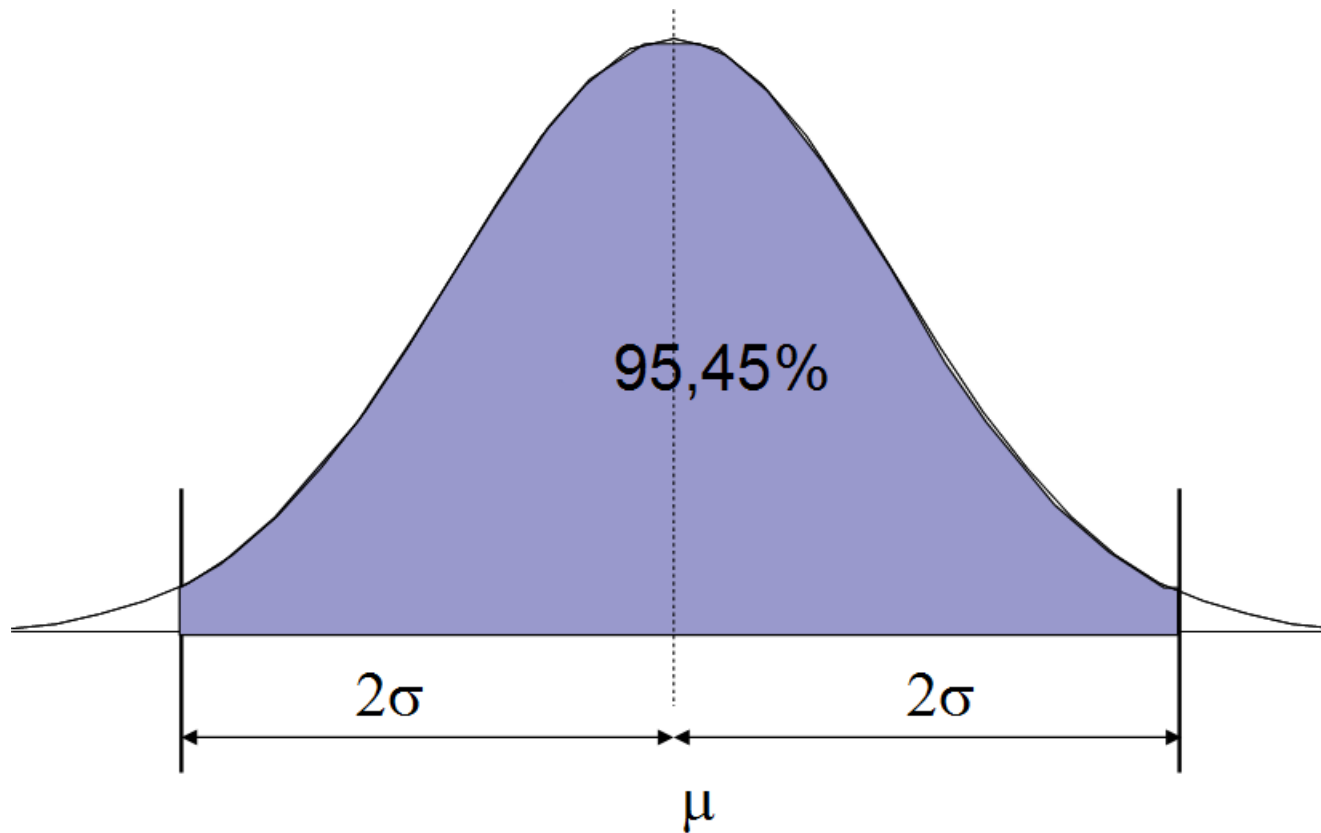
Graus de liberdade (v)

→ corresponde ao número de medições repetidas menos um.

• $v = n - 1$



Área sobre a curva normal





Estimativa da repetitividade - para 95,45 % de probabilidade

A repetitividade define a faixa dentro da qual, para uma dada probabilidade, o erro aleatório é esperado.

Para amostras infinitas:

$$Re = 2 \cdot \sigma$$

Para amostras finitas:

$$Re = t \cdot u$$

Sendo “t” o coeficiente de Student para $\nu = n - 1$ graus de liberdade.

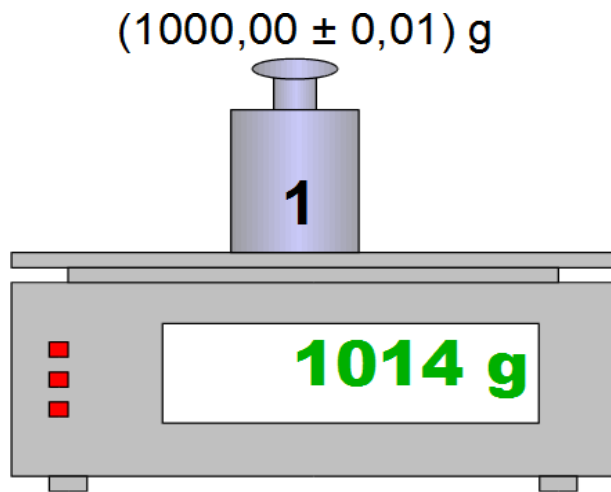


Coeficiente “t” de Student

n	t	n	t	n	t	n	t
1	13,968	10	2,284	19	2,140	80	2,032
2	4,527	11	2,255	20	2,133	90	2,028
3	3,307	12	2,231	25	2,105	100	2,025
4	2,869	13	2,212	30	2,087	150	2,017
5	2,649	14	2,195	35	2,074	200	2,013
6	2,517	15	2,181	40	2,064	1000	2,003
7	2,429	16	2,169	50	2,051	10000	2,000
8	2,366	17	2,158	60	2,043	100000	2,000
9	2,320	18	2,149	70	2,036	∞	2,000



Estimativa da repetitividade



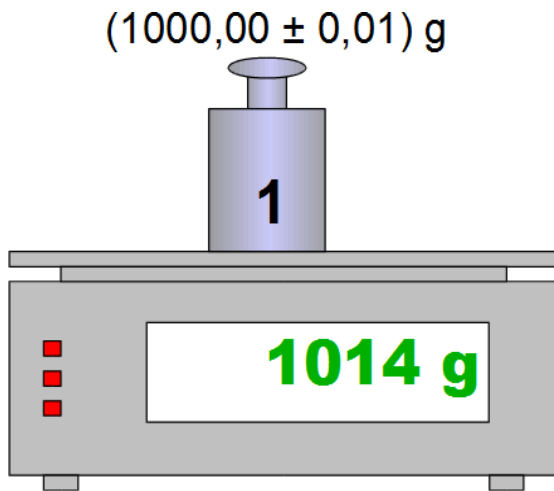
1014 g
1015 g
1017 g
1012 g
1015 g
1018 g
1014 g
1015 g
1016 g
1013 g
1016 g
1015 g

$$u = \sqrt{\frac{\sum_{i=1,12} (I_i - 1015)^2}{12 - 1}}$$

$$u = 1,65 \text{ g}$$



Estimativa da repetitividade



1014 g	1014 g
1015 g	1015 g
1017 g	1016 g
1012 g	1013 g
1015 g	1016 g
1018 g	1015 g

$$u = \sqrt{\frac{\sum_{i=1,12} (I_i - 1015)^2}{12 - 1}}$$

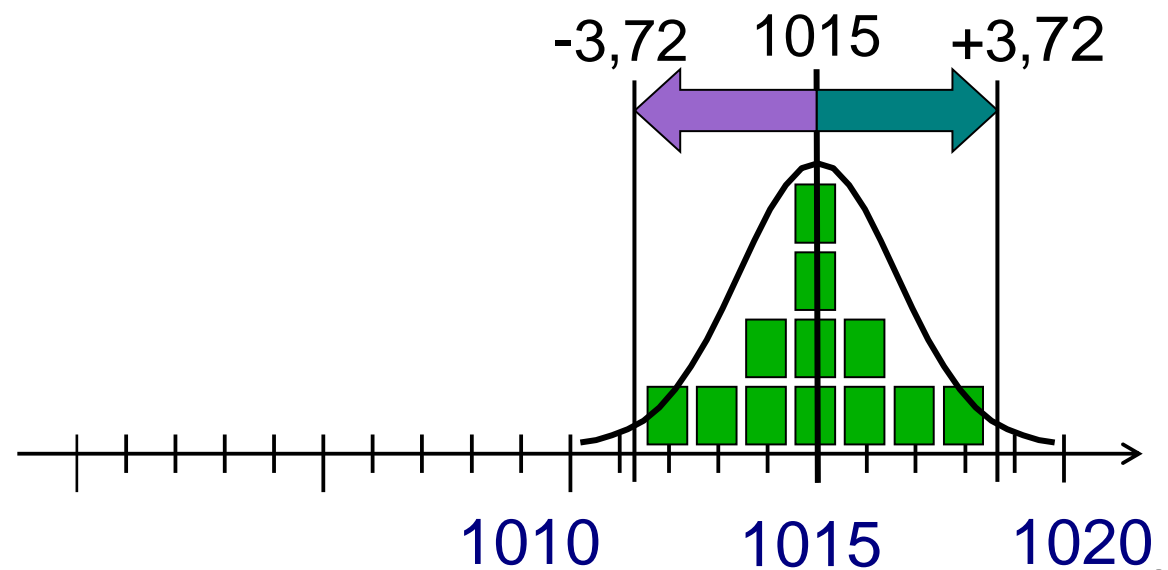
$$u = 1,65 \text{ g}$$

$$v = 12 - 1 = 11$$

$$t = 2,255$$

$$Re = 2,255 \cdot 1,65$$

$$Re = 3,72 \text{ g}$$





Efeitos da média de medições repetidas sobre o erro de medição

→ Efeito sobre os erros sistemáticos:

• Como o erro sistemático já é o erro médio, nenhum efeito é observado.

→ Efeitos sobre os erros aleatórios

• A média reduz a intensidade dos erros aleatórios, a repetitividade e a incerteza padrão na seguinte proporção:

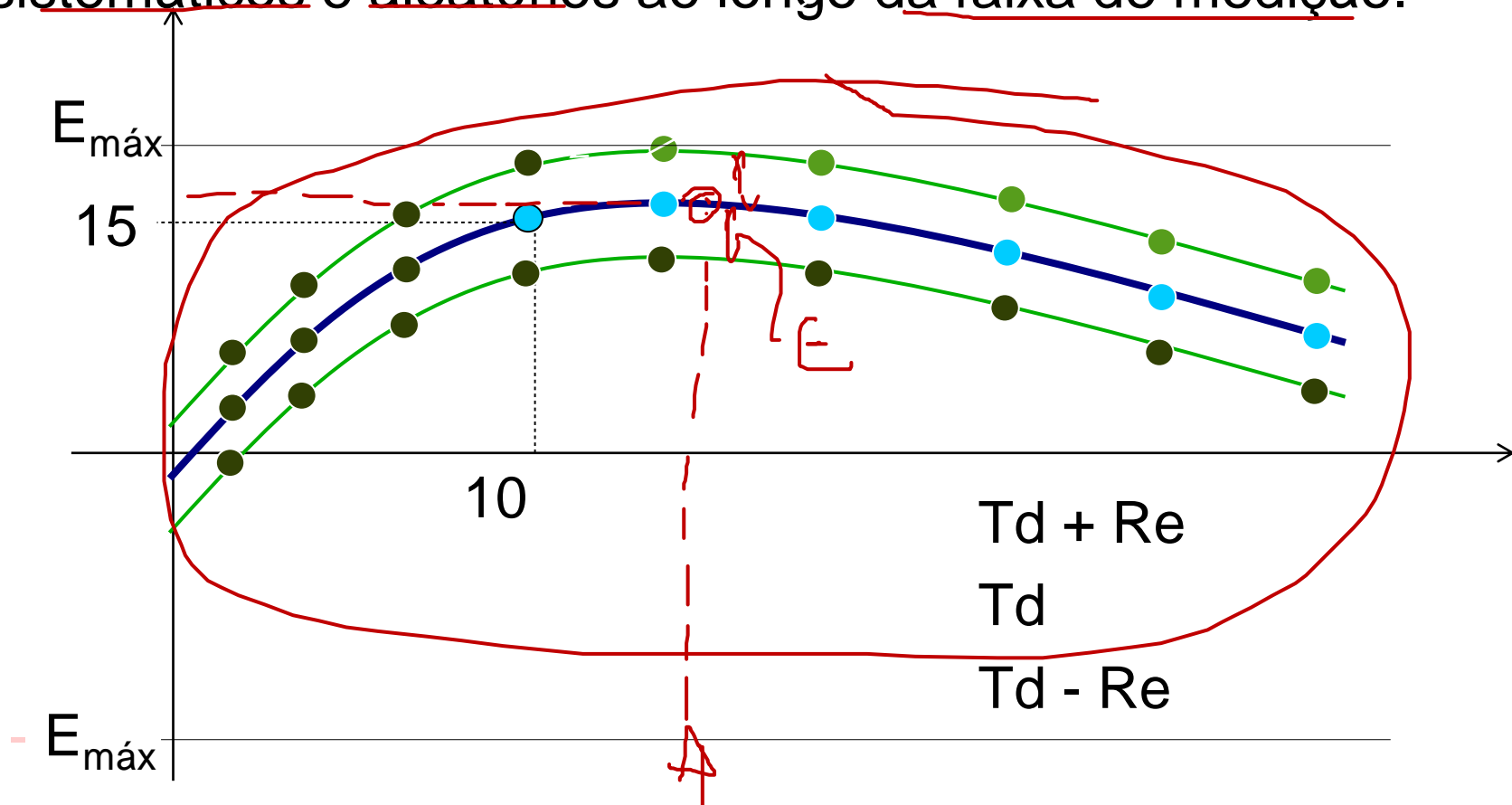
$$Re_I = \frac{R \cdot e_I}{\sqrt{n}}$$

$$u_I = \frac{u_I}{\sqrt{n}}$$



Curva de erros

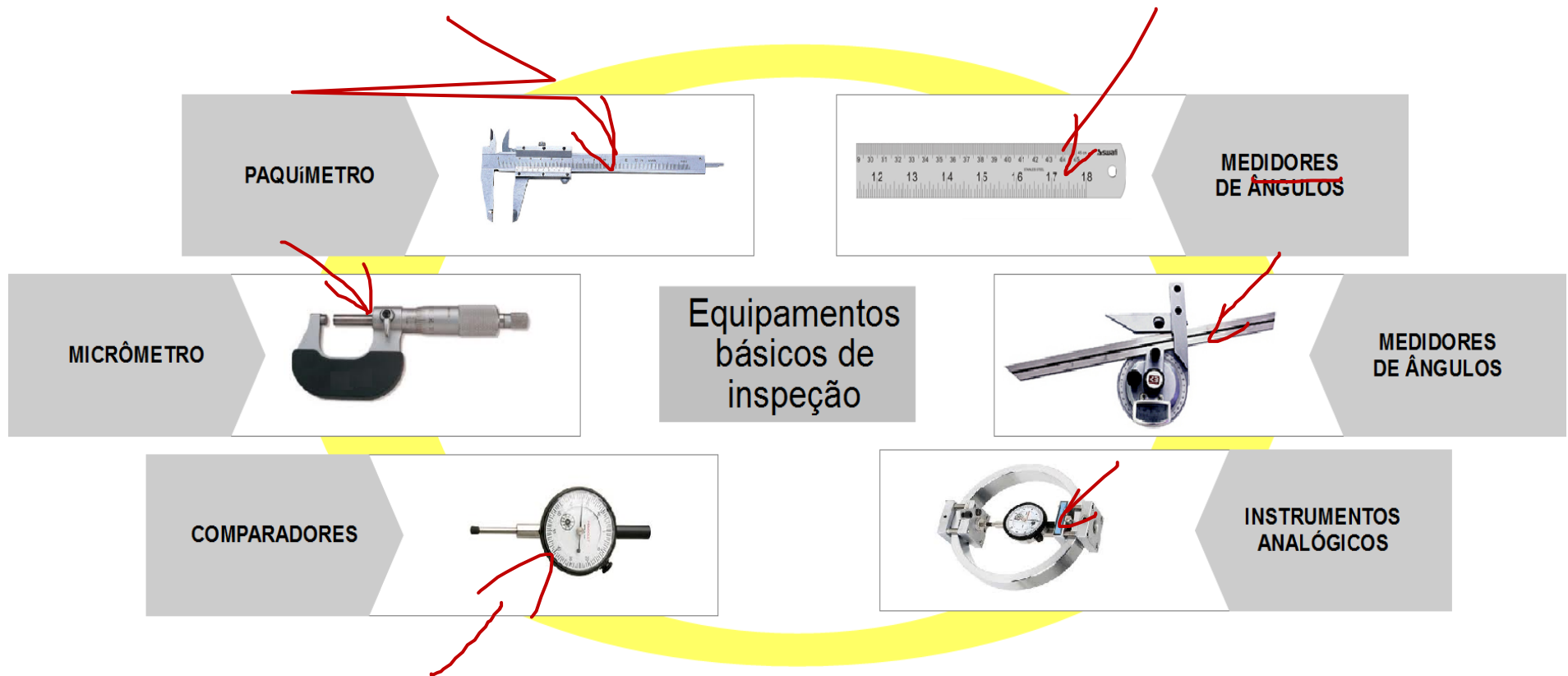
→ É o gráfico que representa a distribuição dos erros sistemáticos e aleatórios ao longo da faixa de medição.





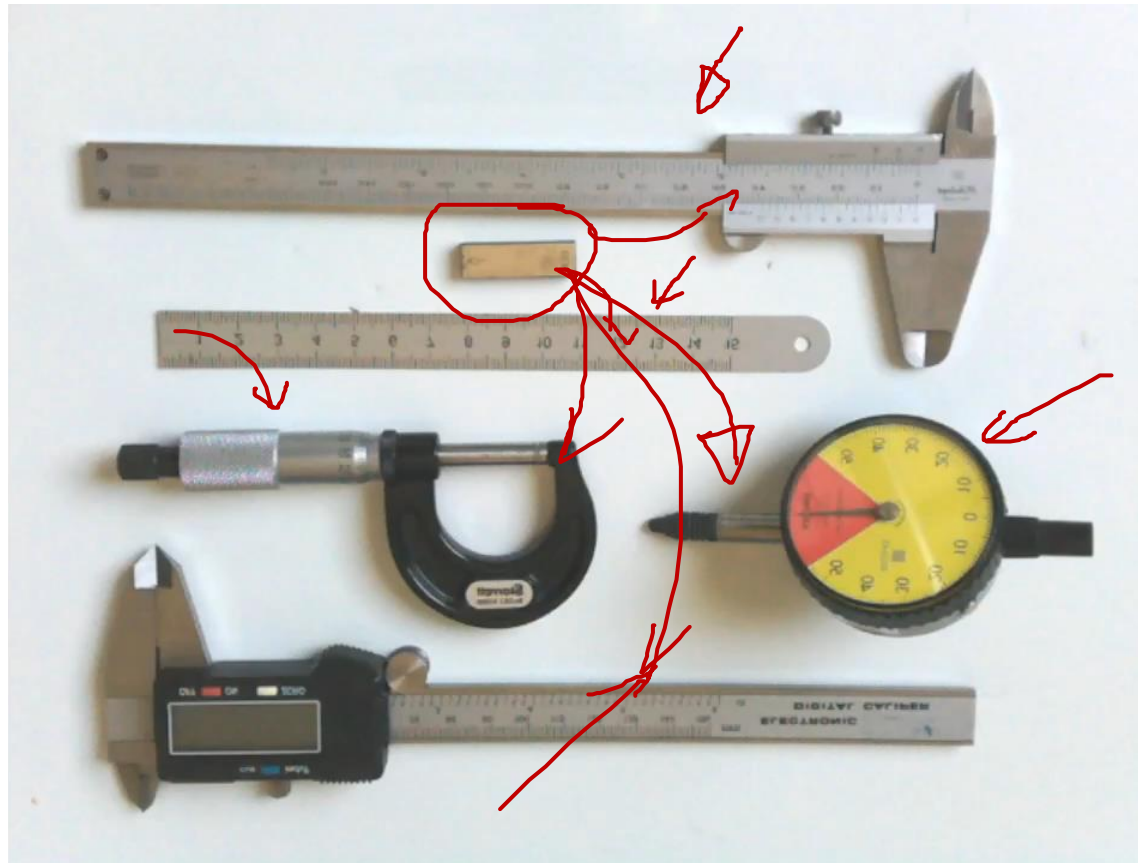
Equipamentos básicos de medição

→ Instrumentos manuais



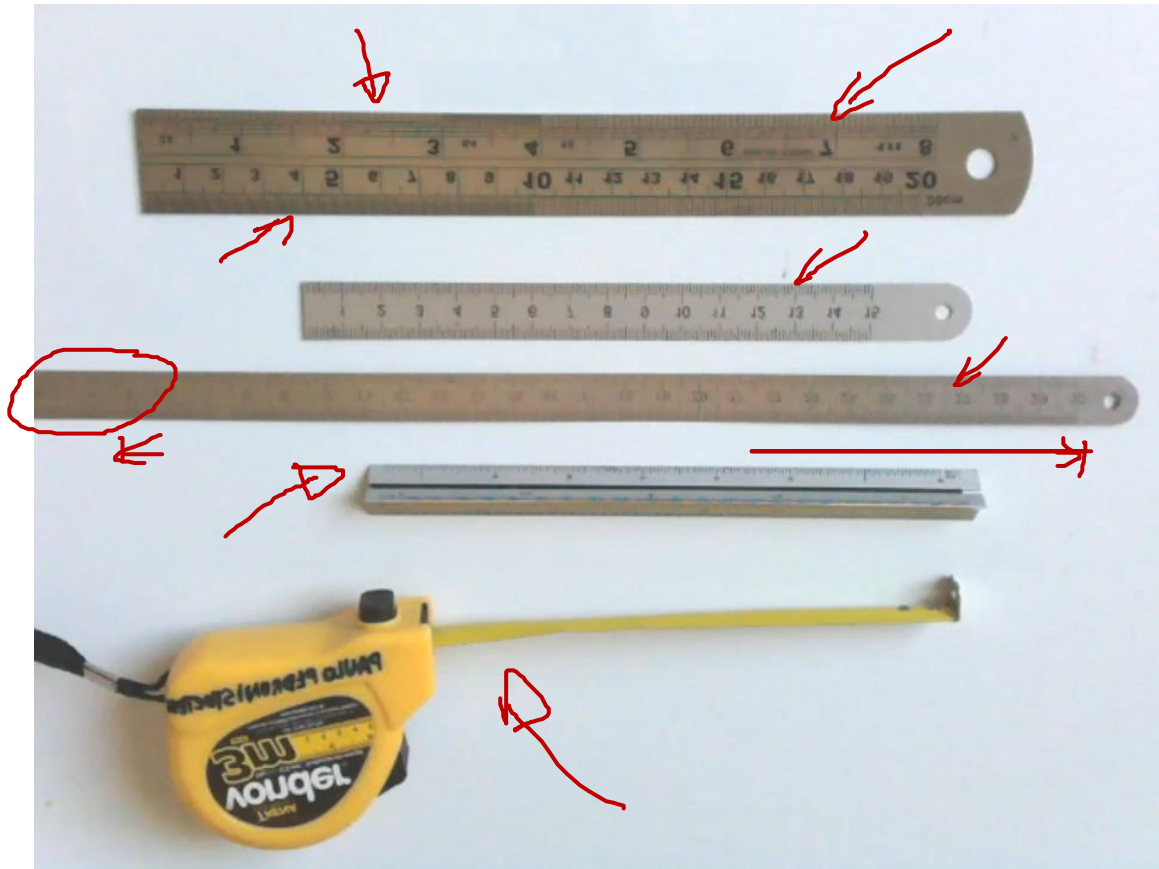


Apresentação dos instrumentos básicos da metrologia industrial





Apresentação dos instrumentos básicos da metrologia industrial





Instrumentos básicos da metrologia industrial

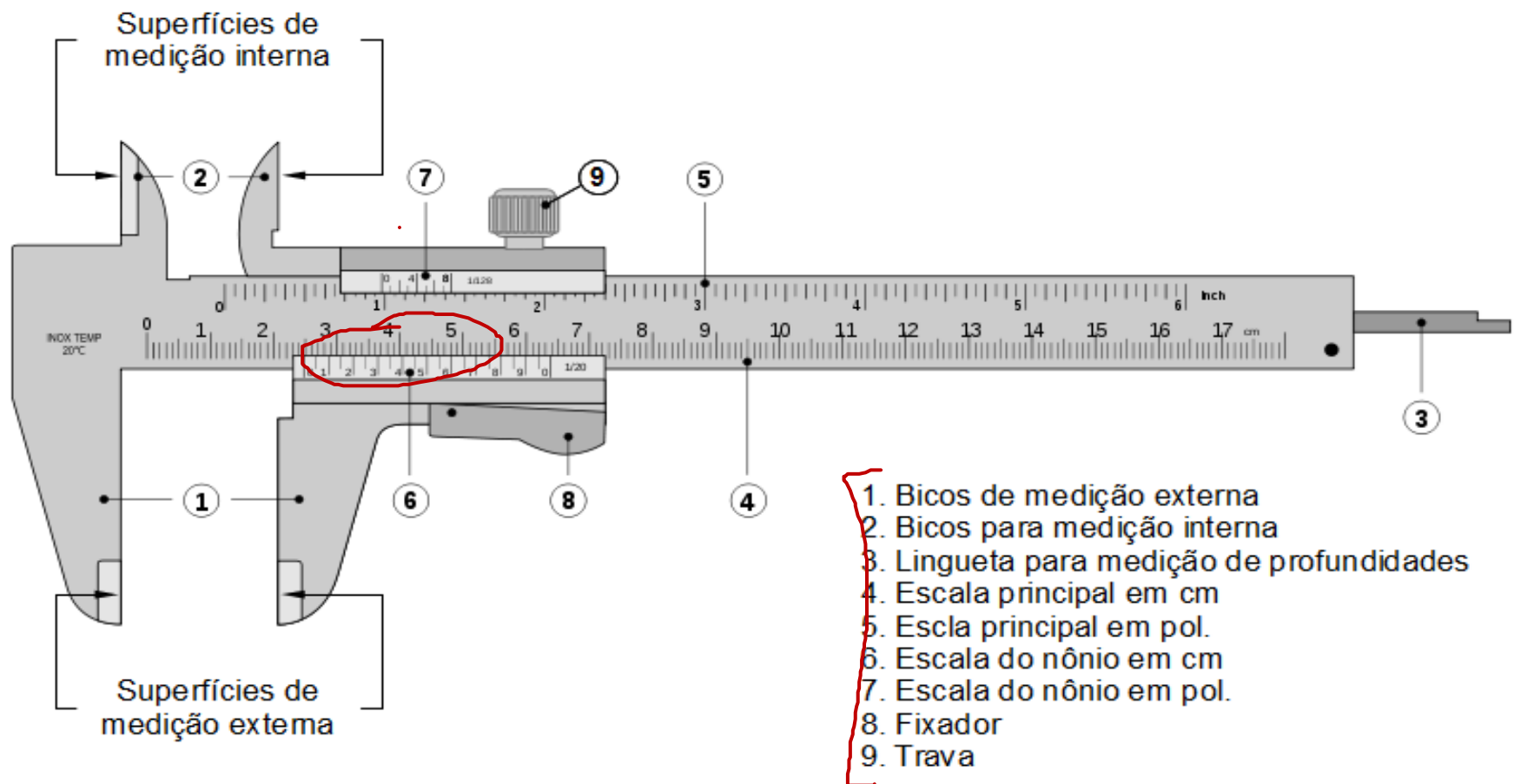
Paquímetros





Instrumentos básicos da metrologia industrial

→ Paquímetros – Características construtivas





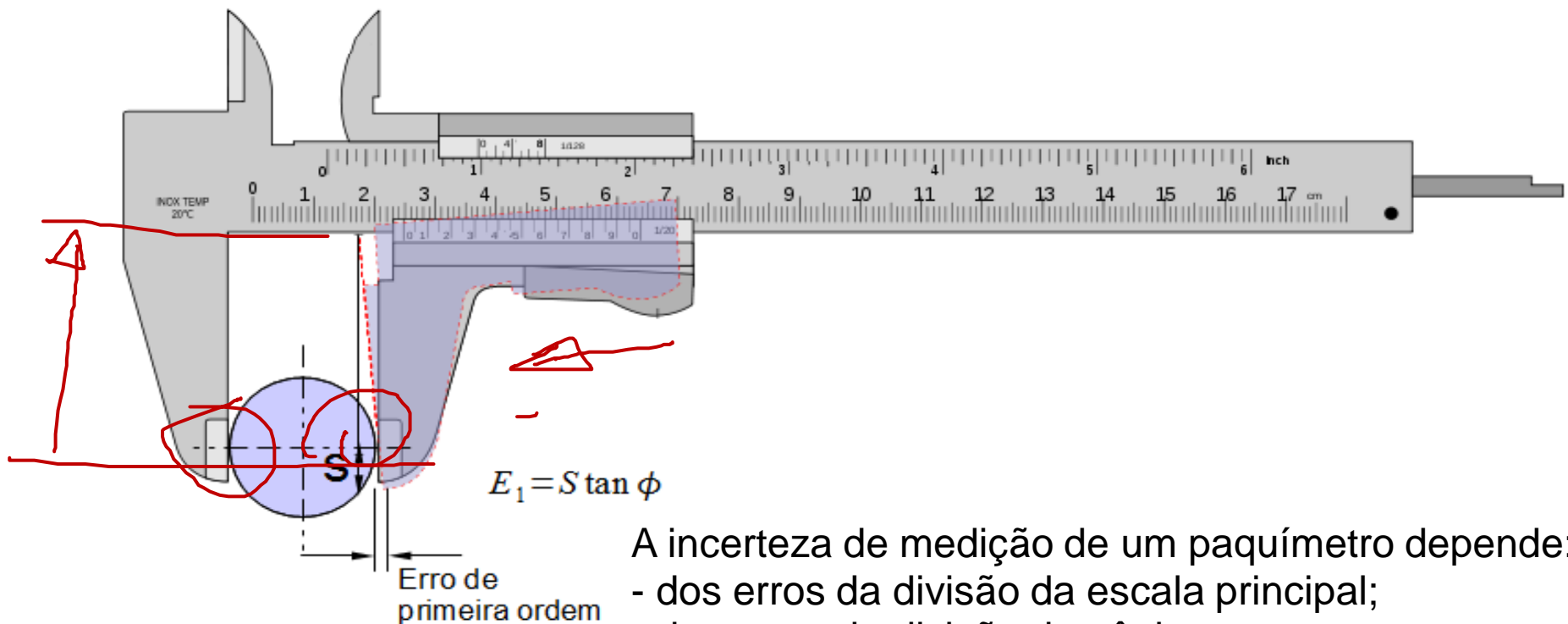
Equipamentos básicos de inspeção

- Paquímetros
- Paquímetros são instrumentos de medição resultante da combinação de uma escala, que serve de padrão de comprimento; dois bicos de medição, como meios de transferência do mensurando, onde um dos bicos está ligado à escala e outro ao cursor; apresentando ainda um interpolador mecânico denominado de nônio, para a indicação entre traços



Instrumentos básicos da metrologia industrial

→ Erros em paquímetros



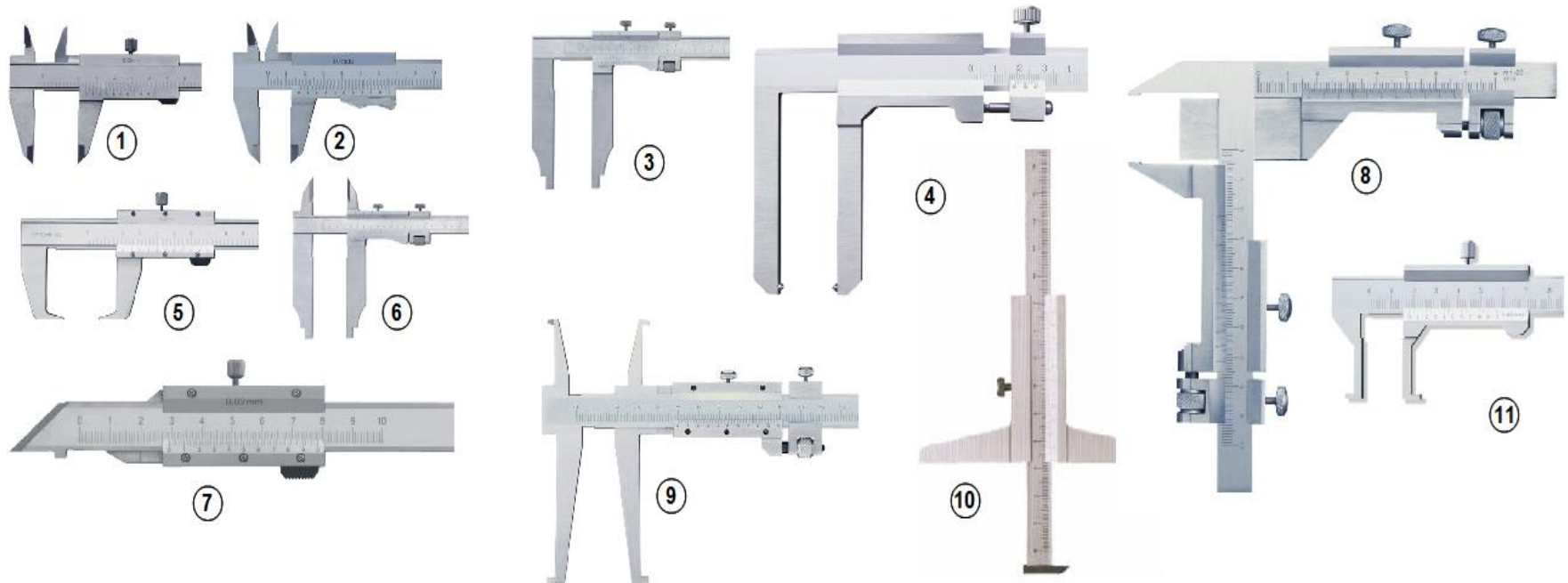
A incerteza de medição de um paquímetro depende:

- dos erros da divisão da escala principal;
- dos erros da divisão do nônio;
- da retilidade dos bicos de medição;
- da perpendicularidade dos bicos de medição em relação à haste e paralelismo entre si;
- dos erros da guia do cursor



Instrumentos básicos da metrologia industrial

→ Paquímetros - Tipos



1. Paquímetro universal com trava superior
2. Paquímetro universal com trava
3. Paquímetro de bico longo
4. Paquímetro para medição de chapas com ajuste
5. Paquímetro para medição de chapas
6. Paquímetro de bicos planos.
7. Paquímetro com 45º estrutura aberta
8. Paquímetro para dentes
9. Paquímetro tipo faca para ranhuras internas
10. Paquímetro para profundidade
11. Paquímetro para ranhuras internas



Instrumentos básicos da metrologia industrial





Instrumentos básicos da metrologia industrial

Micrometros





Instrumentos básicos da metrologia industrial

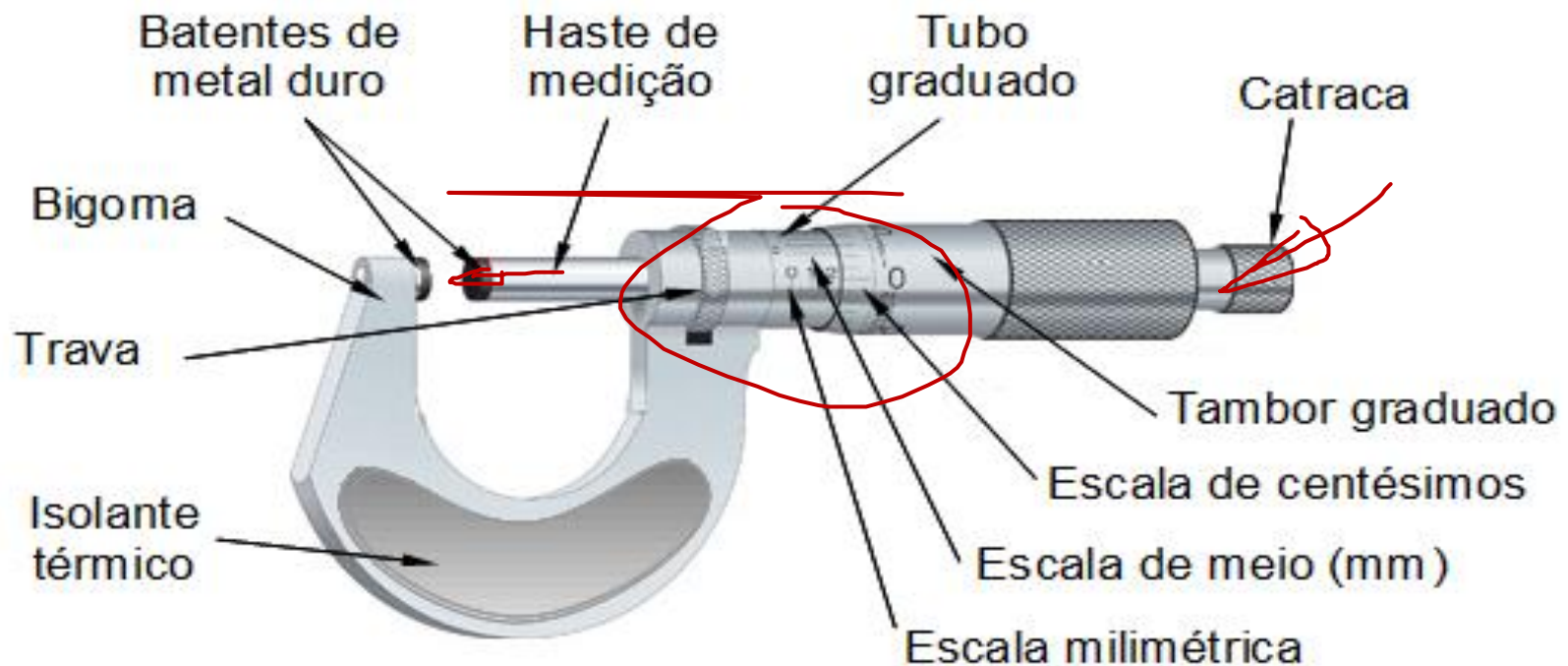
Micrômetros

- Micrômetros são instrumentos onde a portabilidade da medida é relacionada a um fuso roscado, cujo passo deve corresponder em precisão e grandeza, aos objetivos da medição. Os micrômetros tem em geral um passo de 0,5 mm para uma rotação completa.



Instrumentos básicos da metrologia industrial

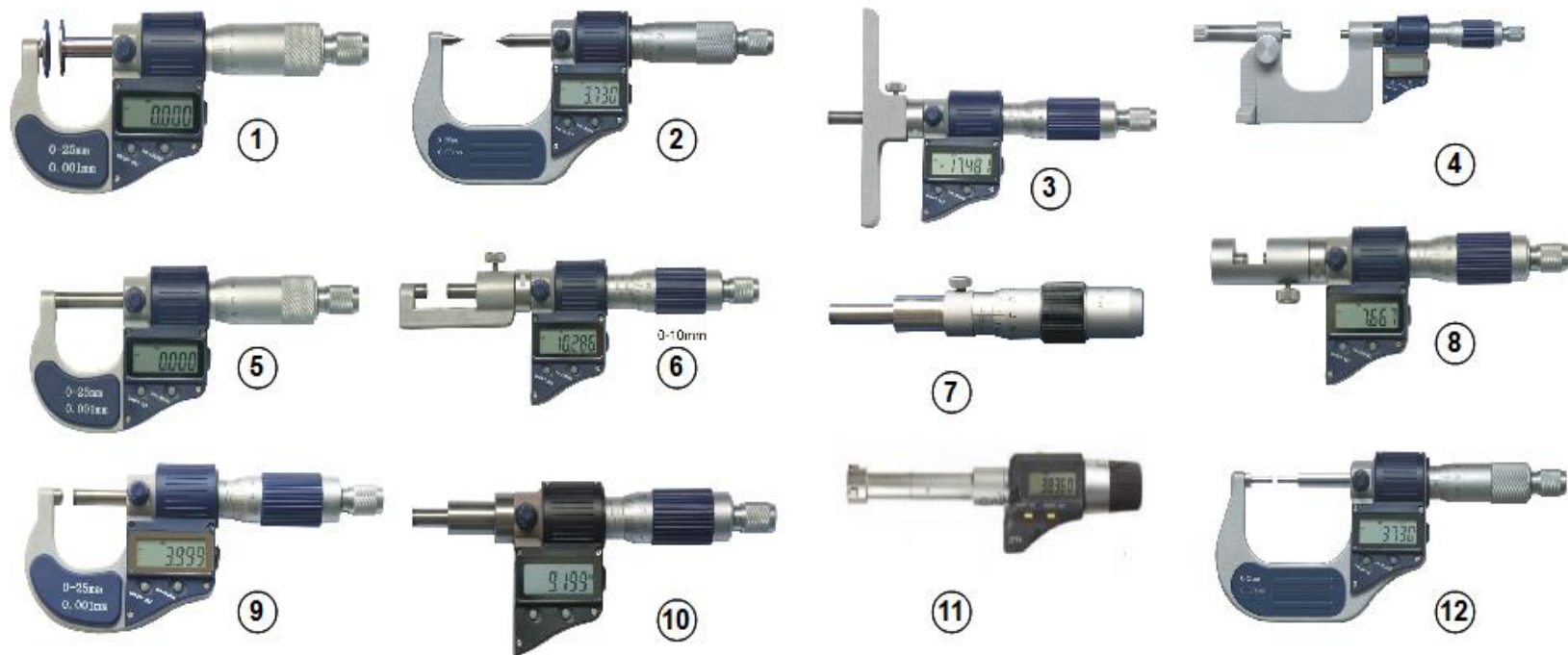
→ Micrômetros – Características construtivas





Instrumentos básicos da metrologia industrial

→ Micrômetros - Tipos



1. Micrômetro para módulo de engrenagens
2. Micrômetro com pontas
3. Micrômetro para profundidade
4. Micrômetro com ajuste da faixa de operação
5. Micrômetro universal
6. Micrômetro para mancais
7. Parafuso micrométrico
8. Micrômetro para medição de fios
9. Micrômetro para tubos
10. Parafuso micrométrico digital
11. Micrômetro interno
12. Micrômetro para peças frágeis



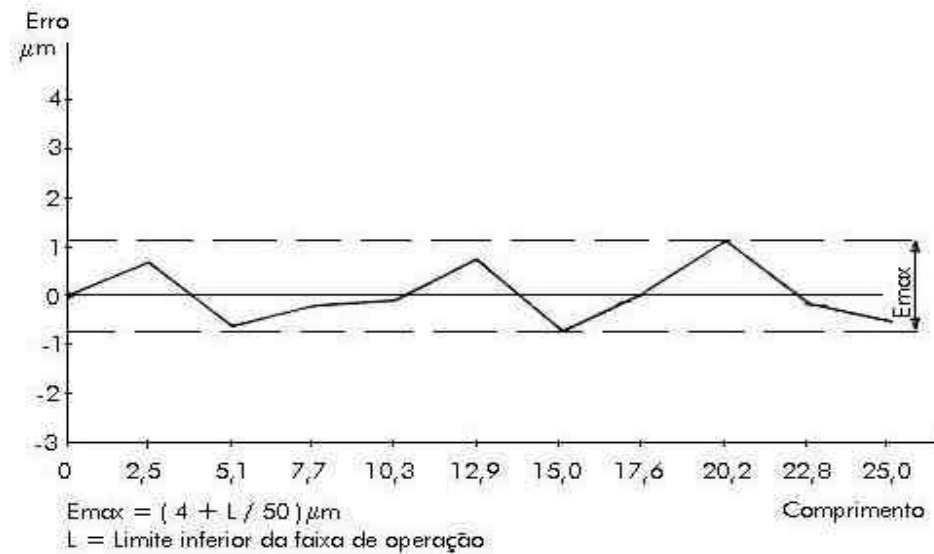
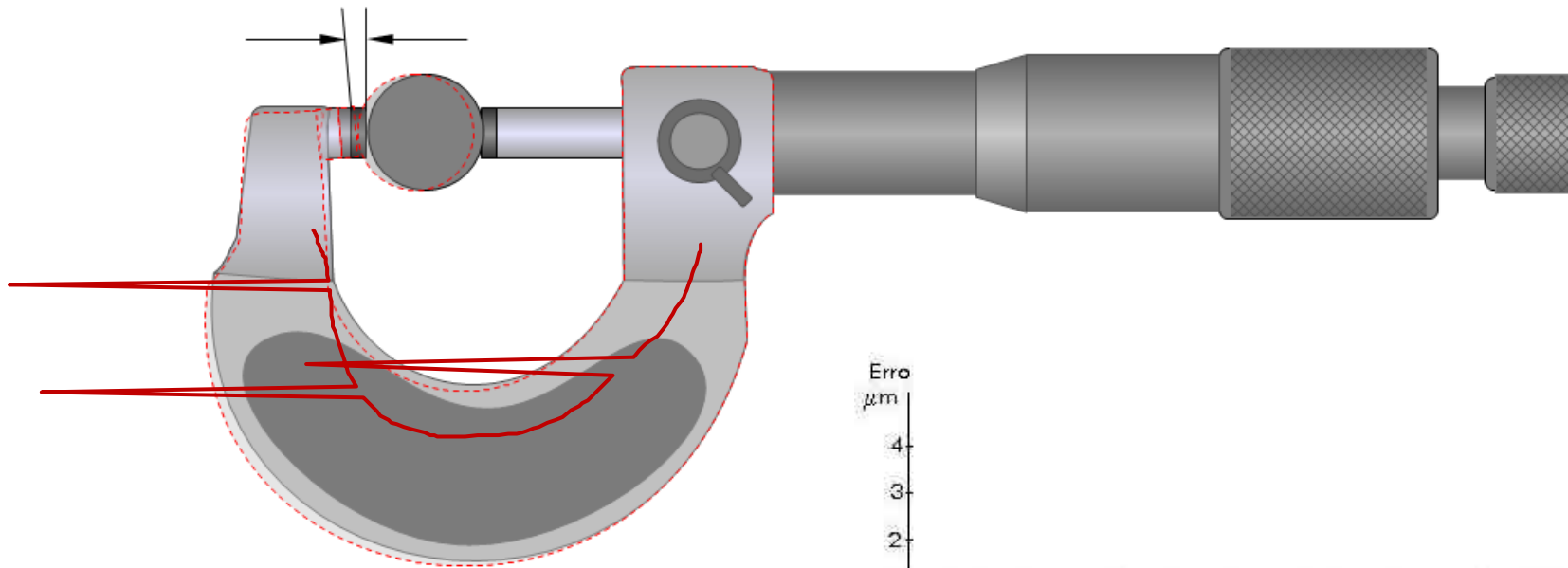
Instrumentos básicos da metrologia industrial





Instrumentos básicos da metrologia industrial

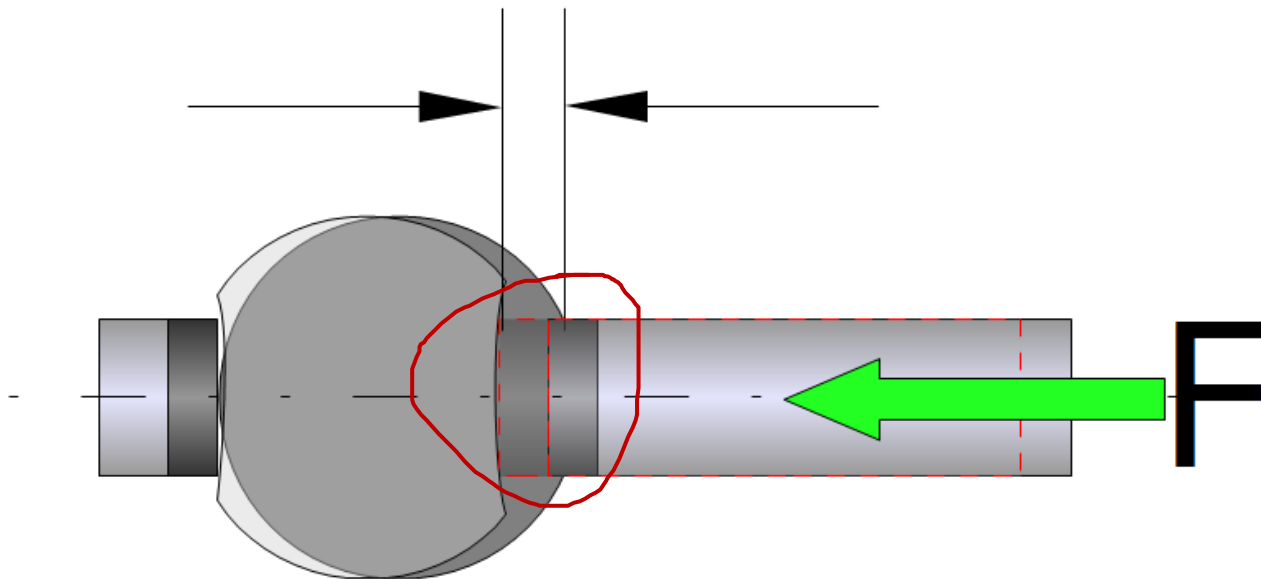
→ Erros em Micrômetros





Instrumentos básicos da metrologia industrial

→ Erros em Micrômetros





Princípio de Abbe

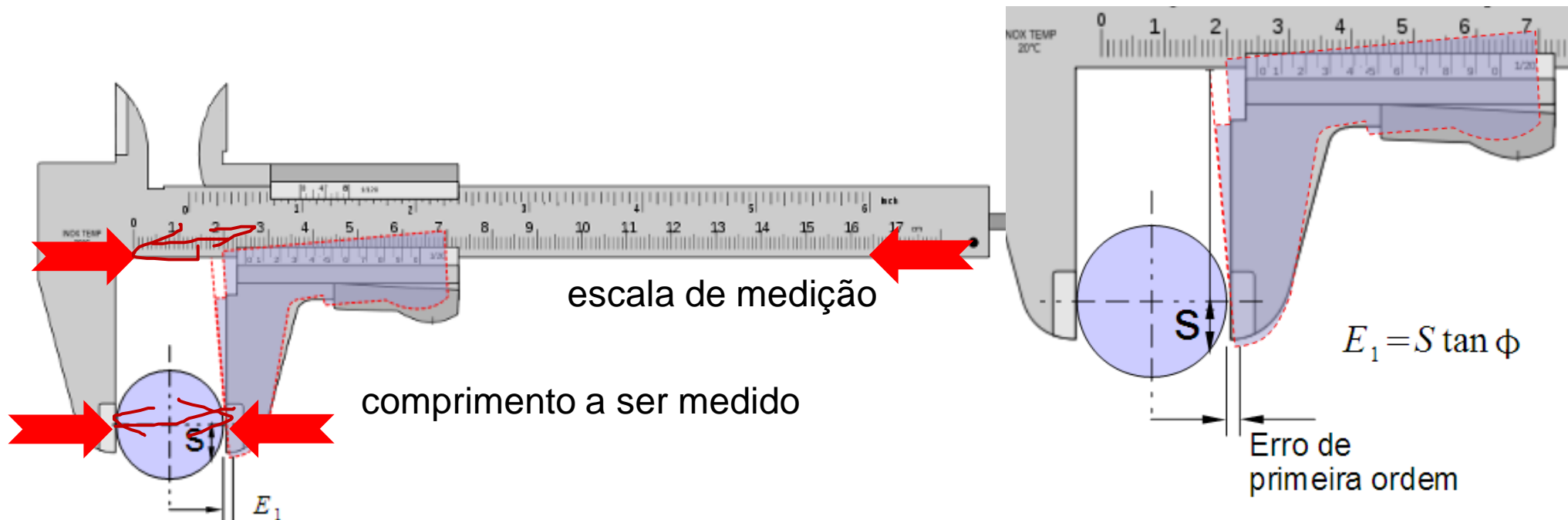
Ernst Karl Abbe (Janeiro 23, 1840 – Janeiro 14, 1905) era físico, cientista em óptica, empreendedor, reformador social. Lançou os fundamentos da óptica moderna junto com Otto Schott e Carl Zeiss. Sócio da Carl-Zeiss AG





Princípios de Abbe

Princípio Abbe: Para atingir alta precisão em sistema de medição de comprimentos, o comprimento a ser medido deve estar alinhado e na mesma direção da escala de medição.

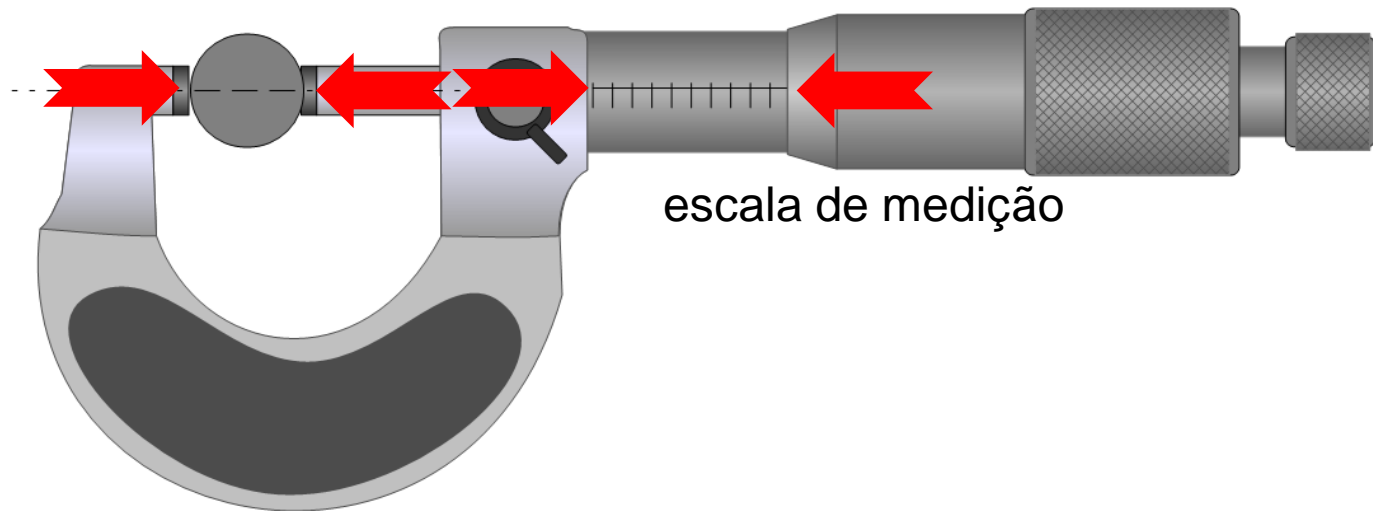




Princípios de Abbe

Princípio Abbe: Para atingir alta precisão em sistema de medição de comprimentos, o comprimento a ser medido deve estar alinhado e na mesma direção da escala de medição.

comprimento a ser medido





Instrumentos básicos da metrologia industrial Relógios comparadores





Instrumentos básicos da metrologia industrial

Relógios comparadores

- São instrumentos capazes de medir deslocamentos lineares.

Características construtivas

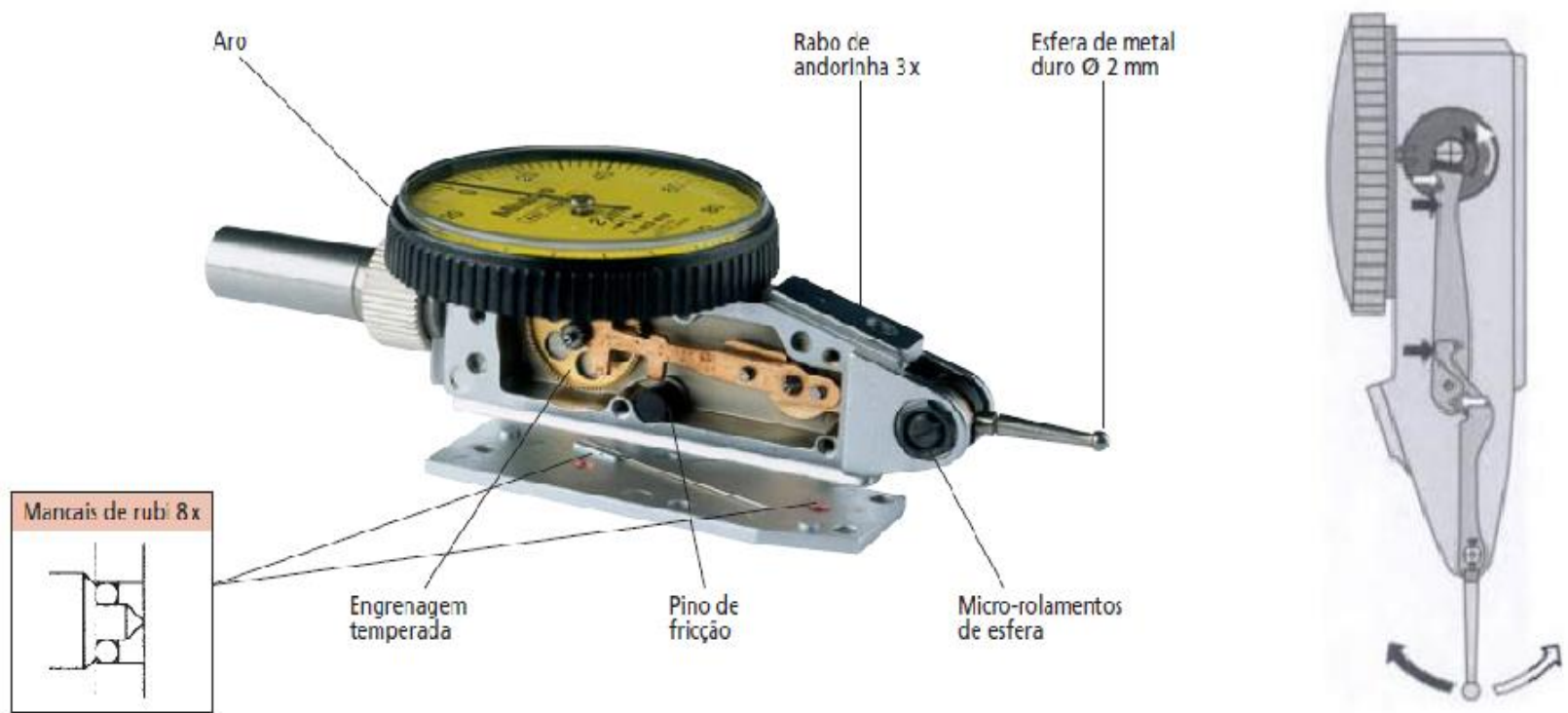




Instrumentos básicos da metrologia industrial

Relógios comparadores

Características construtivas

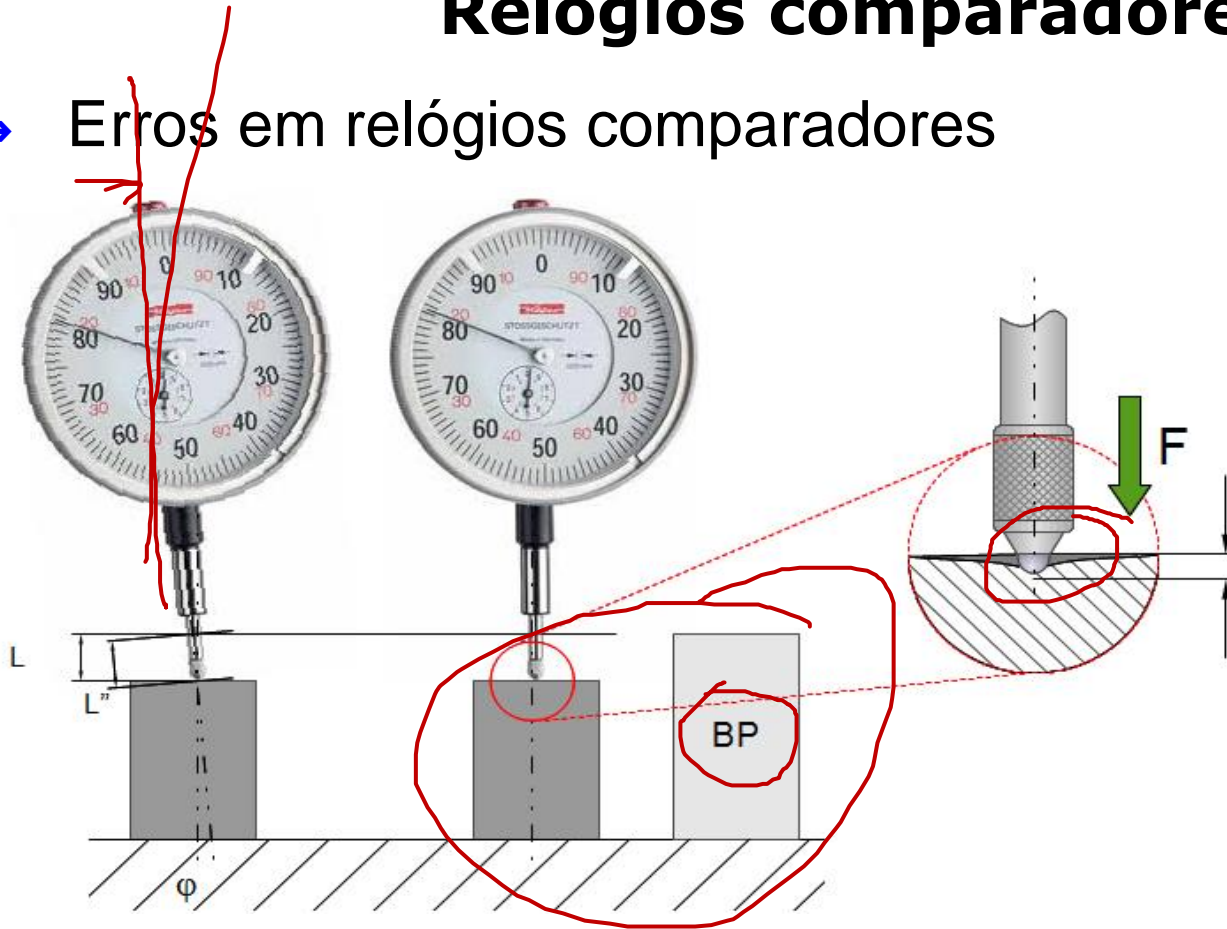




Instrumentos básicos da metrologia industrial

Relógios comparadores

→ Erros em relógios comparadores



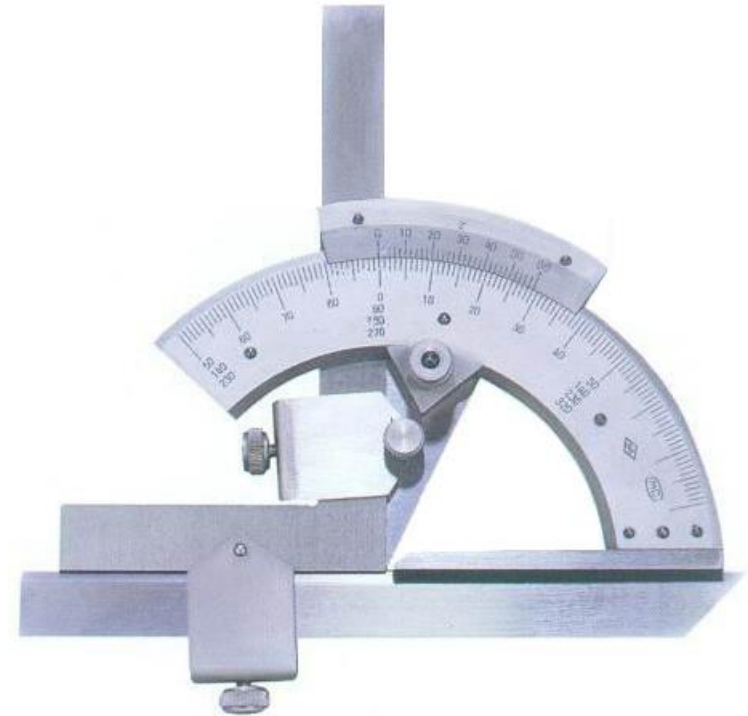
$$\Delta L = L' - L = \frac{\phi}{2}$$





Instrumentos básicos da metrologia industrial

Medidores de ângulos





Seleção dos equipamentos de medição

REQUISITOS

- faixa de operação
- Incerteza de medição
- aplicabilidade
- capacidade
- adaptabilidade a produção
- custo
- outros

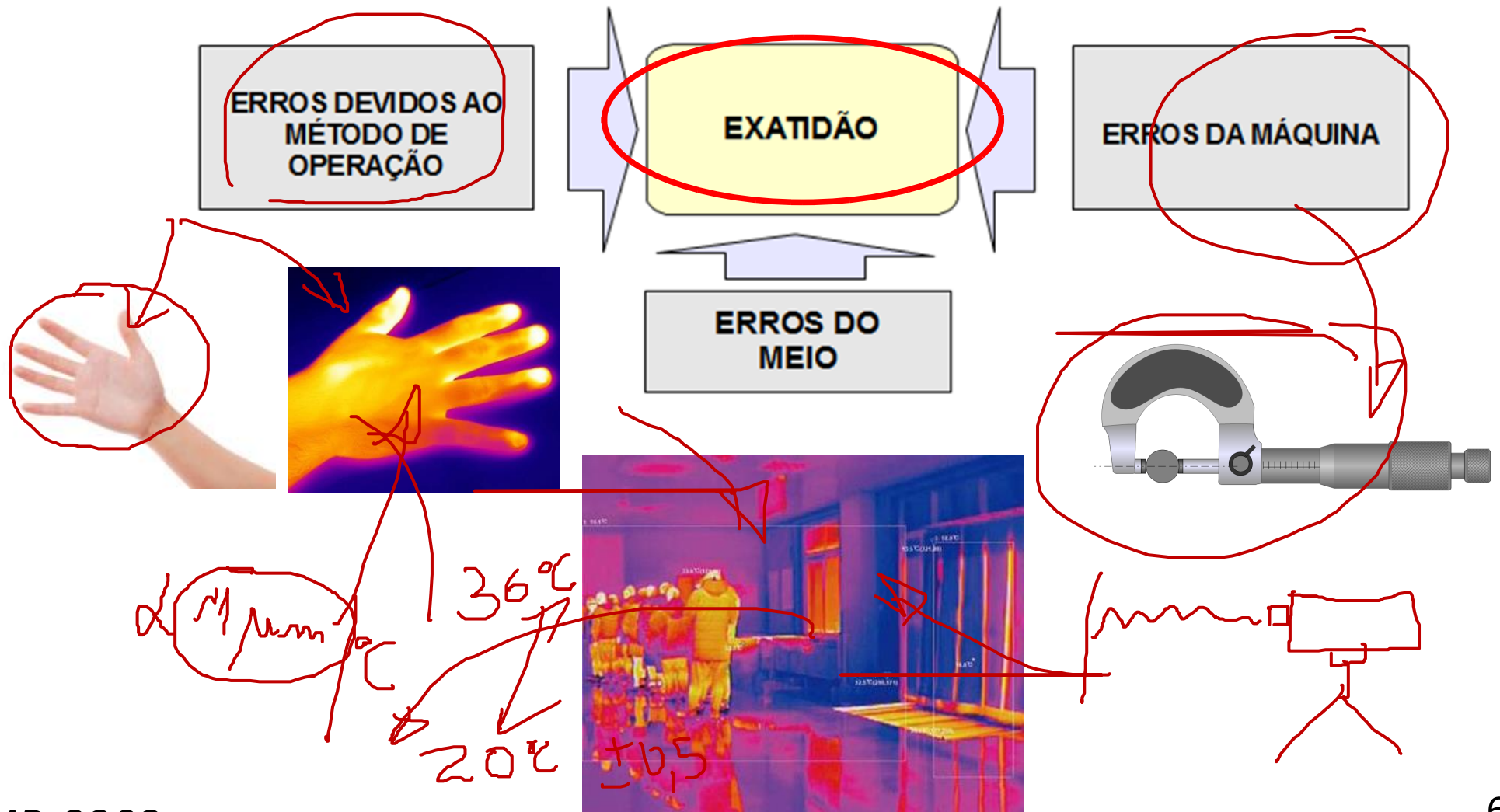


SELEÇÃO



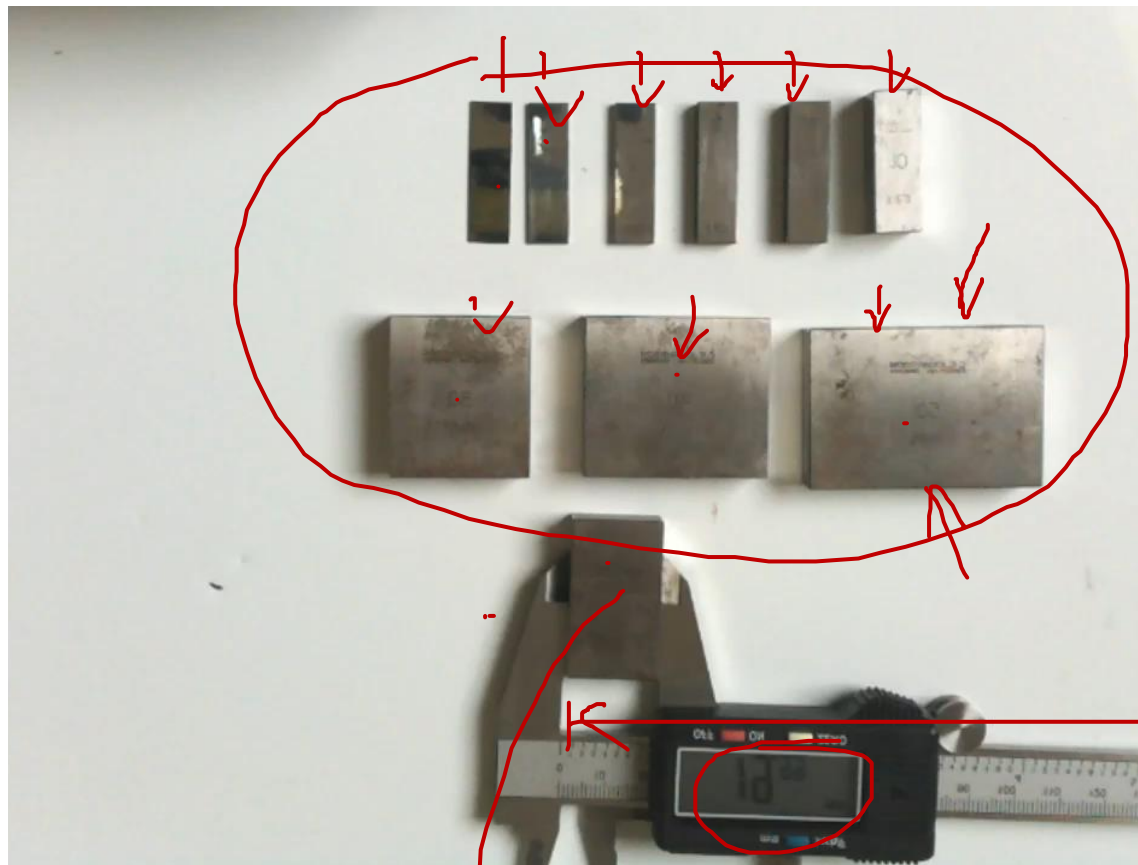
Compensação de erros

Fontes de Erros na medição





Aferição de um paquímetro



+ 0,25 μ m

170 mm



Experimento 1 Aferição de um paquímetro

BP	1,00	2,00	4,00	5,00	10,00	20,00	30,00	40,00	50,00	60,00	70,00	80,00	90,00	100,00
L1	1,01	2,01	4,00	4,99	9,99	19,98	29,98	40,06	49,98	59,99	69,99	80,02	89,99	100,02
L2	1,00	2,01	4,00	4,98	10,01	20,05	30,05	39,88	50,05	60,04	70,04	80,05	90,01	100,01
L3	1,00	2,01	3,99	4,98	9,97	19,98	29,97	39,96	50,01	60,01	70,07	79,97	90,01	100,03
L4	1,01	2,02	3,98	4,99	9,98	19,97	29,98	39,98	49,99	60,04	70,04	80,02	90,01	100,02
L5	0,99	2,01	4,00	4,98	9,98	19,98	29,97	39,97	50,05	60,02	70,05	80,05	90,03	100,03
MM	1,00	2,01	3,99	4,98	9,99	19,99	29,99	39,99	50,02	60,02	70,04	80,02	90,01	100,02
SD	0,01	0,00	0,01	0,01	0,02	0,03	0,03	0,04	0,03	0,02	0,03	0,03	0,01	0,01

Exp 1 - Com base nos dados da planilha ACIMA

a) construir a curva de erros, determinar:

b) Erro máximo

c) Erro sistemático

d) Tendência

e) Uma medição realizada com esse paquímetro apresentou a seguinte leitura $L=44,50$, aplicando a curva de erro determine o valor correto da leitura



$$\begin{array}{r} 40,00 \\ \hline 1 \\ \hline 1 \end{array}$$

$$\begin{array}{r} + 10 \text{ mm} \\ \hline 0,01 \text{ mm} \end{array}$$

$$RM = M \pm E$$



Perguntas

Responder:

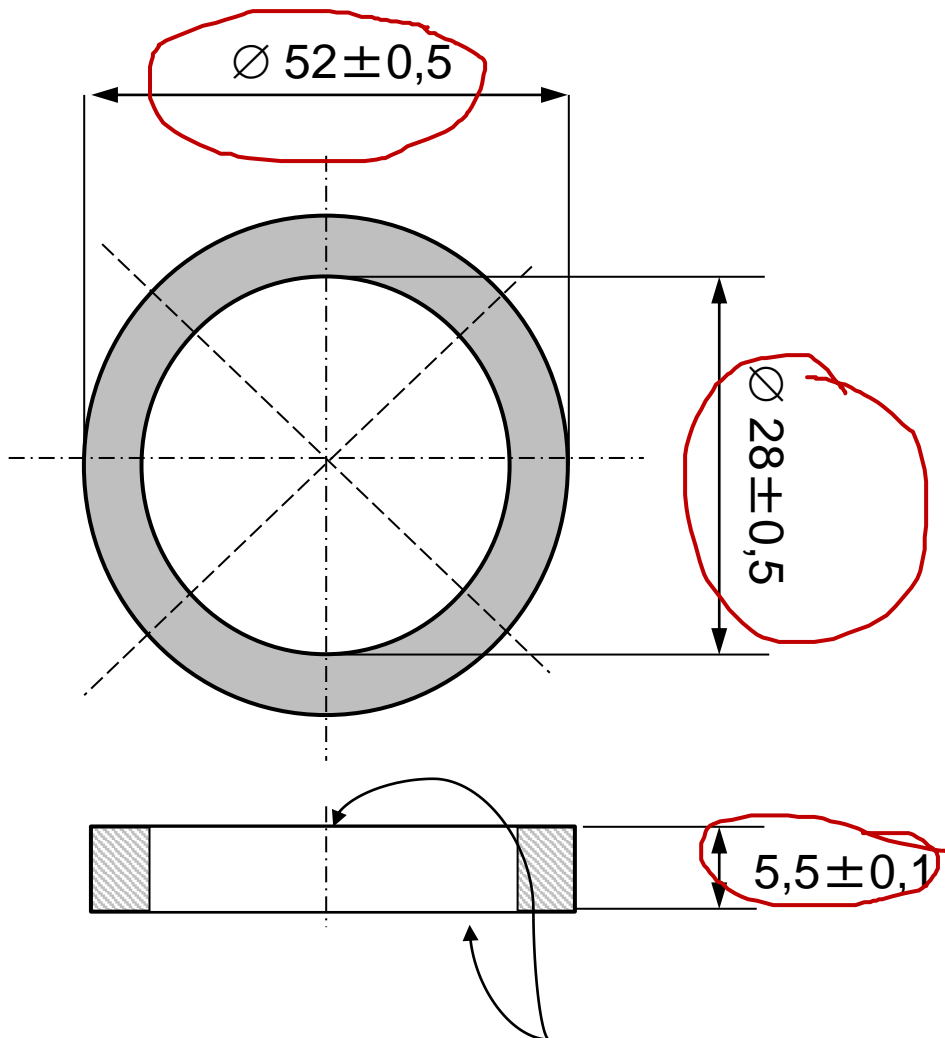
- a) ~~Apresentar uma revisão sobre blocos padrão~~
- b) Como a curva de erro, ou aferição permite reduzir os erros de medição?
- c) Qual a diferença entre aferição e calibração?
- d) O que é, e como se constitui ~~a rede de calibração~~?





Experimento - 2

Avaliação dimensional de um anel de ensaios



Descrição da peça

Anel de ensaio tribológico

Material: Aço ABNT 1045 temperado

Medição dos diâmetros interno e externo

- Paquímetro digital
- F.O. 0-155mm
- Resolução: 0,01mm

Medição da espessura

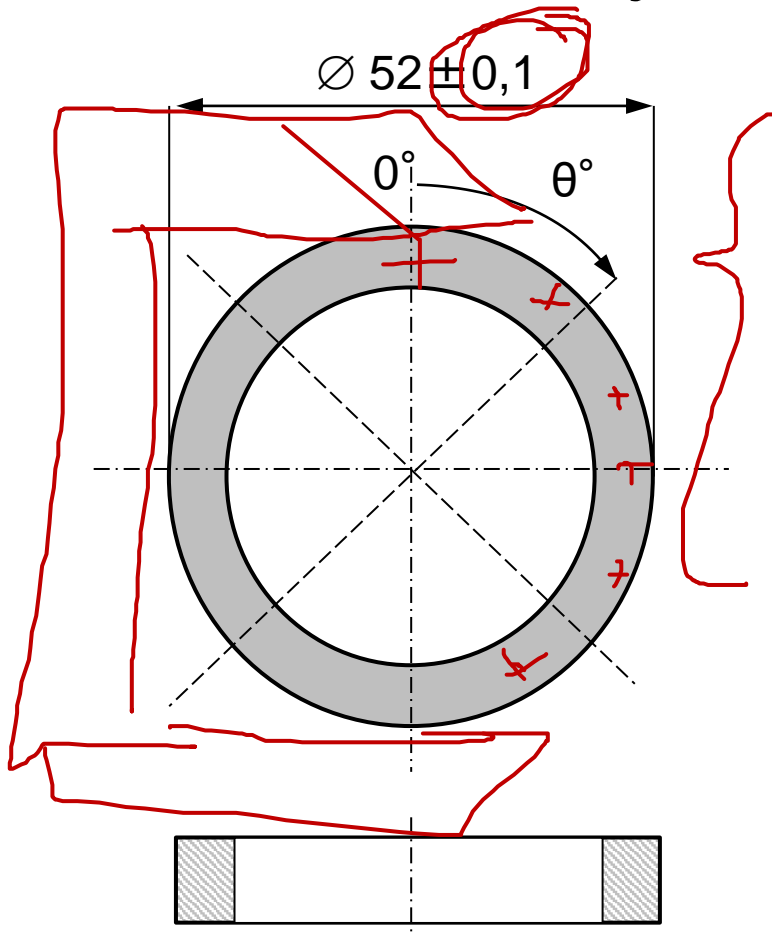
- Micrometro analógico
- F.O. 0-25mm
- Resolução: 0,01mm



Experimento - 2

$\pm 0,01 \text{ mm}$

Avaliação dimensional de um anel de ensaios



Leituras diâmetro externo

theta	L1	L2	L3	L4	L5
0°	51,99	51,95	51,97	51,99	51,98
30°	52,02	52,07	52,00	52,02	52,07
60°	52,05	51,97	52,01	52,03	52,07
90	51,97	51,98	51,96	51,99	51,97
120	51,96	52,04	51,97	51,96	52,02
150°	51,97	52,01	51,97	51,98	51,96

Exp 2 A- Com base nos dados da planilha de leituras ACIMA:

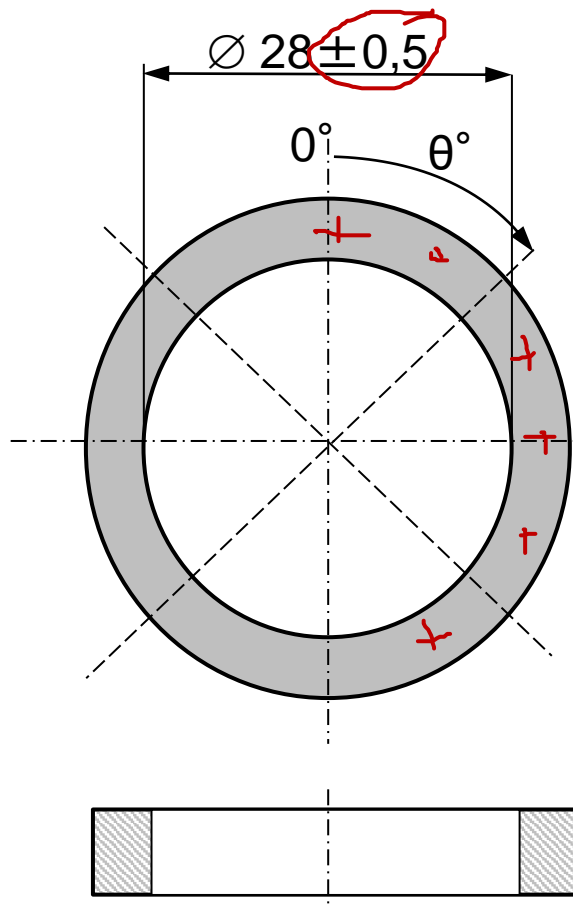
- Determinar o diâmetro externo
- Verificar se o mesmo está dentro das tolerâncias especificadas



Experimento - 2

$\pm 0,01$

Avaliação dimensional de um anel de ensaios



Leituras diâmetro interno

theta	L1	L2	L3	L4	L5
0°	27,83	27,94	27,86	27,76	27,91
30°	27,89	27,87	27,90	29,91	27,84
60°	27,92	27,90	27,84	27,88	27,95
90	27,95	27,85	27,87	27,95	27,94
120	27,93	29,94	27,95	27,93	27,91
150°	27,95	27,89	27,96	27,97	27,94

Exp 2 B – Com base nos dados da planilha de leituras ACIMA:

- Determinar o diâmetro interno
- Verificar se o mesmo está dentro das tolerâncias especificadas

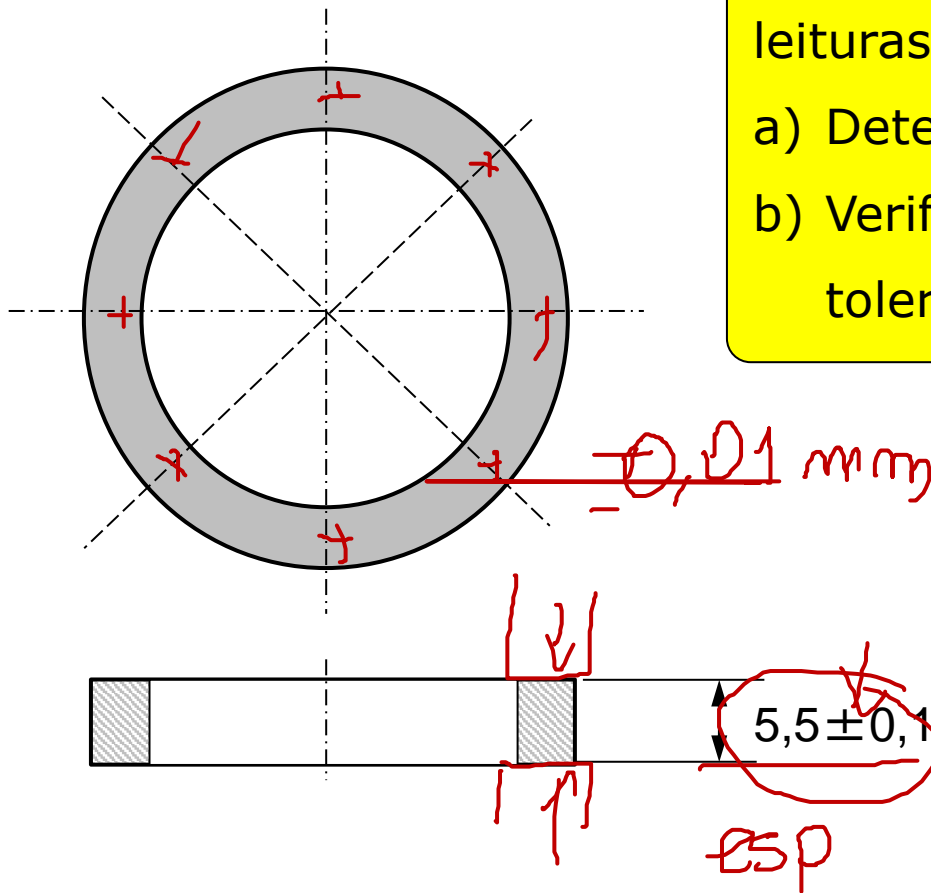


Experimento - 2

Avaliação dimensional de um anel de ensaios

Exp 2 B – Com base nos dados da planilha de leituras ABAIXO:

- Determinar o espessura
- Verificar se o mesmo está dentro das tolerâncias especificadas



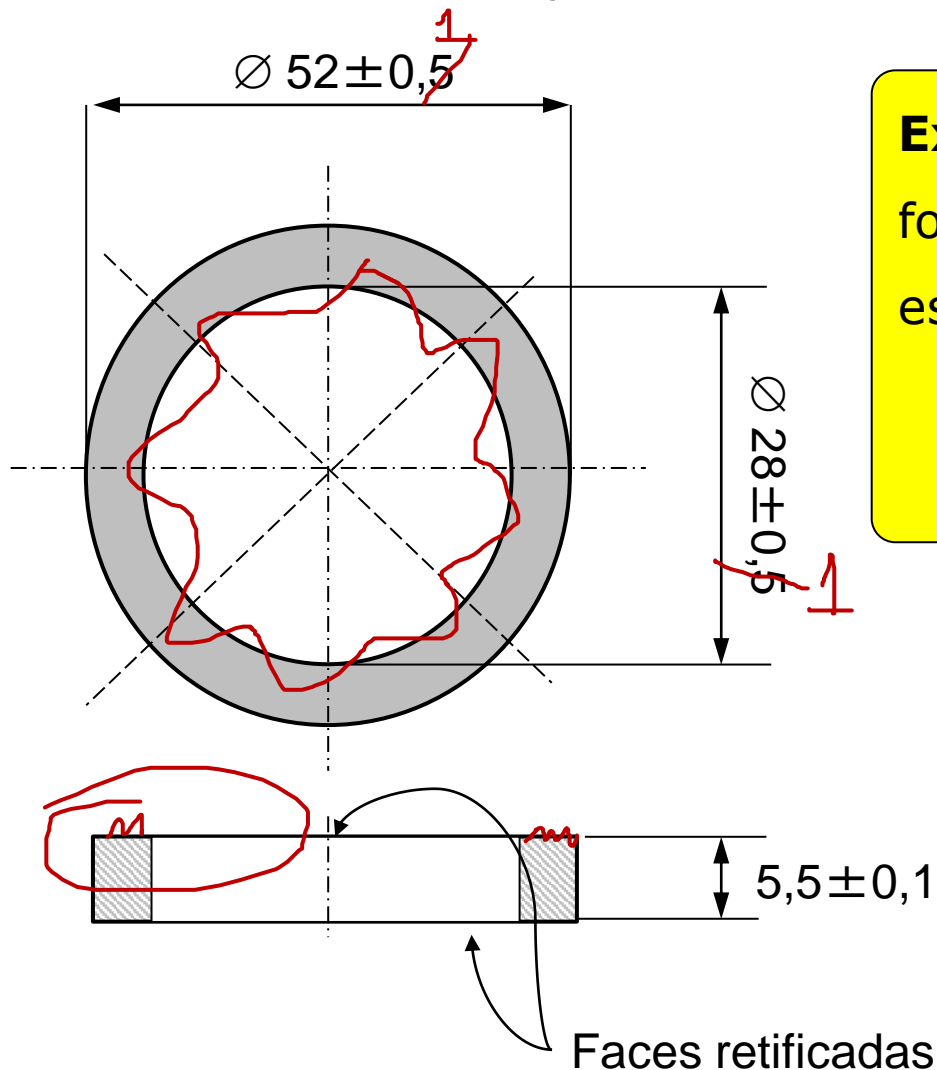
Leituras espessura

theta	L1	L2	L3	L4	L5
0°	5,51	5,52	5,55	5,53	5,53
45°	5,51	5,51	5,52	5,51	5,52
90°	5,51	5,30	5,51	5,54	5,52
135°	5,52	5,52	5,58	5,53	5,56
180°	5,51	5,52	5,55	5,53	5,53
225°	5,51	5,54	5,52	5,51	5,52
270°	5,51	5,53	5,53	5,54	5,52
315°	5,51	5,52	5,50	5,53	5,53



Experimento - 2

Avaliação dimensional de um anel de ensaios

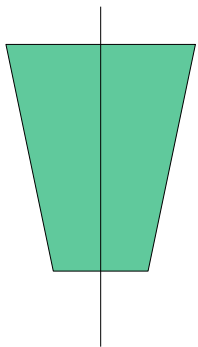


Exp 2 C - Se todas as tolerâncias da peça fossem alteradas para $\pm 0,1$ a peça ainda estaria dentro das especificações?

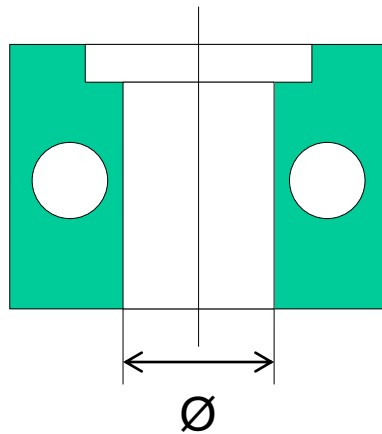


Análise Geométrica

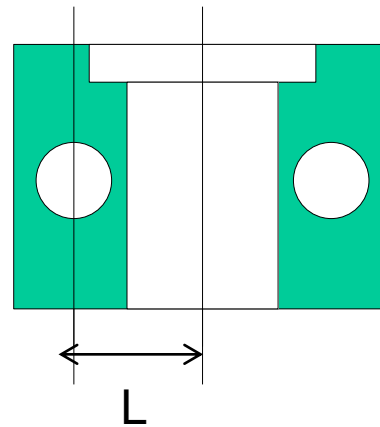
FORMA



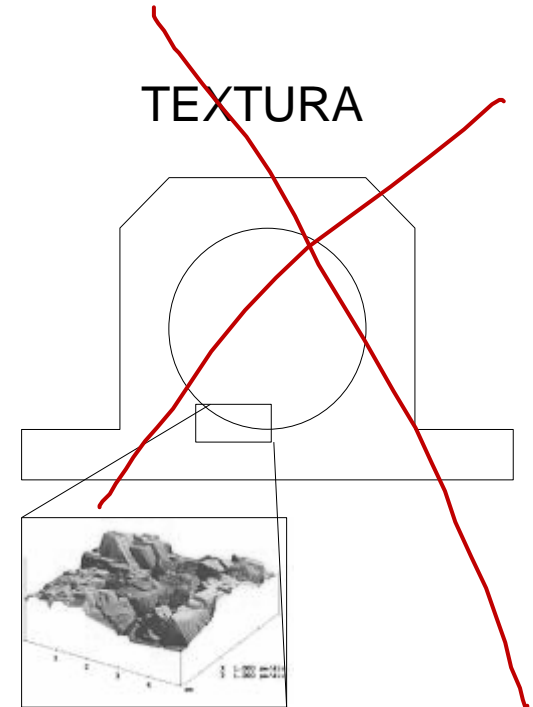
DIMENSÃO



POSIÇÃO



TEXTURA





Inspeção geométrica

- Inspeção geométrica é uma relação de trabalho e risco
- É comum peessoas ligadas a produção acharem que os testes devem ser realizados toda vez que são definidas tolerâncias a uma peça. O que não acontece.

CEP

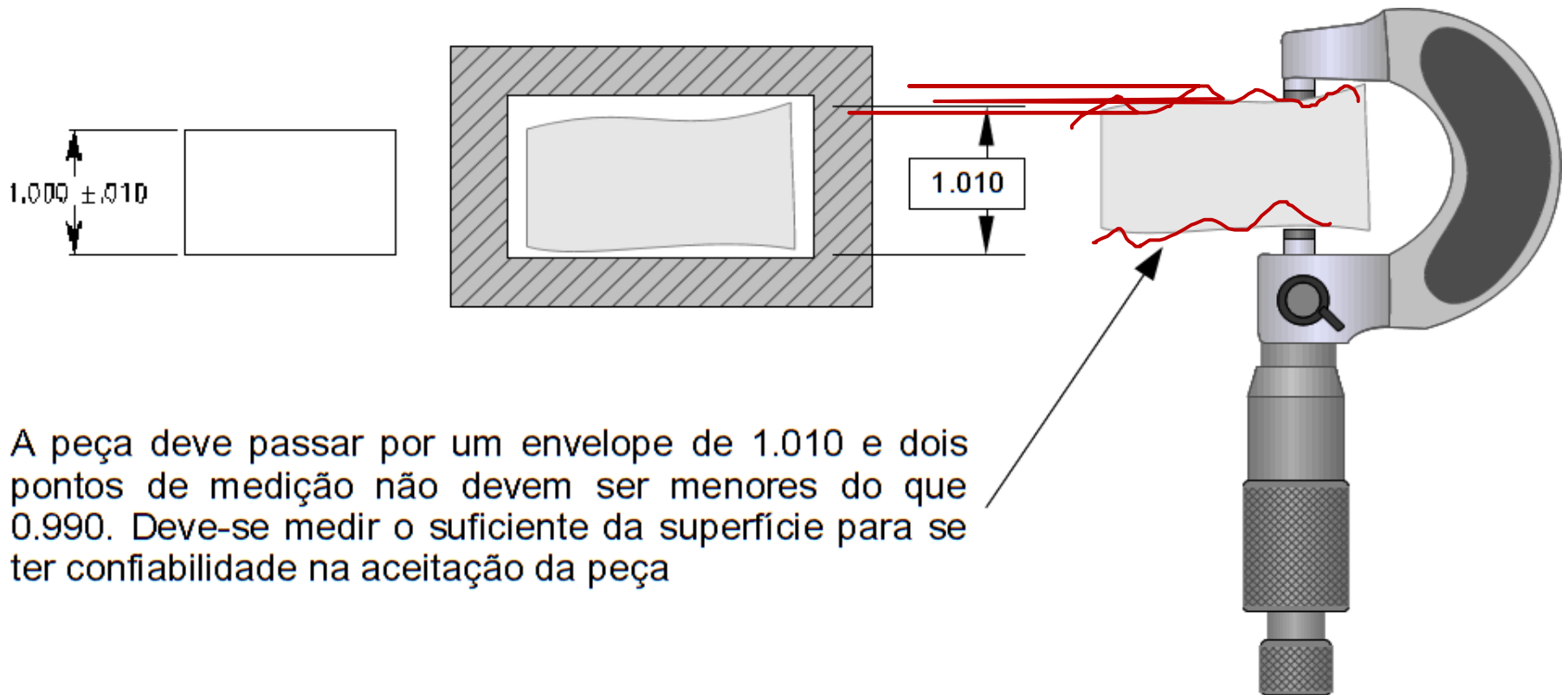
↓

↓



Inspeção geométrica

Inspeção geométrica é uma relação de trabalho e risco



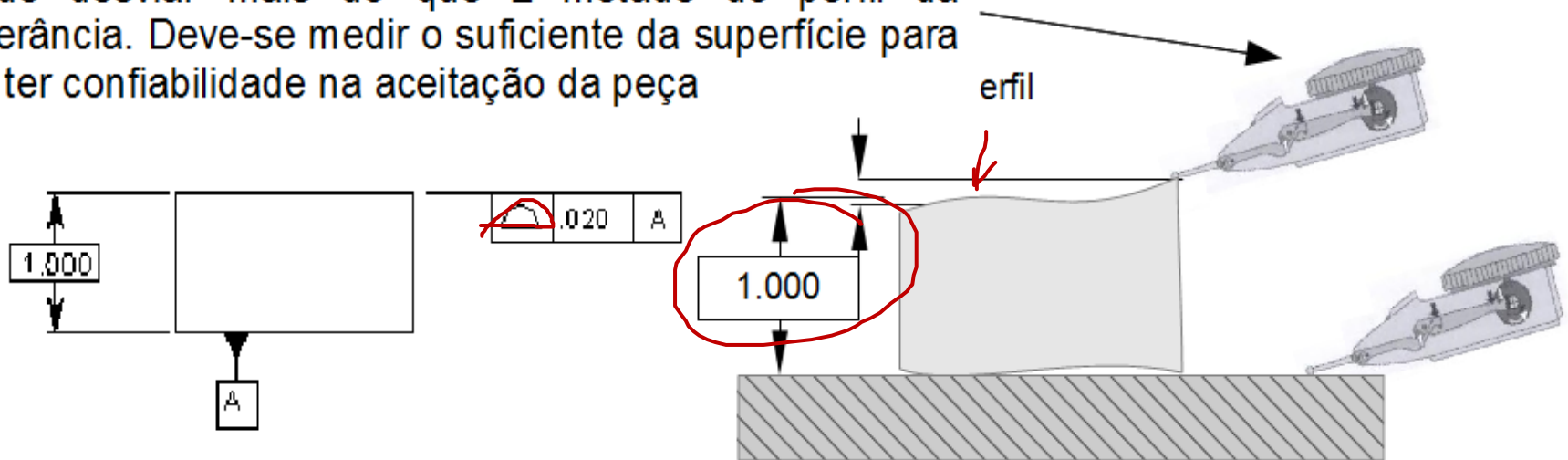


Inspeção geométrica

Inspeção geométrica é uma relação de trabalho e risco

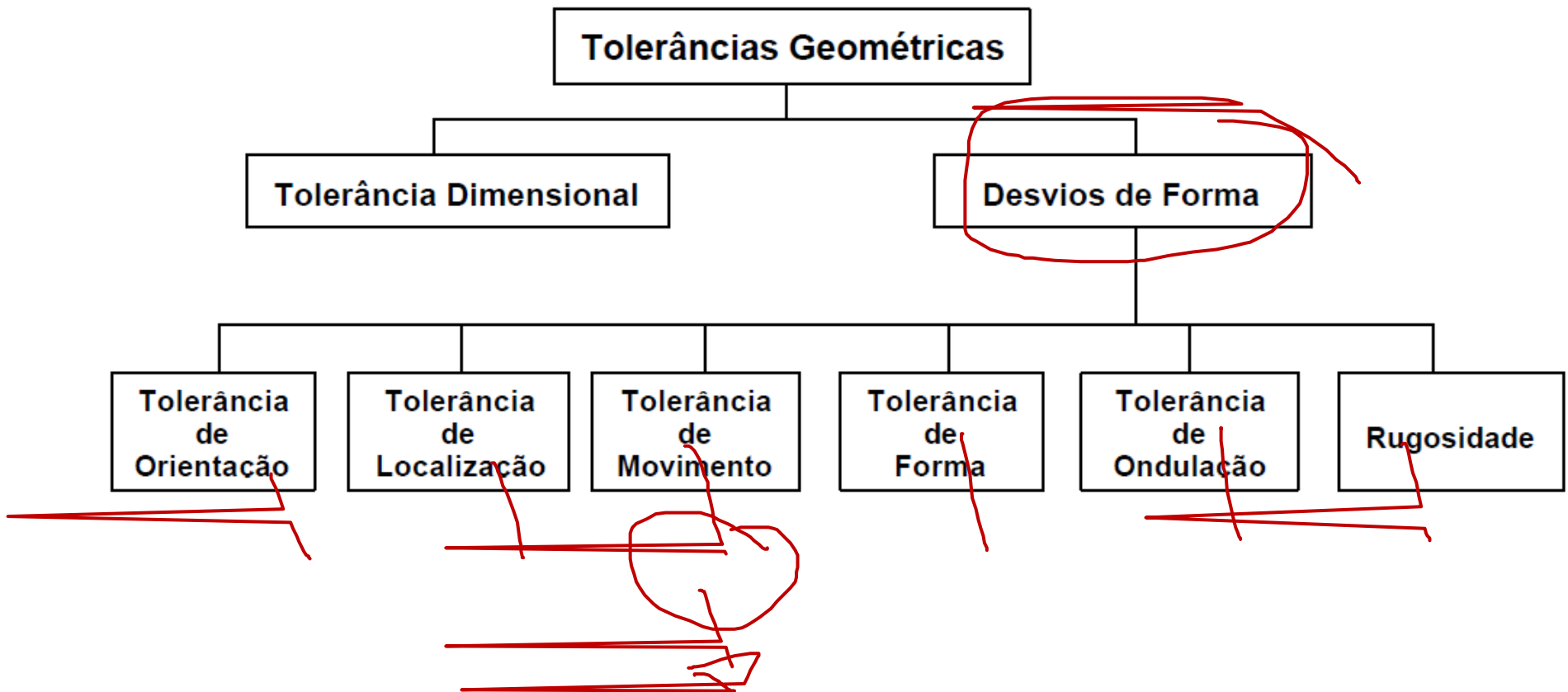
Exemplo:

A indicação Zero na referência base. O indicador não pode desviar mais do que \pm metade do perfil da tolerância. Deve-se medir o suficiente da superfície para se ter confiabilidade na aceitação da peça



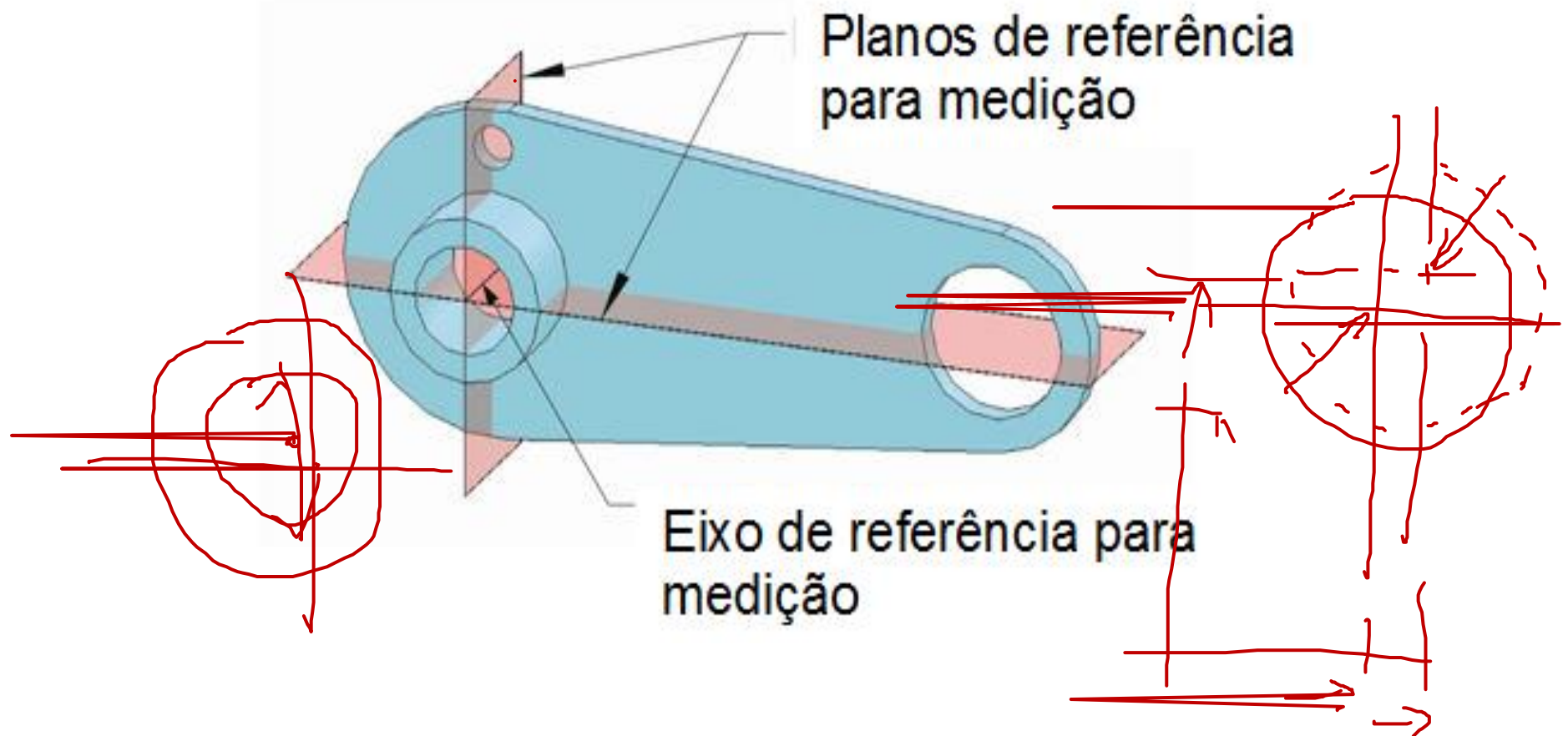


Tolerâncias geométricas



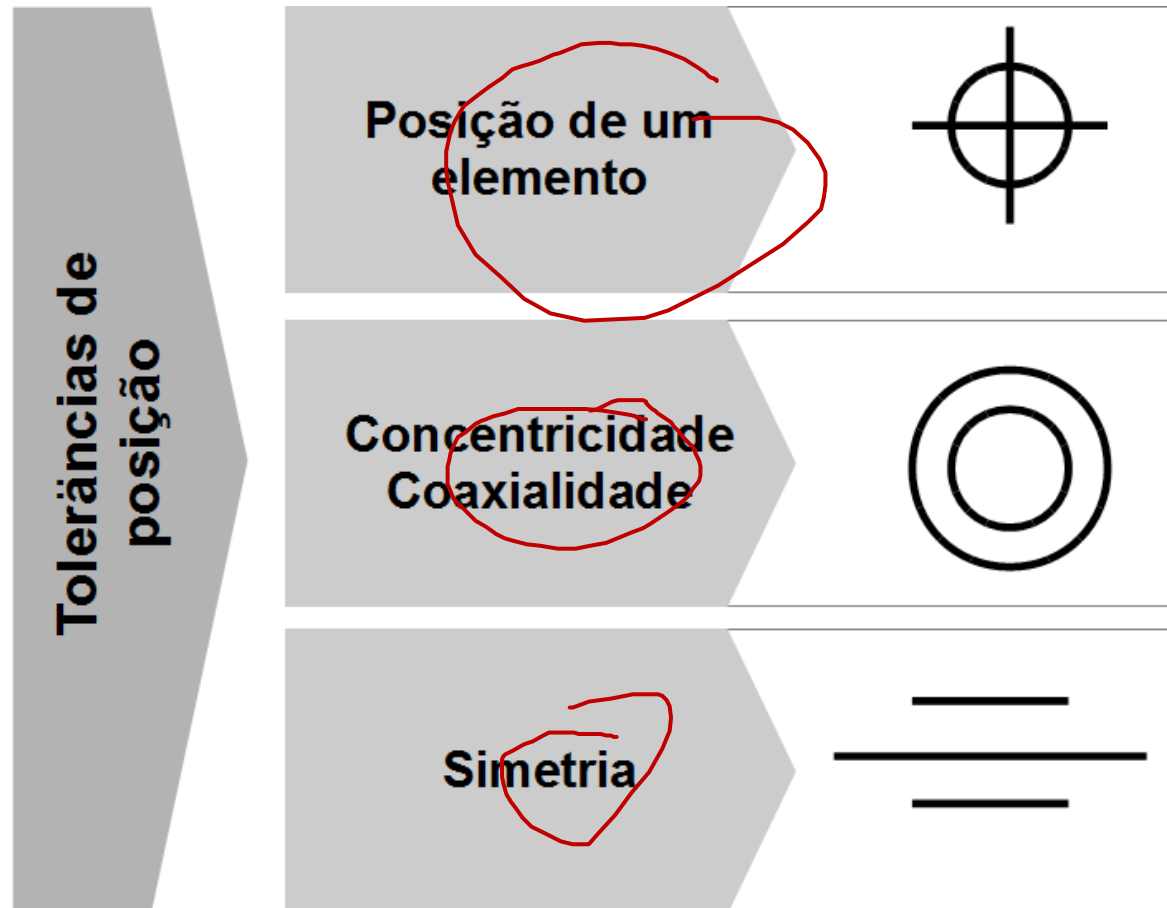


Tolerâncias geométricas





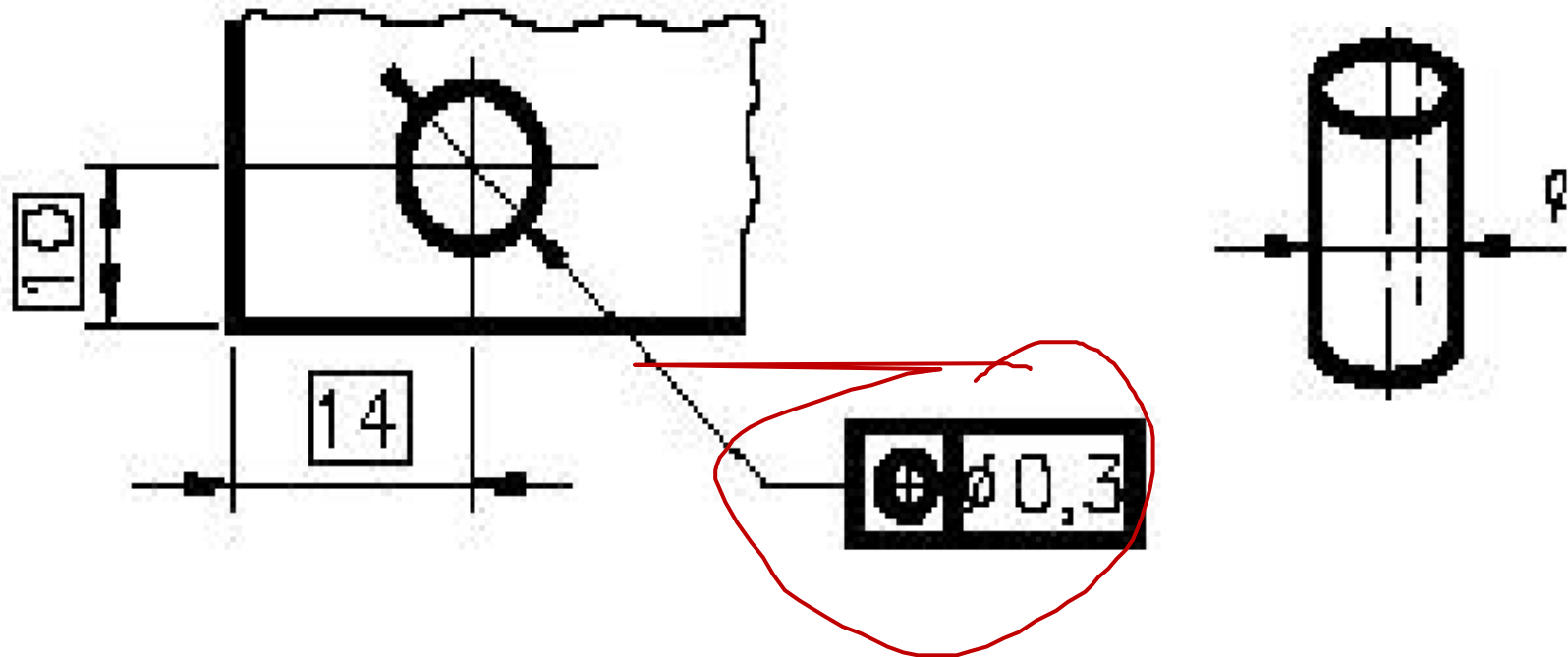
Desvios de forma





Desvios de forma

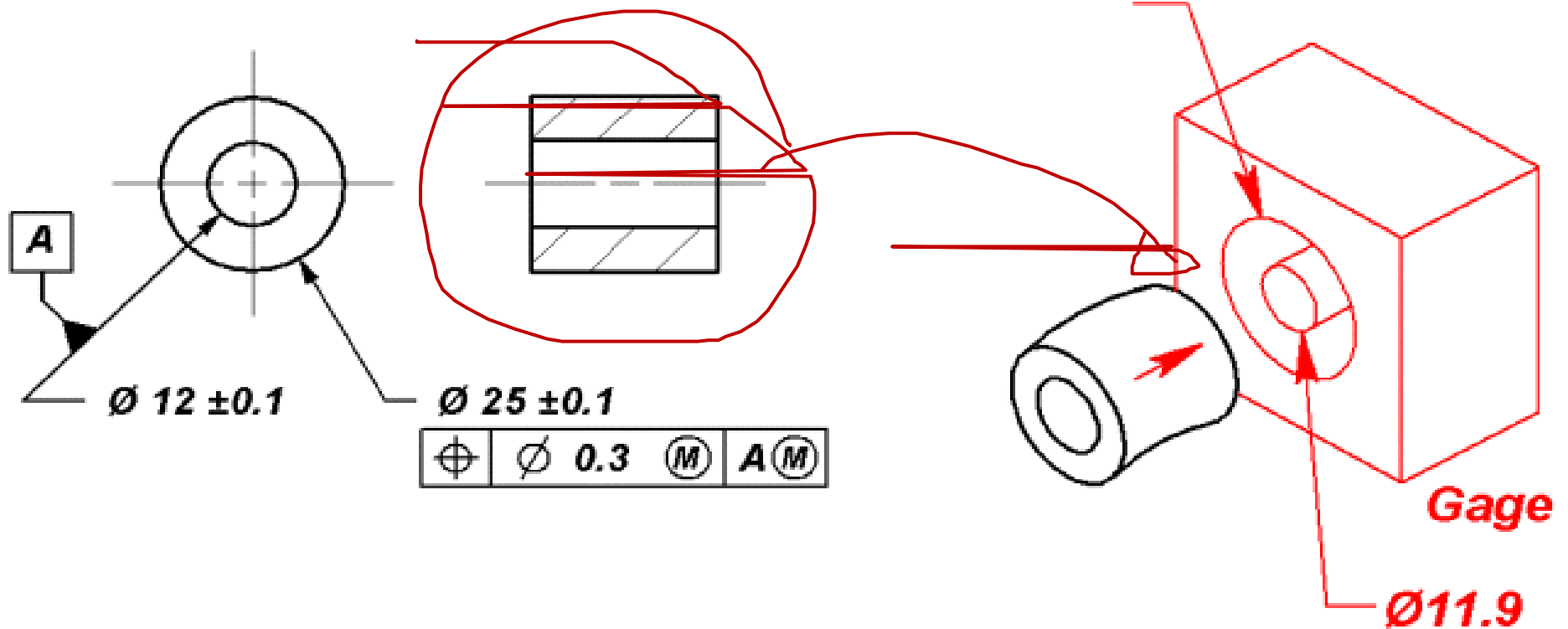
Tolerância de posição: definida como desvio tolerado de um determinado elemento (ponto, reta, plano) em relação a sua posição teórica.





Desvios de forma

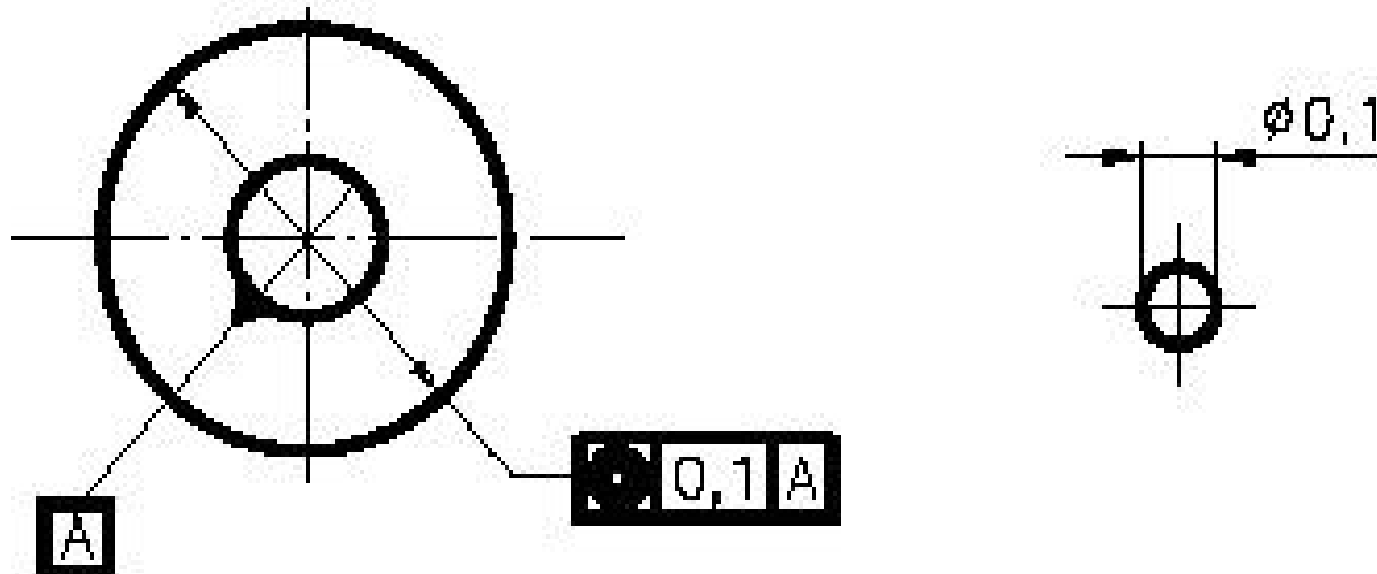
Tolerância de posição





Desvios de forma

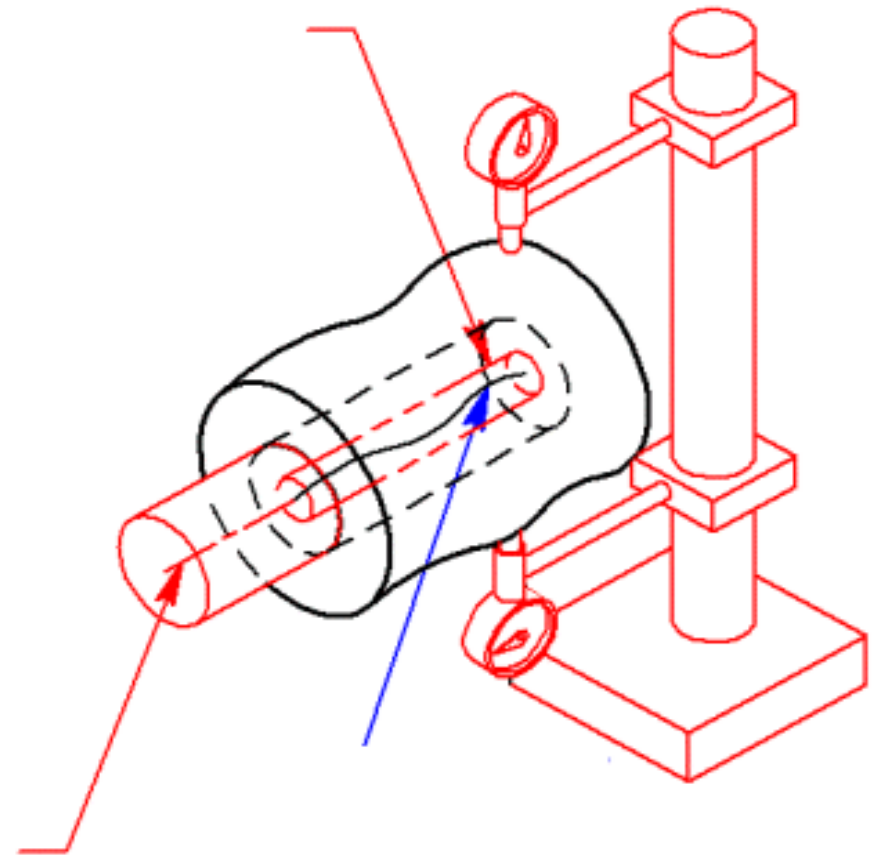
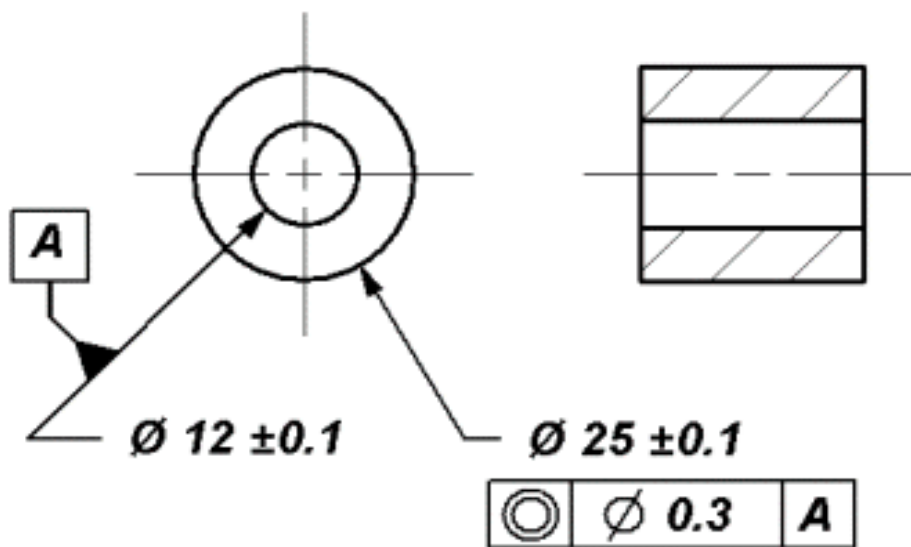
- Tolerância de concentricidade: define-se concentricidade como a condição segundo a qual os eixos de duas ou mais figuras geométricas, tais como cilindros, cones etc., são coincidentes.





Desvios de forma

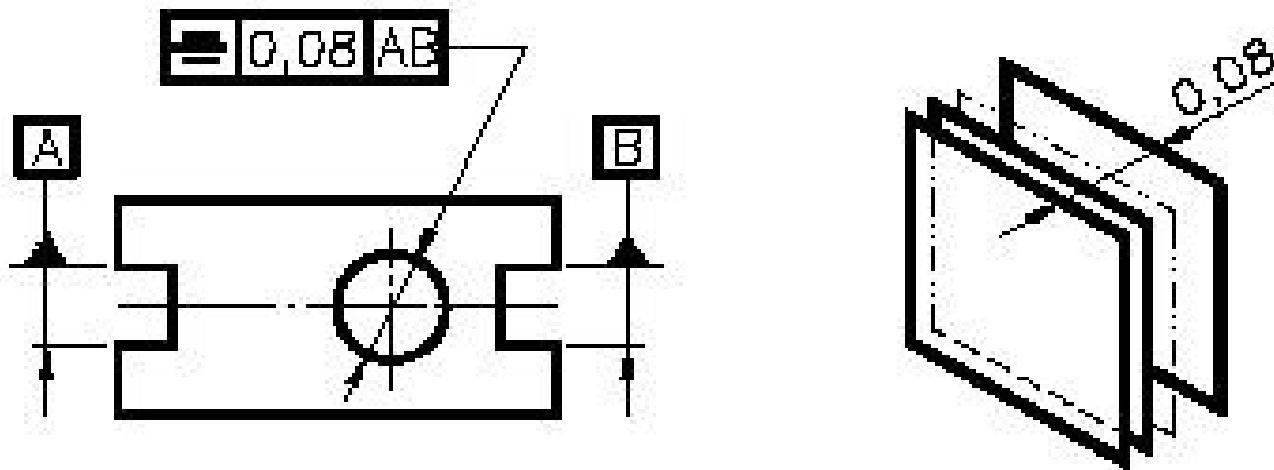
→ *Tolerância de concentricidade:*





Desvios de forma

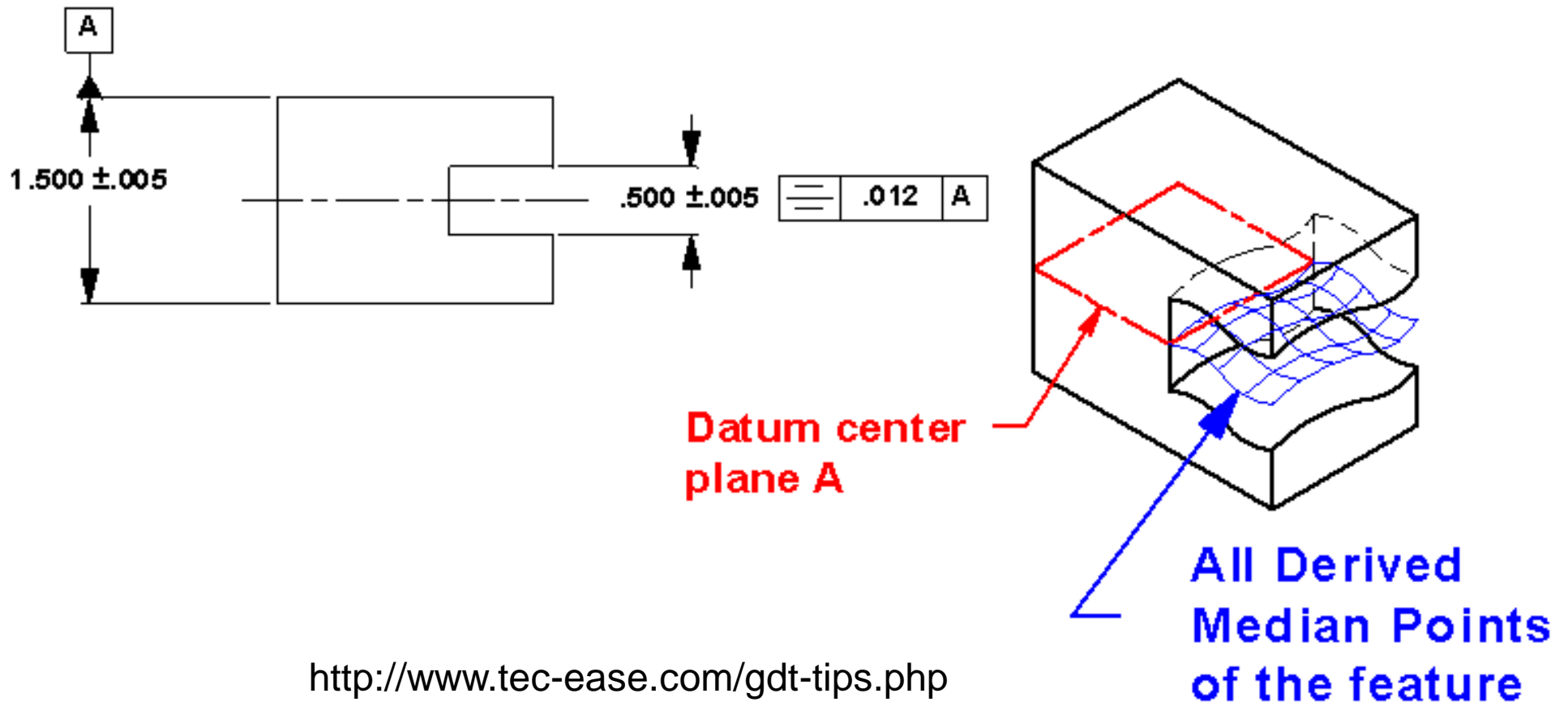
- *Tolerância de simetria*: o campo de tolerância é limitado por duas retas paralelas, ou por dois planos paralelos, distantes no valor especificado e dispostos simetricamente em relação ao eixo (ou plano)





Desvios de forma

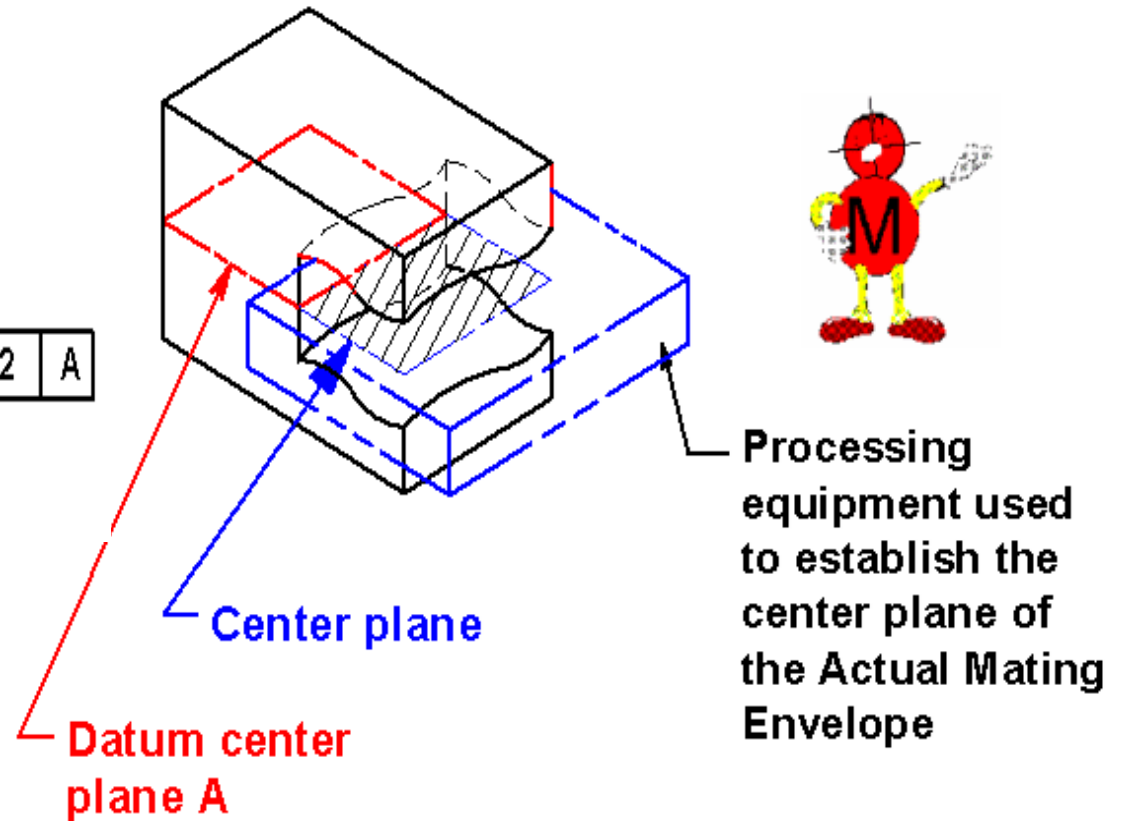
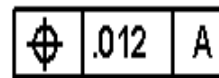
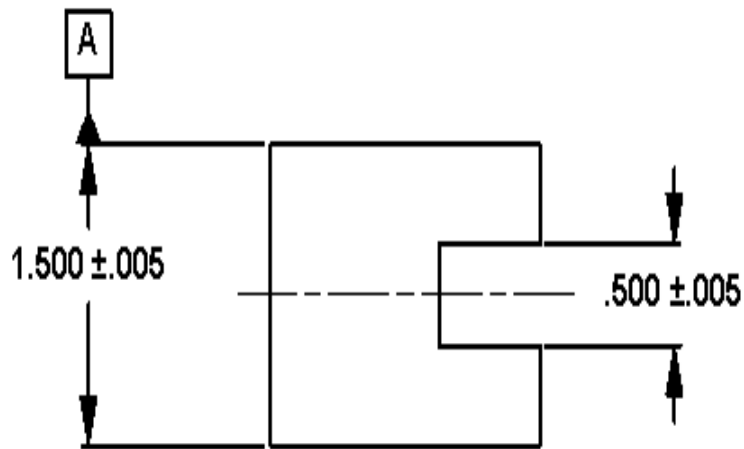
→ *Tolerância de simetria*





Desvios de forma

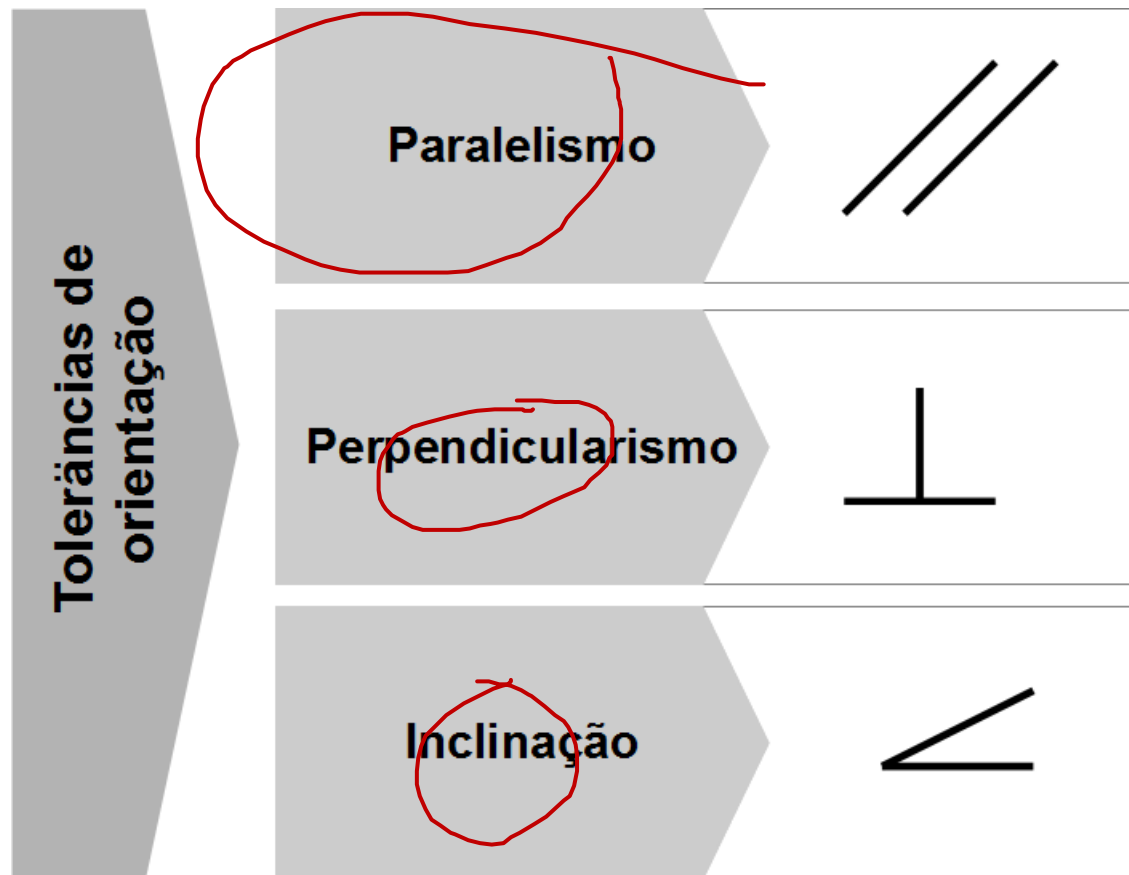
→ *Tolerância de simetria*



<http://www.tec-ease.com/gdt-tips.php>



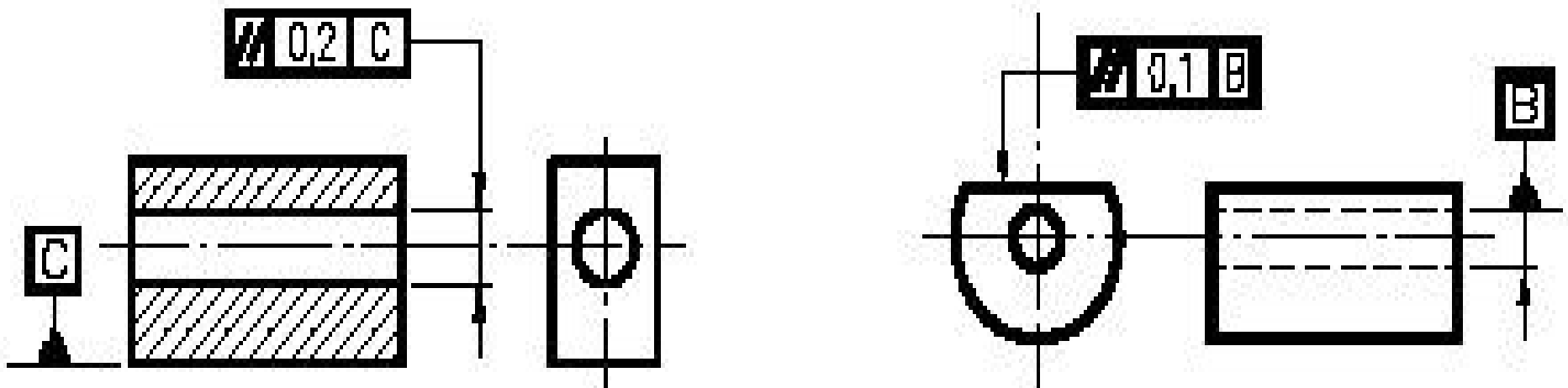
Tolerância de orientação





Desvios de forma

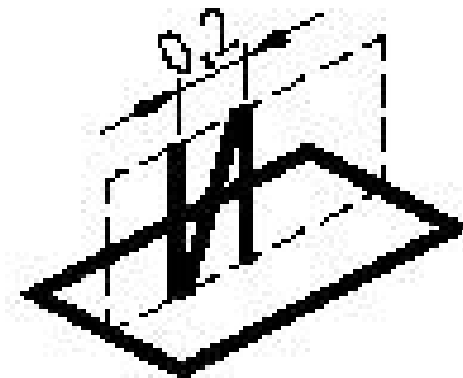
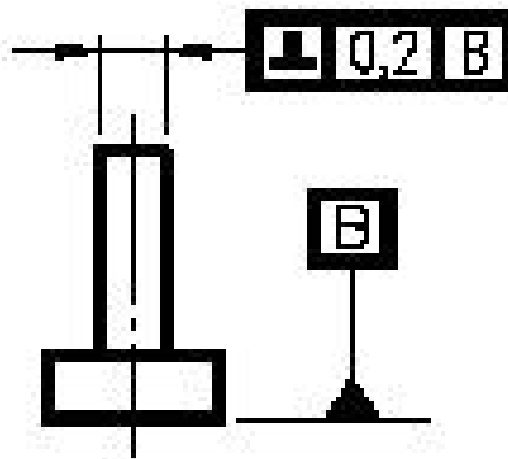
- Tolerância de paralelismo: é a condição de uma linha ou superfície ser equidistante em todos os seus pontos de um eixo ou plano de referência.





Desvios de forma

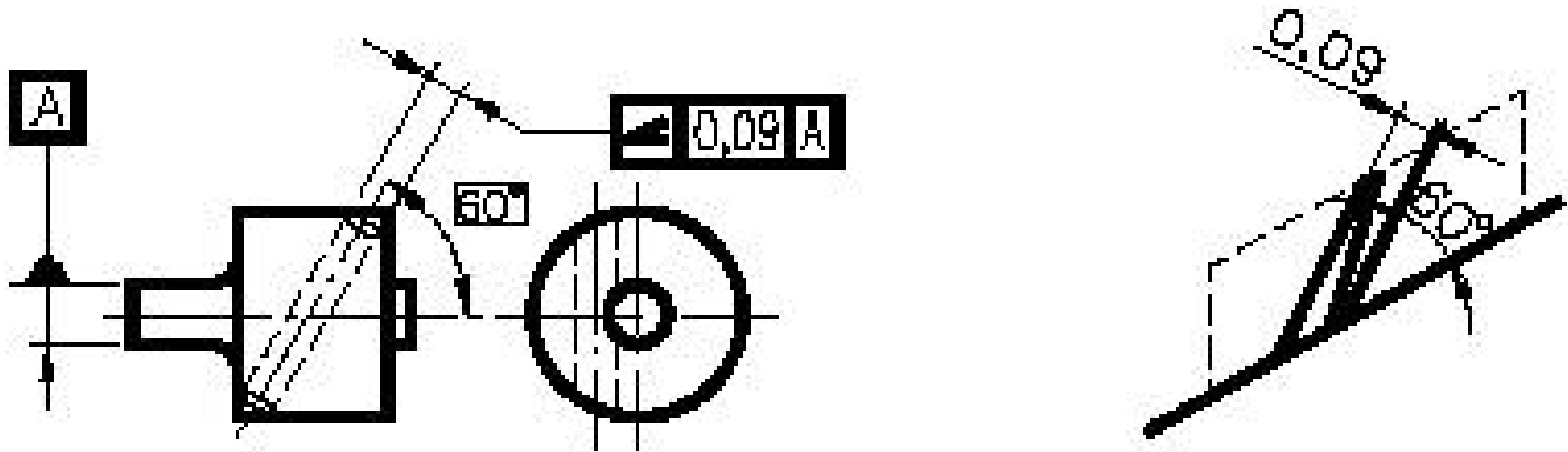
- Tolerância de *perpendicularidade*: é a condição pela qual o elemento deve estar dentro do desvio angular, tomado como referência o ângulo reto entre uma superfície, ou uma reta, e tendo como elemento de referência uma superfície ou uma reta, respectivamente.





Desvios de forma

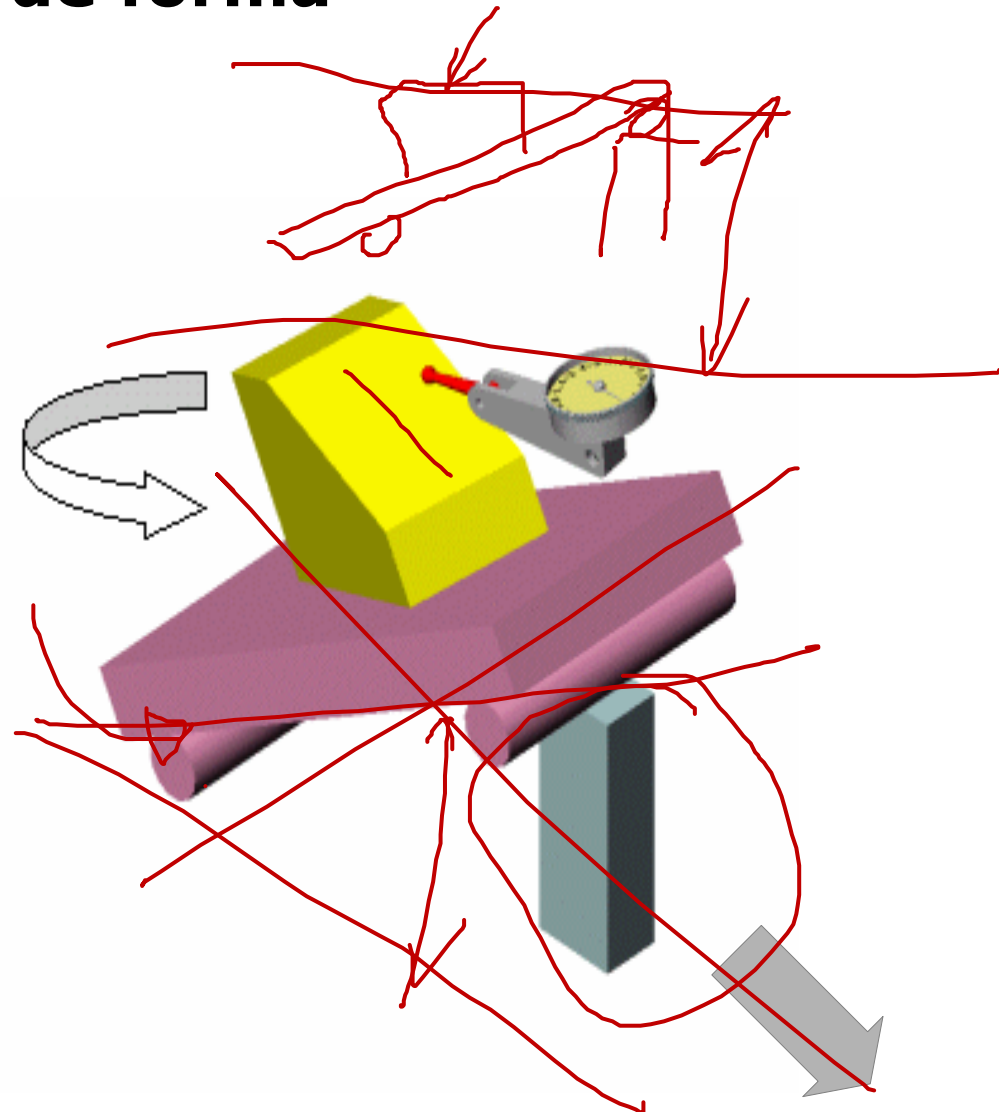
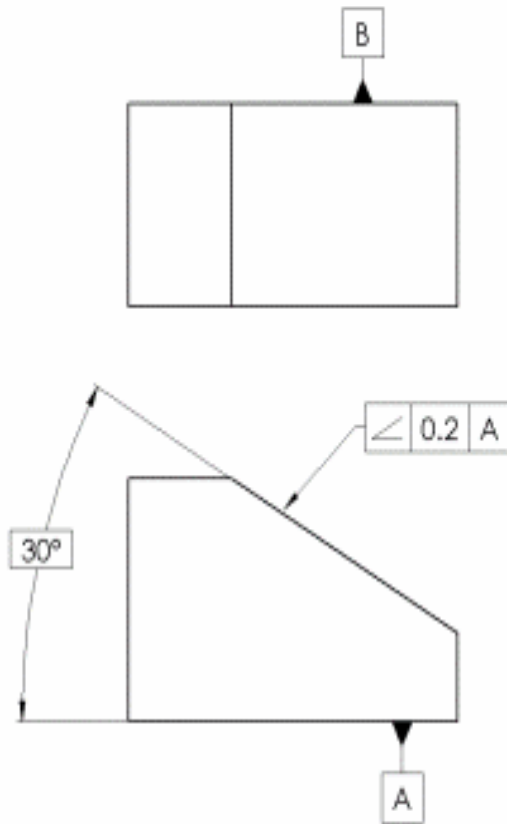
- Tolerância de *inclinação*: o campo de tolerância é limitado por dois planos paralelos, cuja distância é o valor da tolerância, e inclinados em relação à superfície de referência do ângulo especificado.





Desvios de forma

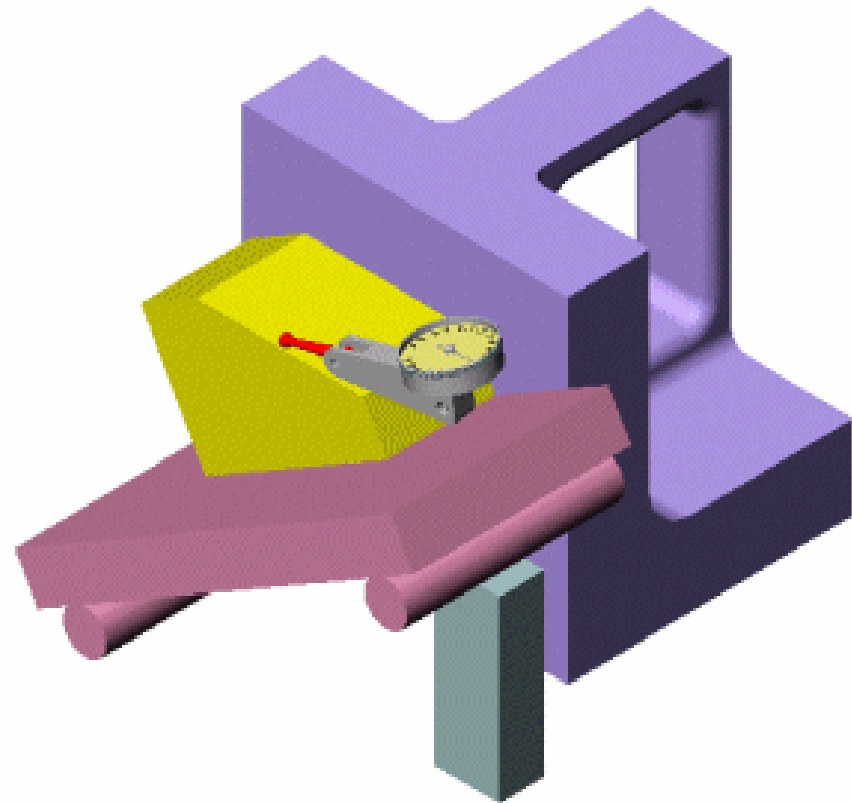
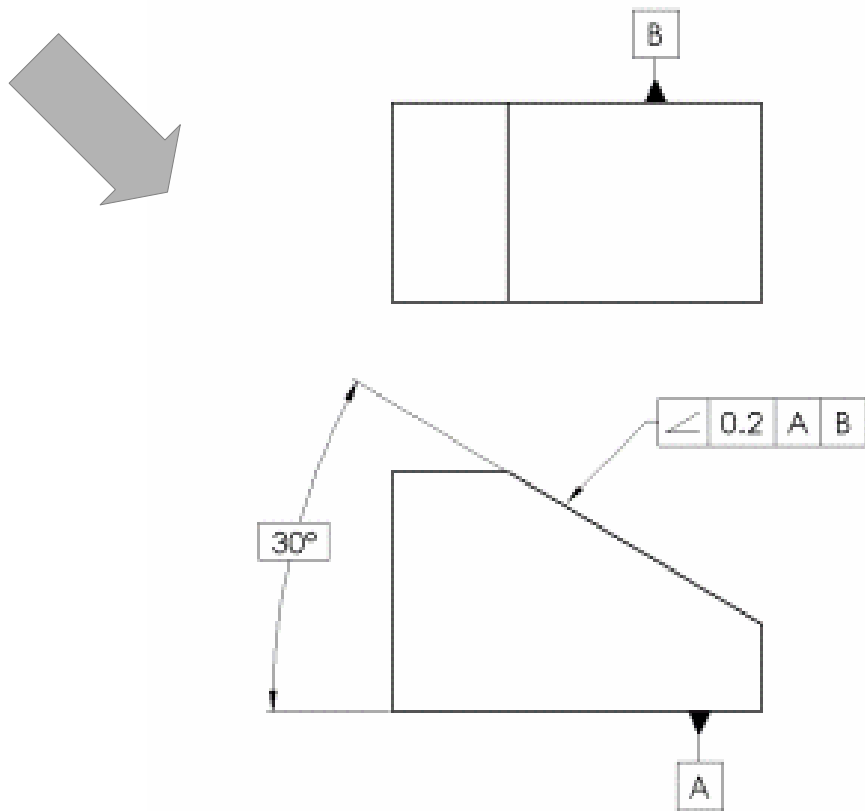
→ Tolerância de *inclinação*





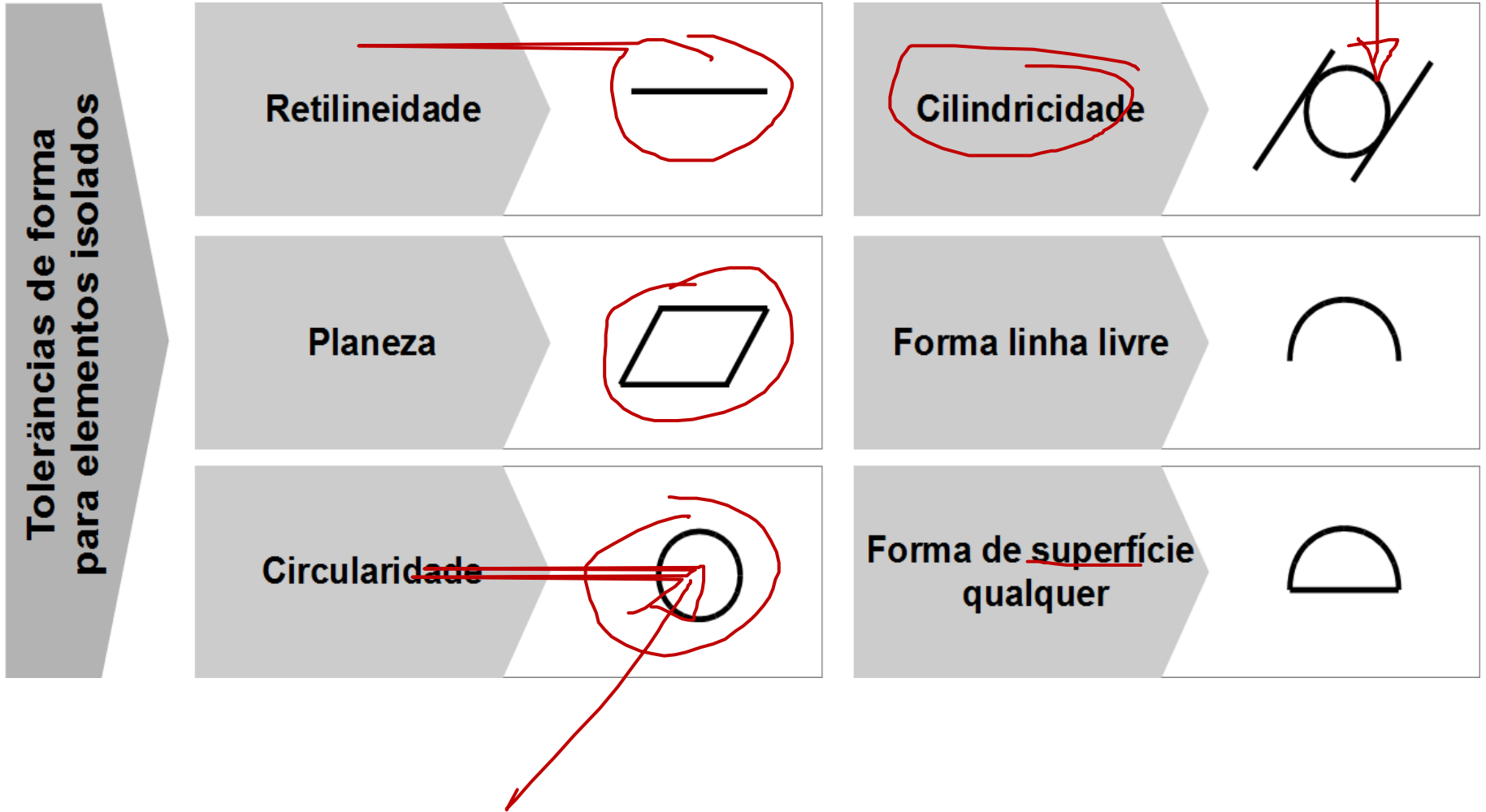
Desvios de forma

→ Tolerância de *inclinação*





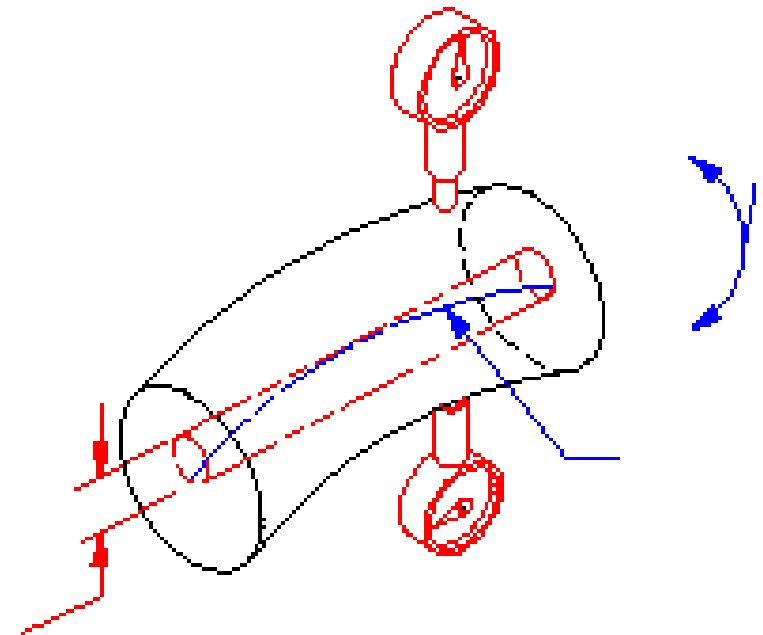
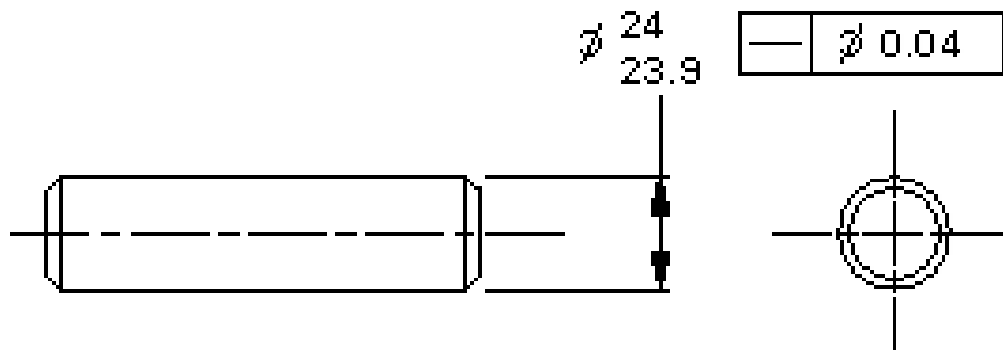
Tolerâncias de forma





Desvios de forma

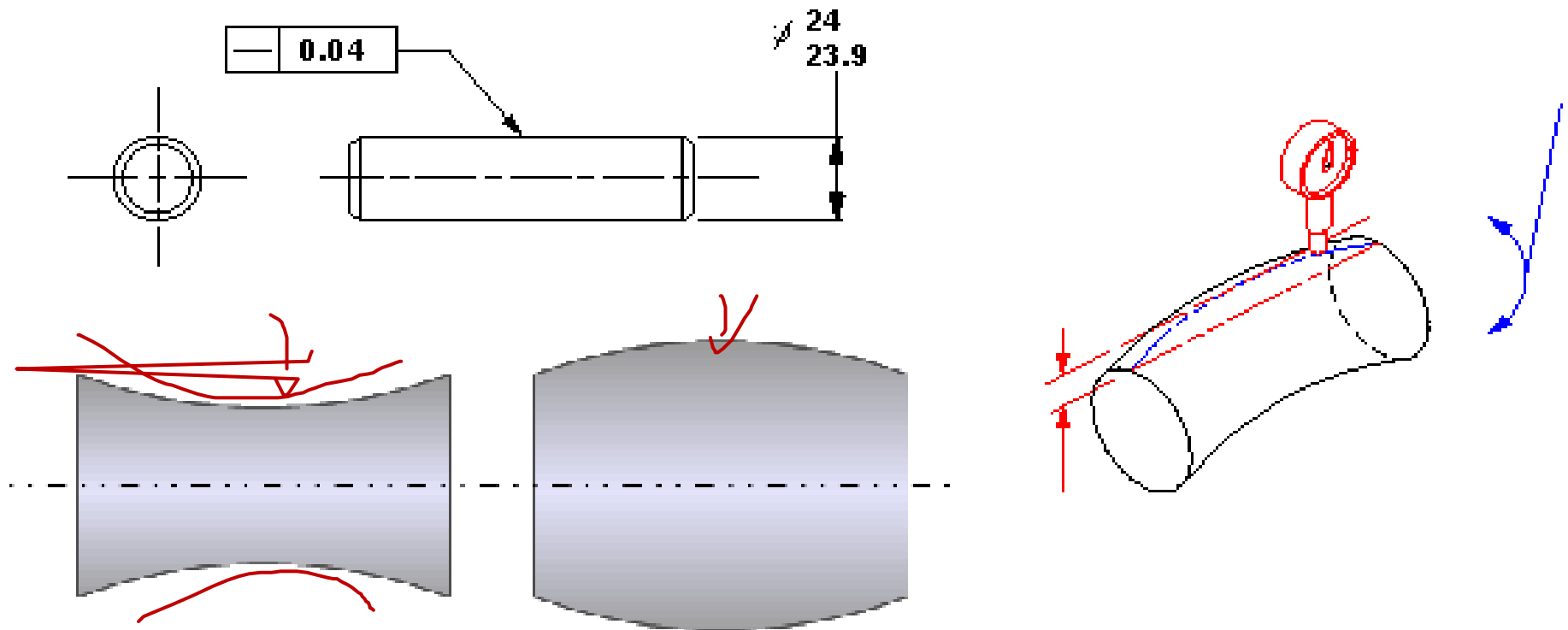
- Tolerância de *retilidade*: é a condição pela qual cada linha deve estar limitada dentro do valor de tolerância especificada





Desvios de forma

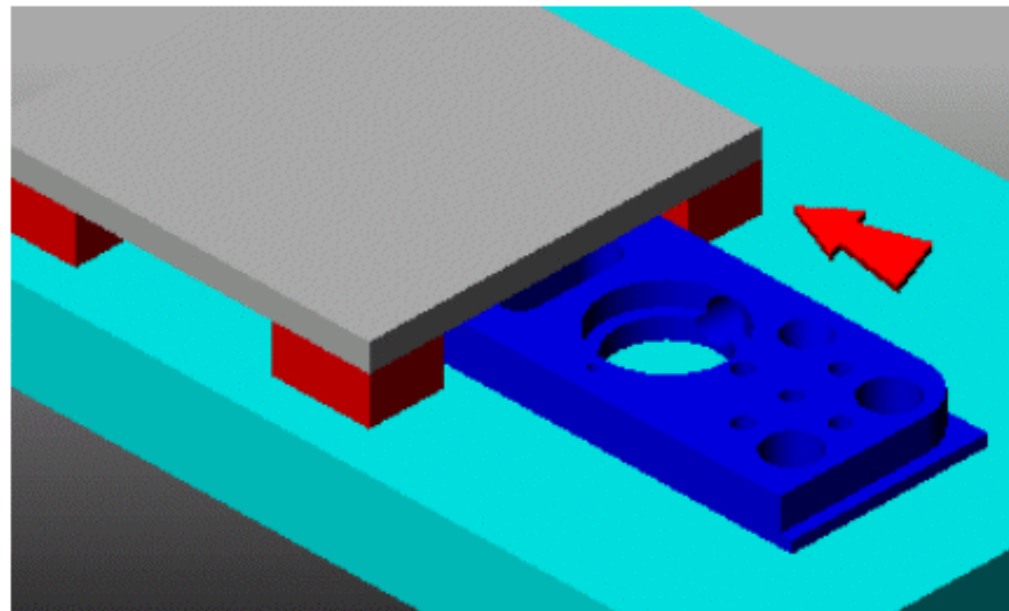
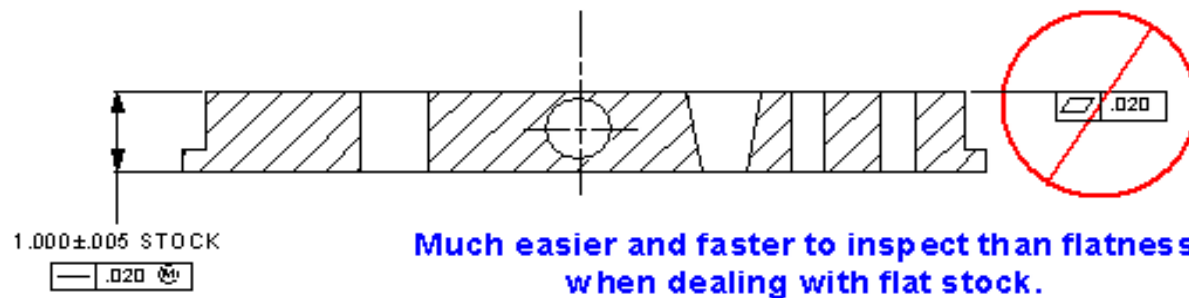
- Tolerância de *retilidade*: é a condição pela qual cada linha deve estar limitada dentro do valor de tolerância especificada





Desvios de forma

→ Tolerância de *retilneidade*

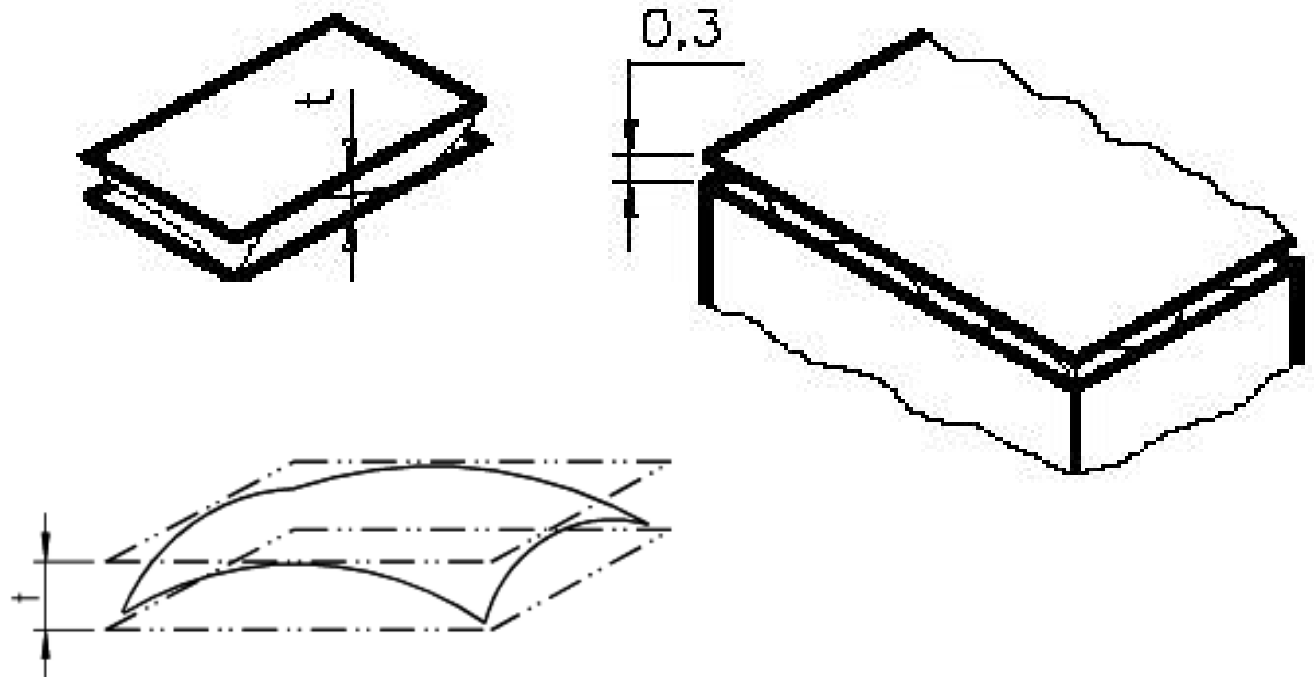
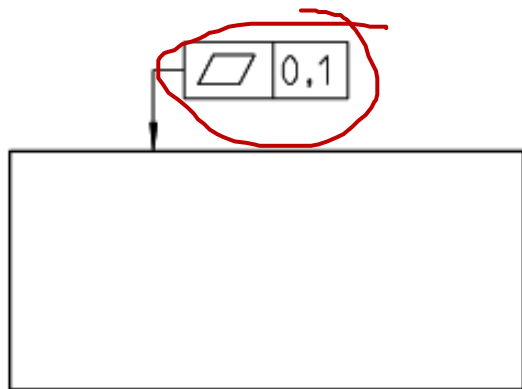


<http://www.tec-ease.com/gdt-tips.php>



Desvios de forma

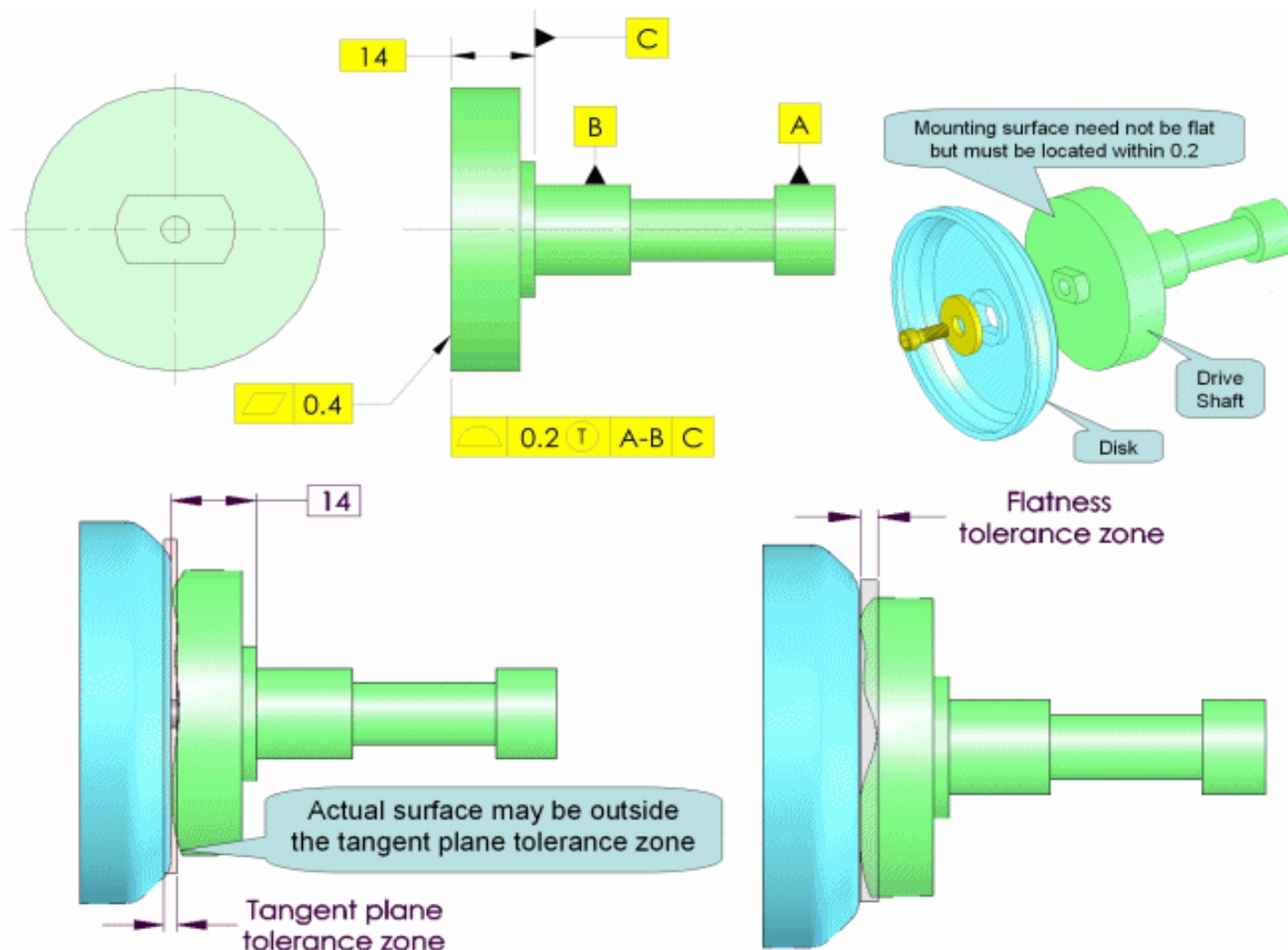
- Tolerância de *planeza*: é a condição pela qual toda superfície deve estar limitada pela zona de tolerância "t", compreendida entre dois planos paralelos, distantes de "t".





Desvios de forma

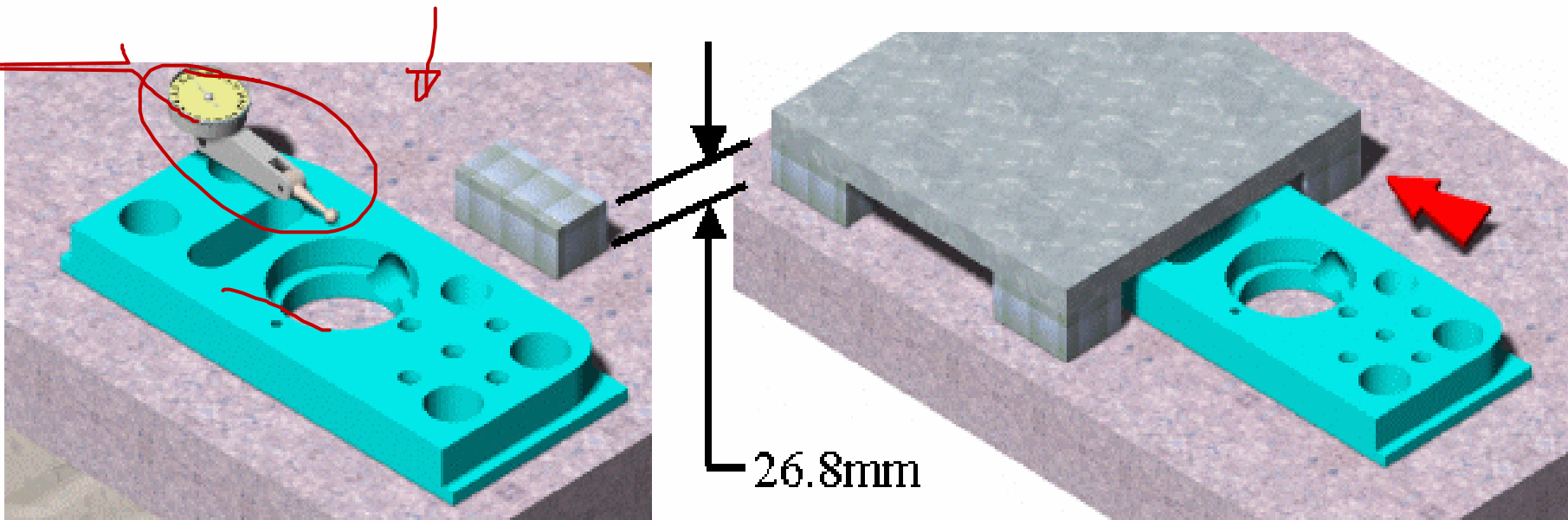
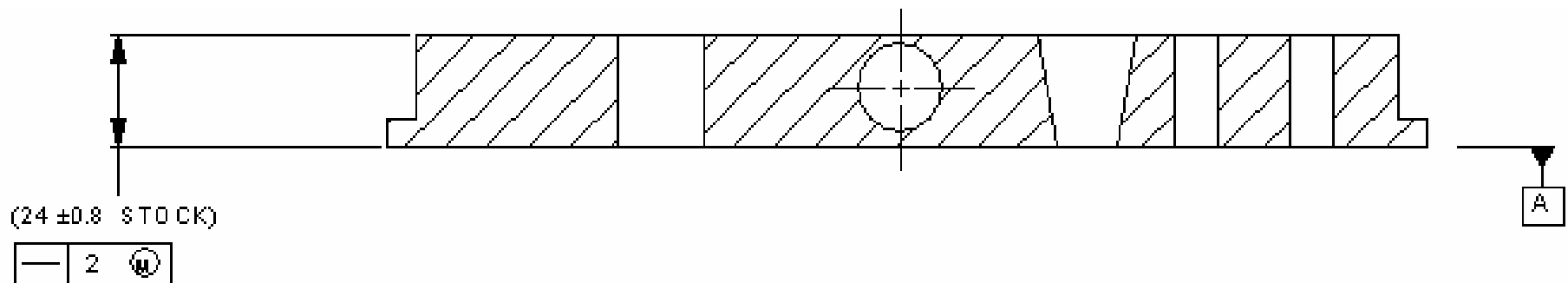
→ Tolerância de *planeza*





Desvios de forma

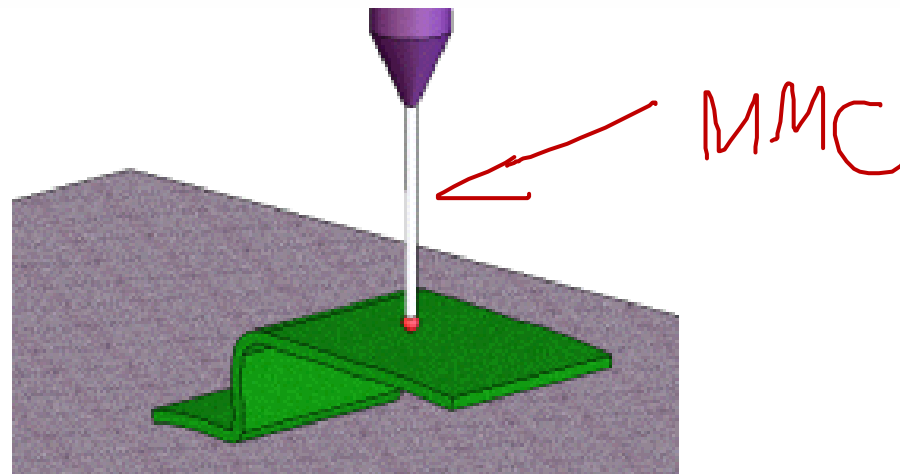
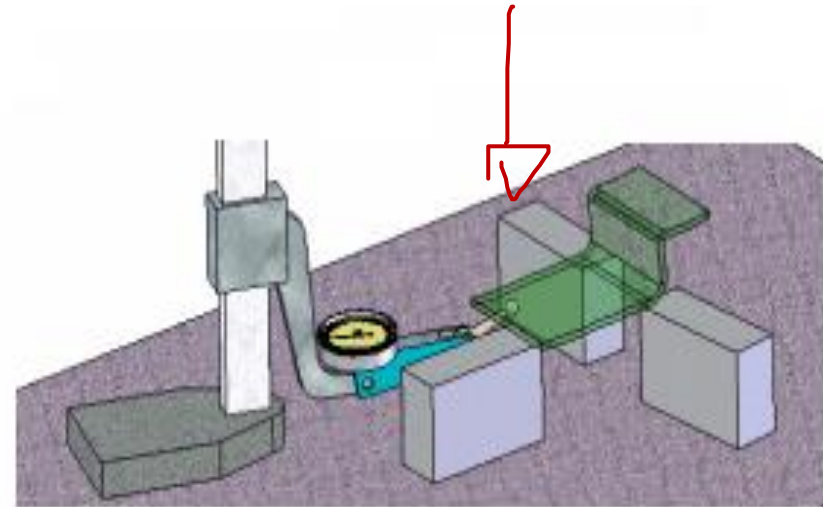
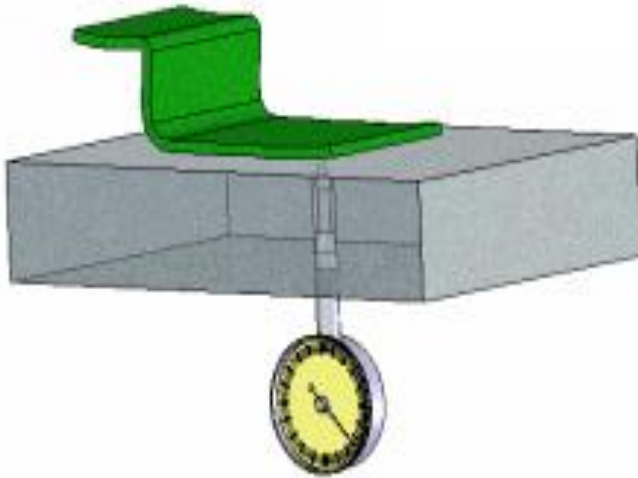
→ Tolerância de *planeza*





Desvios de forma

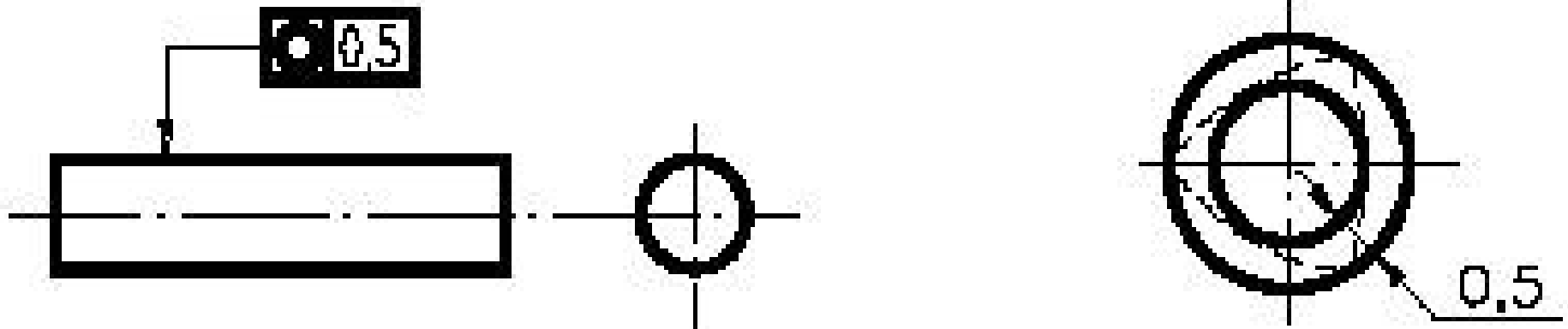
→ Tolerância de *planeza*





Desvios de forma

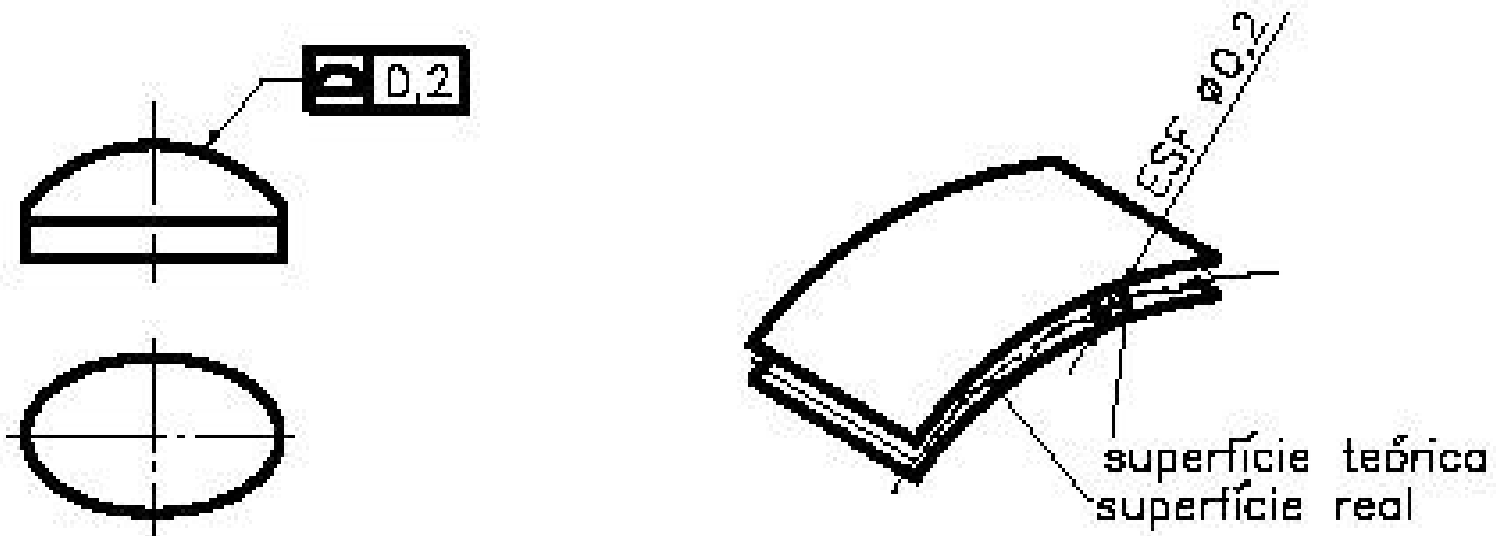
- Tolerância de *circularidade*: condição pela qual qualquer círculo deve estar dentro de uma faixa definida por dois círculos concêntricos, distantes no valor da tolerância especificada





Desvios de forma

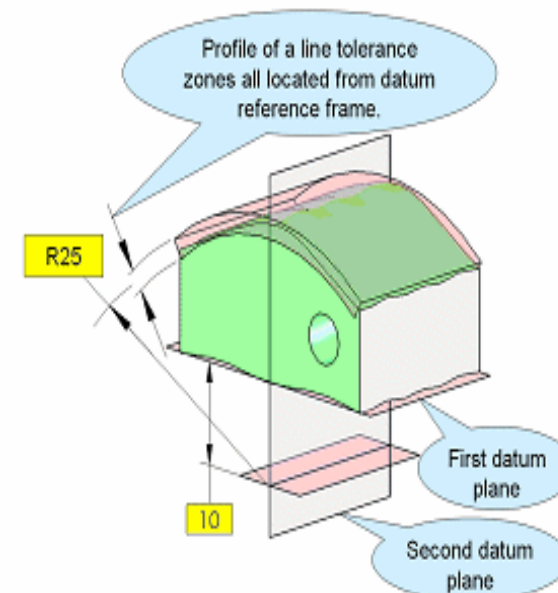
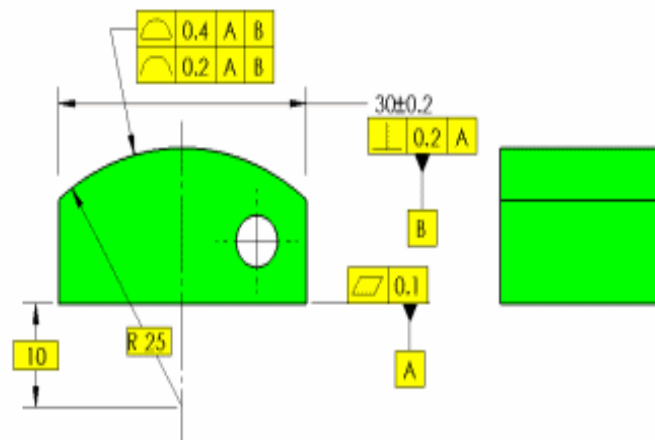
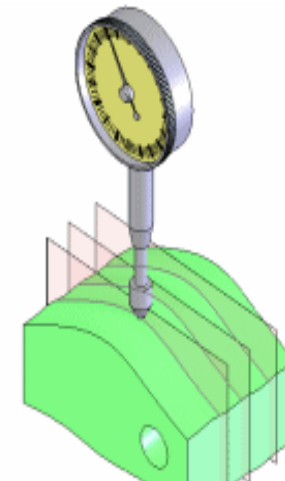
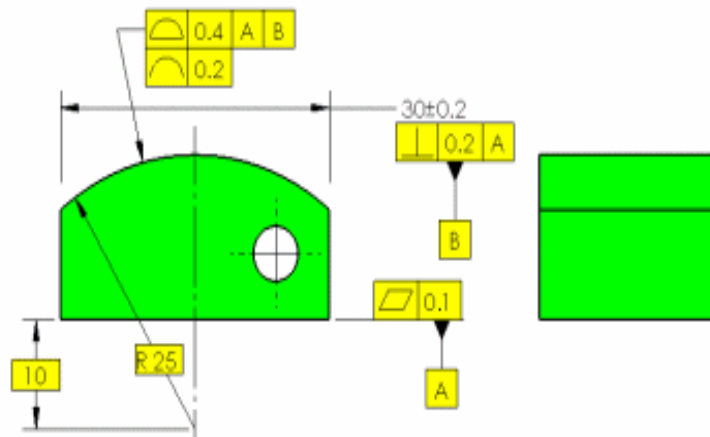
- Tolerância de *forma de superfície*: o campo de tolerância é limitado por duas superfícies envolvendo esferas de diâmetro igual à tolerância especificada e cujos centros estão situados sobre uma superfície que tem a forma geométrica correta





Desvios de forma

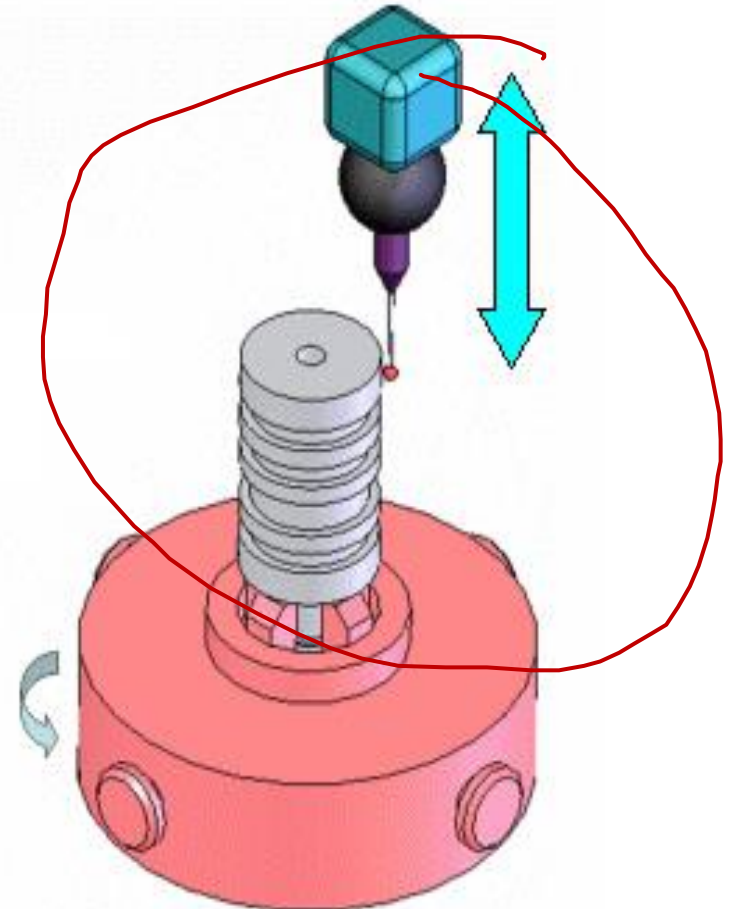
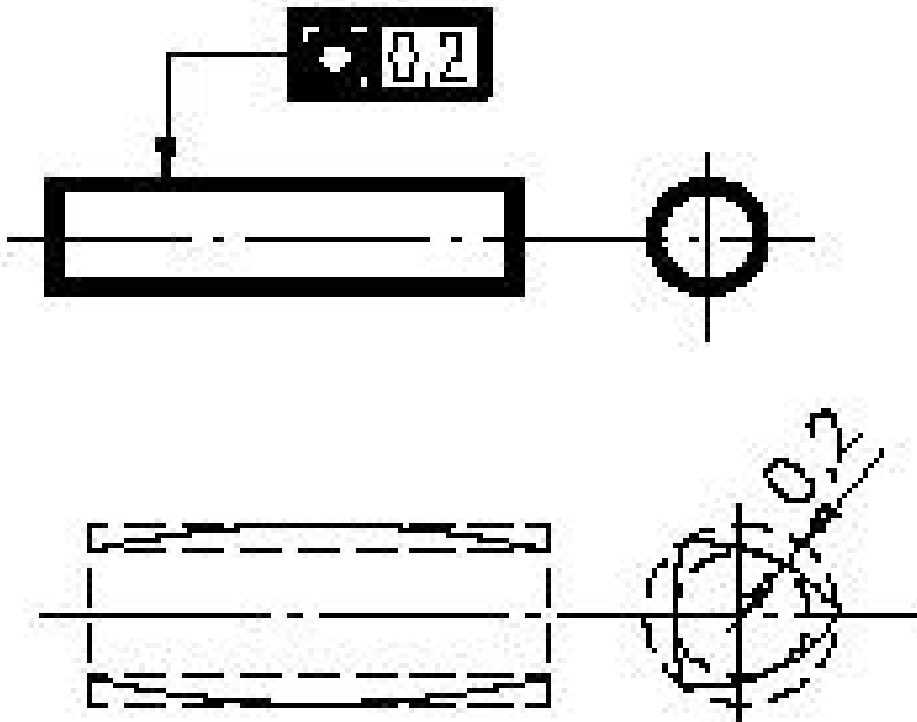
→ Tolerância de *forma de superfície*





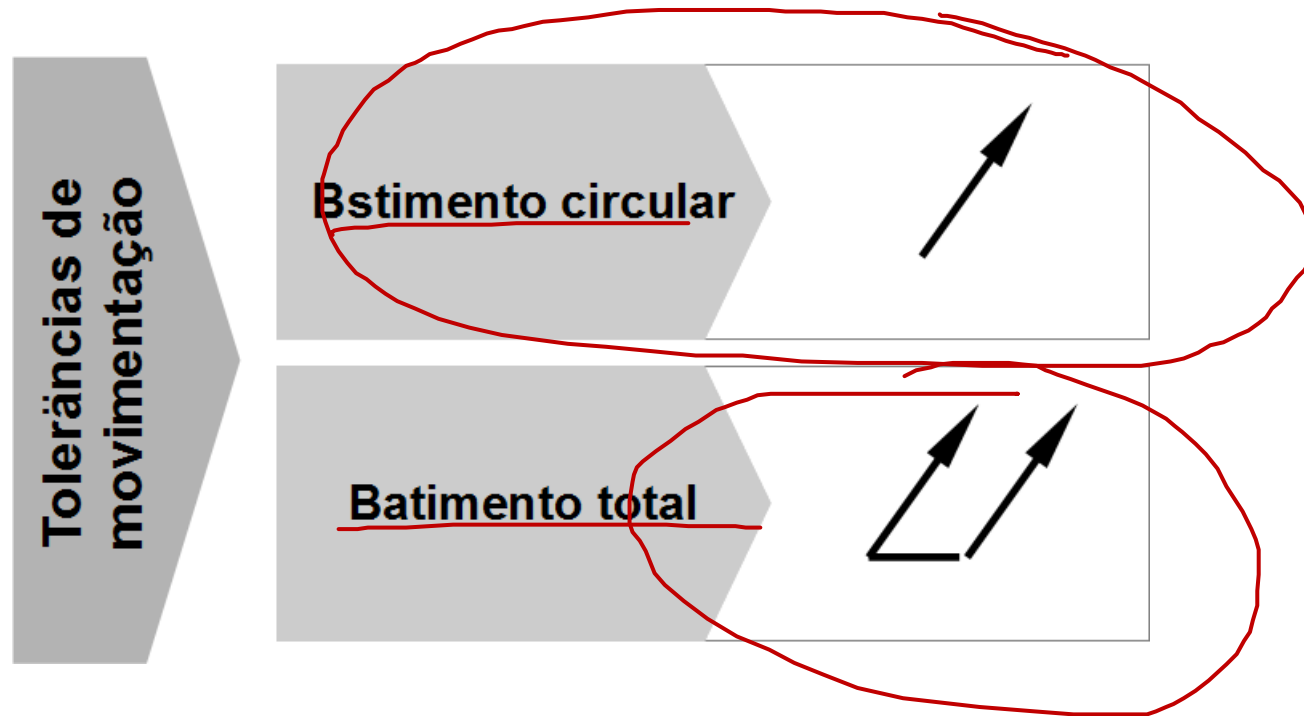
Desvios de forma

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





Tolerâncias de movimentação



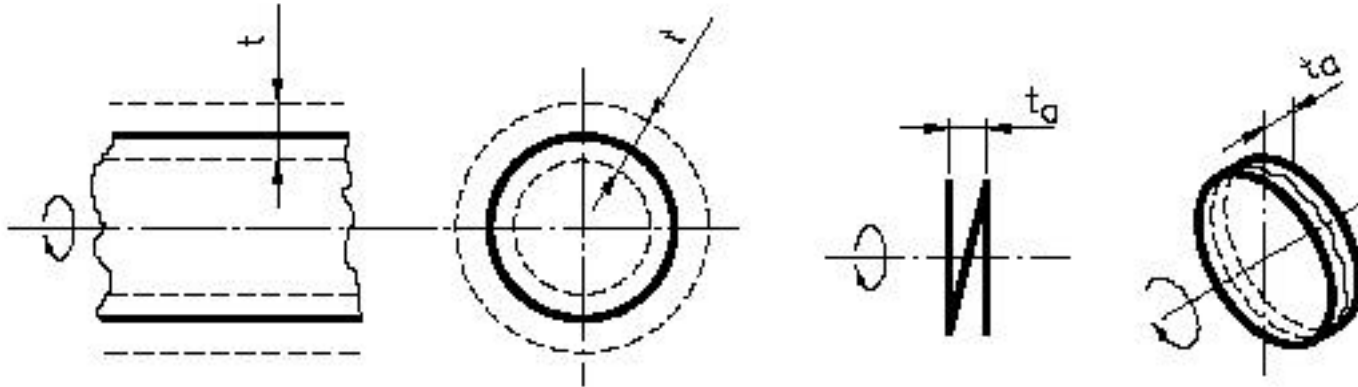


Tolerâncias de movimentação

- · *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.

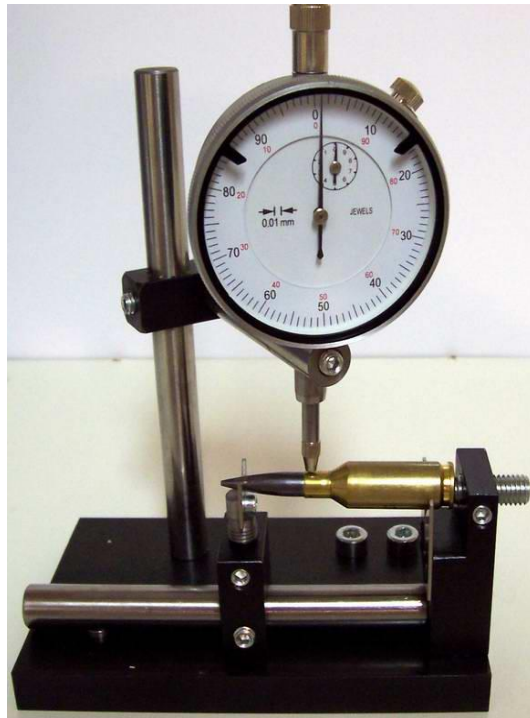


Tolerâncias de movimentação

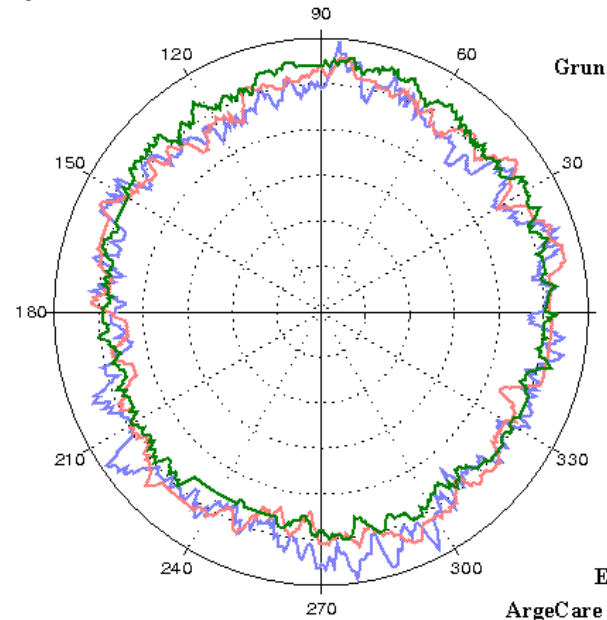


L03_15-01-2008
R03_15-01-2008
R04_15-01-2008

rMax = 0.16
rMax = 0.12
rMax = 0.11

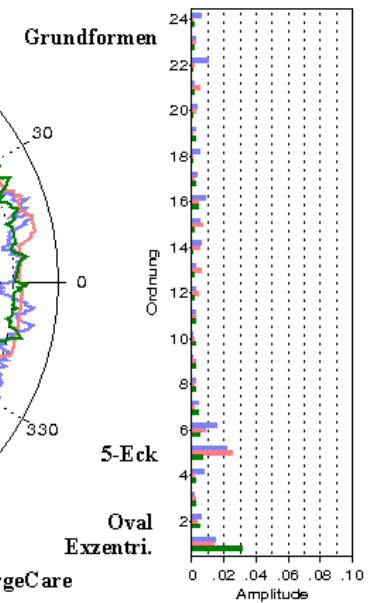


Analyse Radunrundheiten



Plasterabstand 0.10 mm

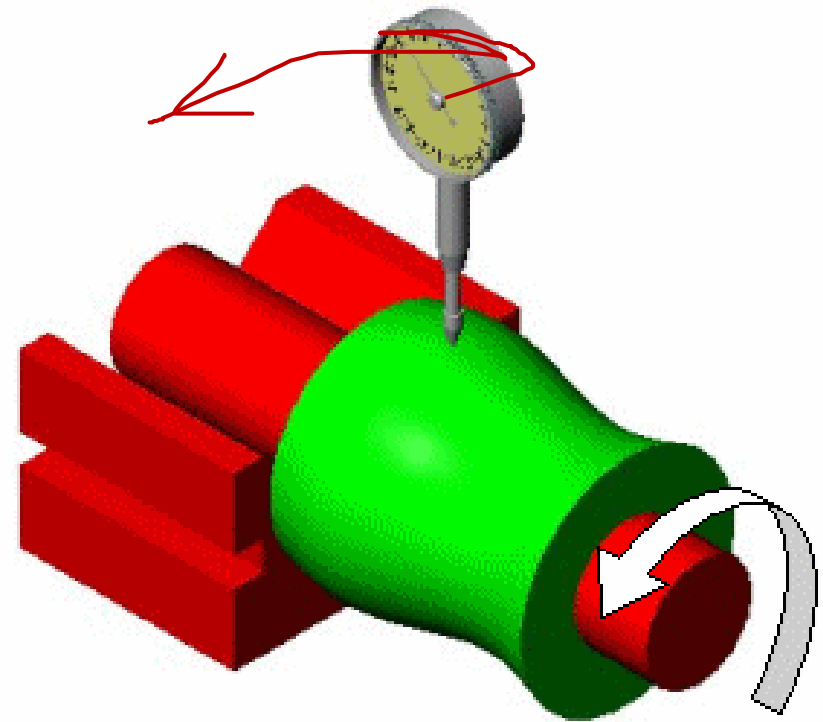
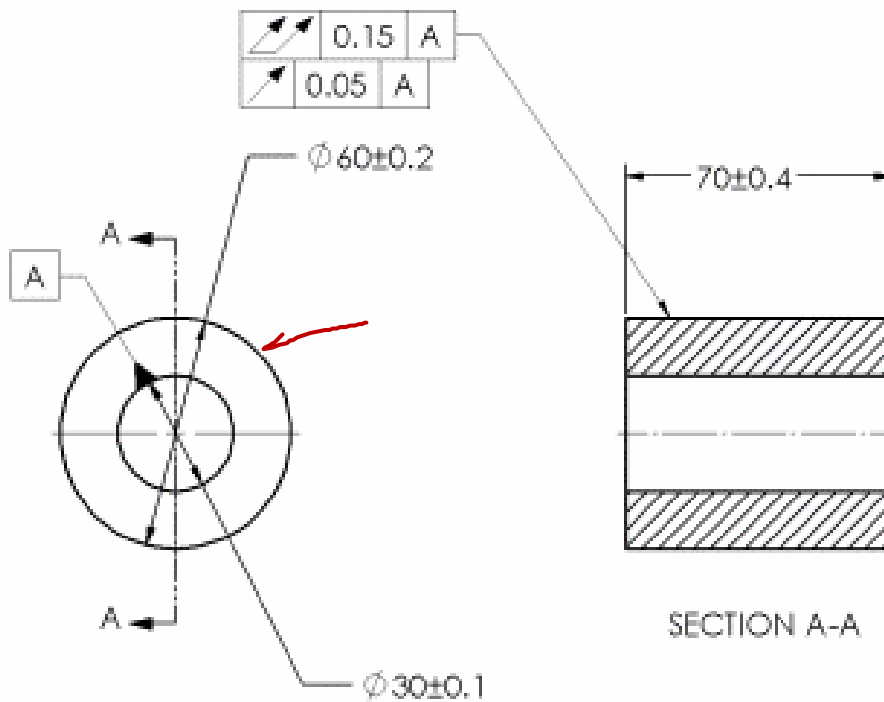
AC-Rundlauf





Tolerâncias de movimentação

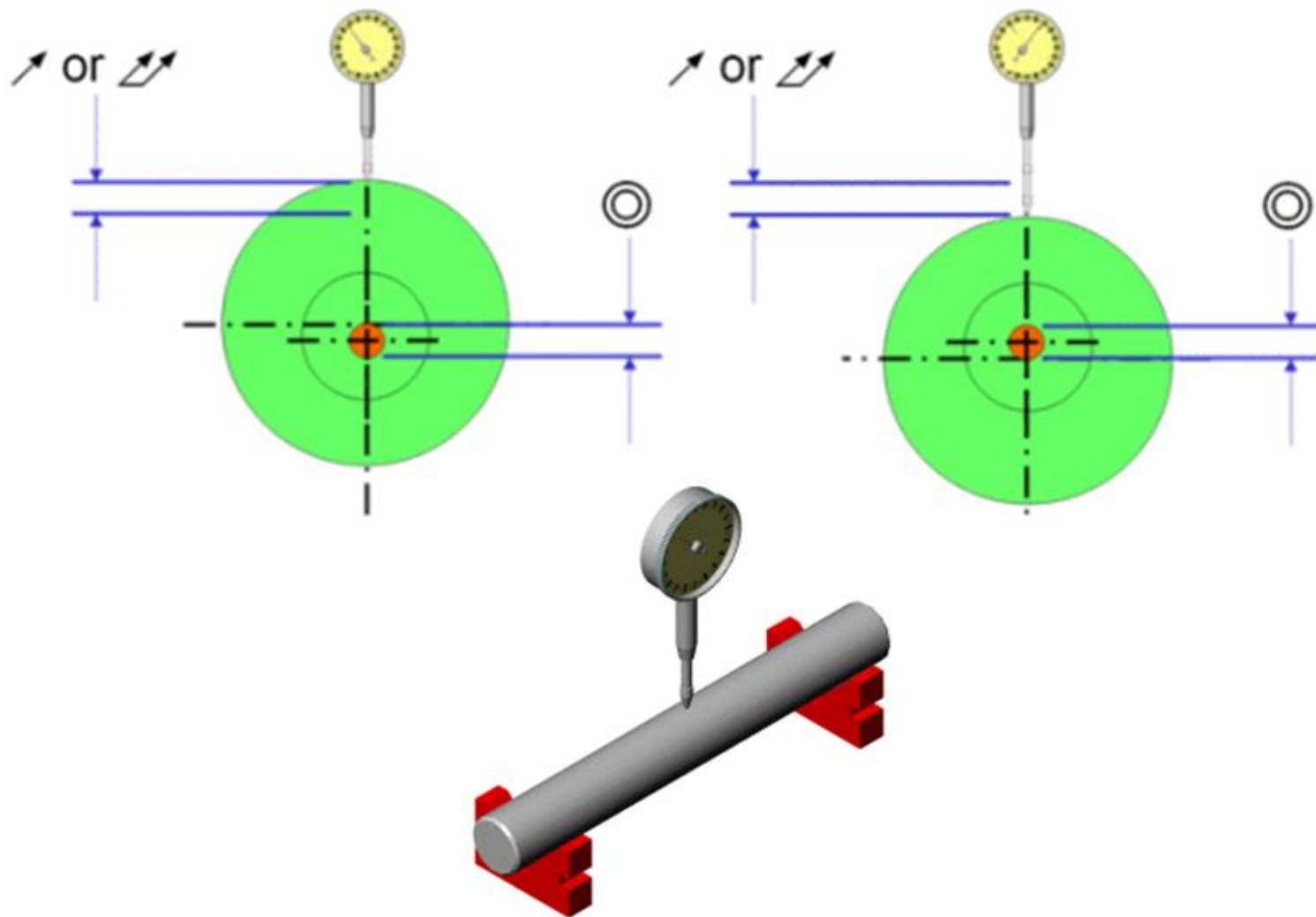
Batimento circular





Tolerâncias de movimentação

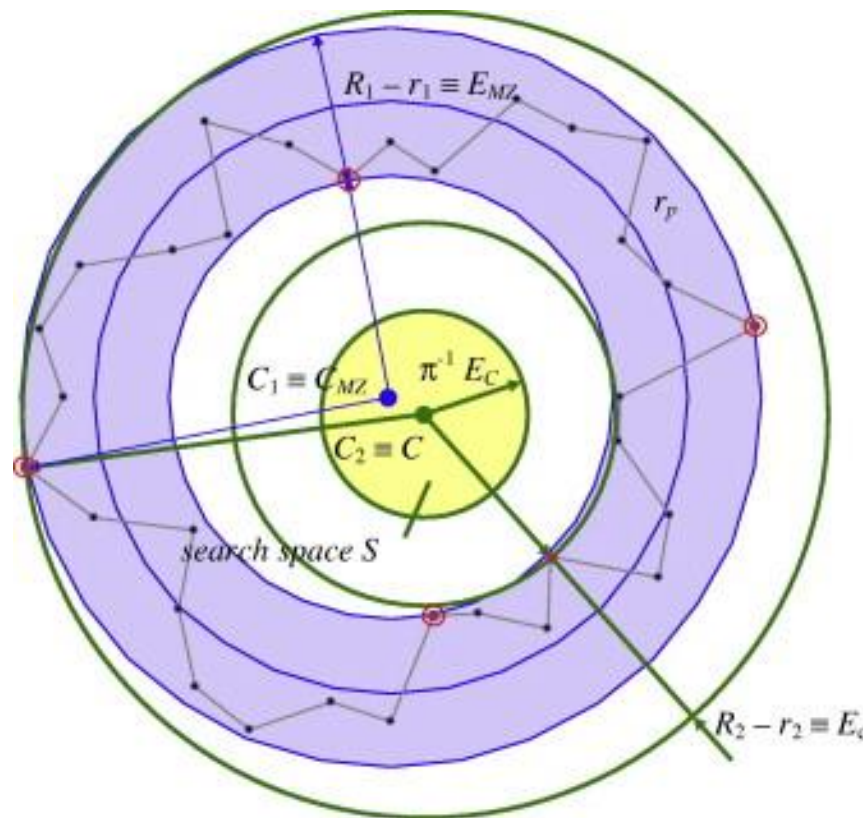
Batimento circular





Circularidade

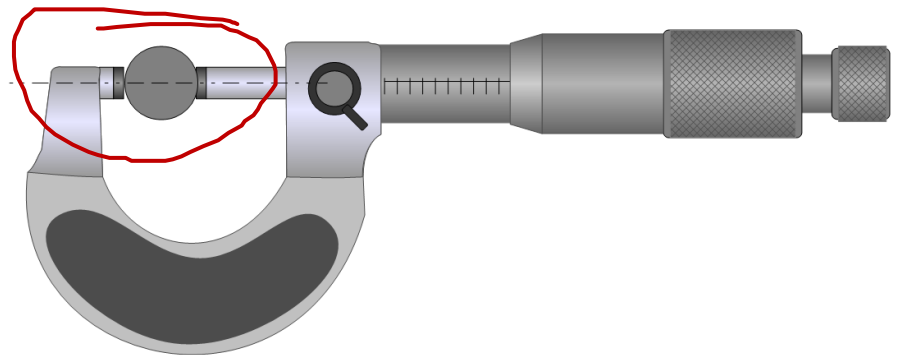
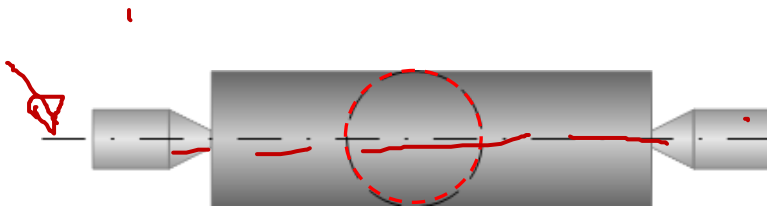
- **Circularidade** – aplica-se a todas as geometrias circulares de uma superfície de revolução ou esfera.





Circularidade

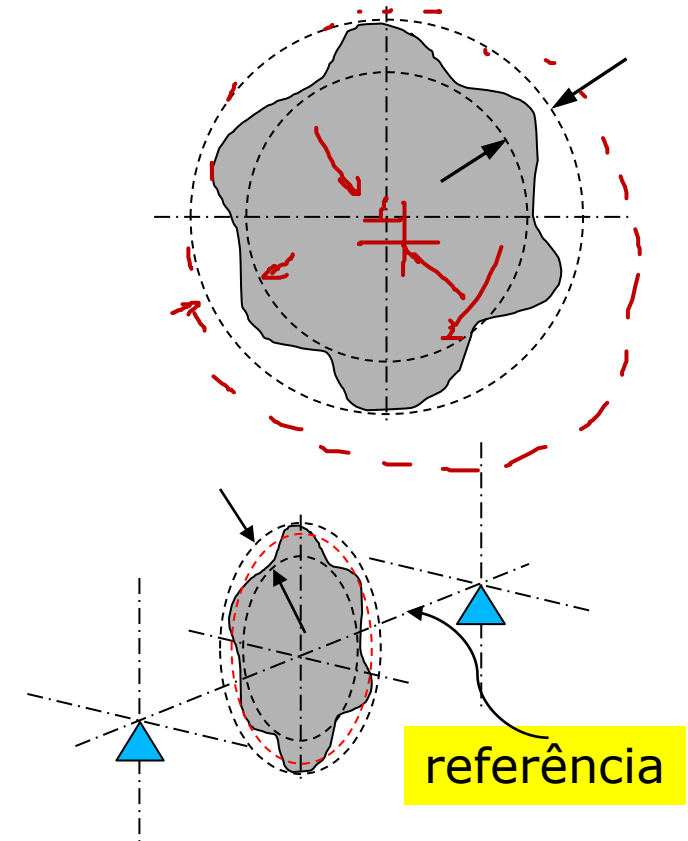
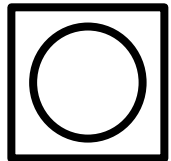
- A medição das diferenças no diâmetro não é o suficiente para determinar a circularidade.
- A medição da circularidade necessita da definição de um eixo de referência, geralmente provido por um sistema rotacional.





Circularidade Definições

- **Tolerância de circularidade** - é a região limitada no plano de medição perpendicular ao eixo por dois círculos concêntricos, afastados por uma distância t
- **Batimento** - refere-se ao desvio superficial com relação a um referência perfeita quando o mensurado é colocado em rotação com relação ao seu eixo de revolução.

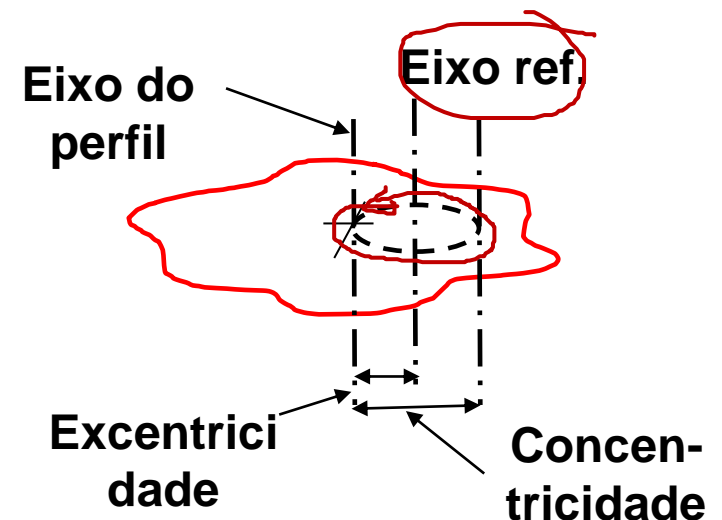
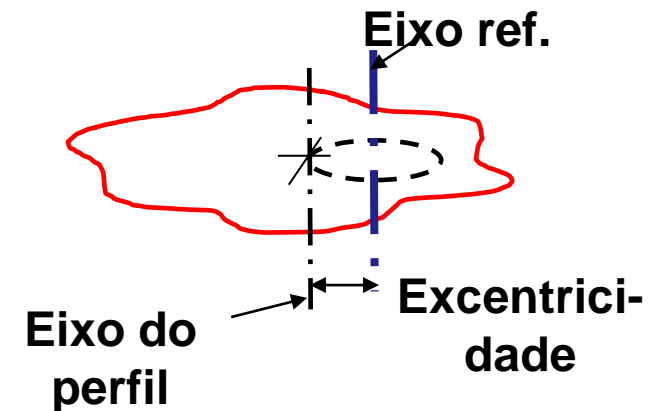




Circularidade Definições

- **Excentricidade** – é definida com o desvio do centro de um perfil com relação ao eixo de referência. É um vetor, com módulo, direção (ângulo) e sentido.
- **Concentricidade** – e o desvio dos eixos de cada seção de uma superfície de revolução com relação ao eixo de referência. É a órbita do eixo de perfil com relação ao eixo de referência.

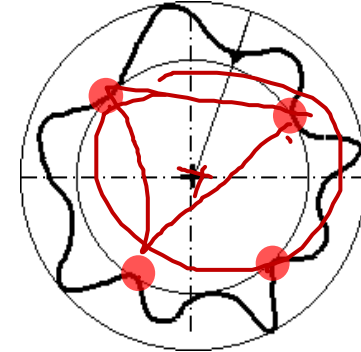
A concentricidade é 2X a excentricidade



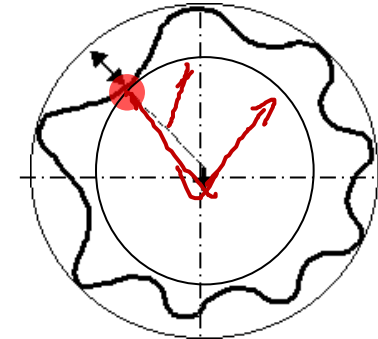


Circularidade Definições

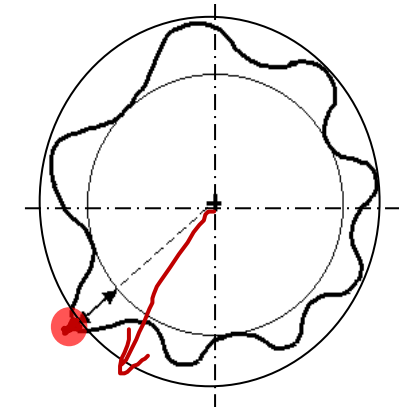
- Círculo de mínima zona MZC



- Mínimo círculo circunscrito



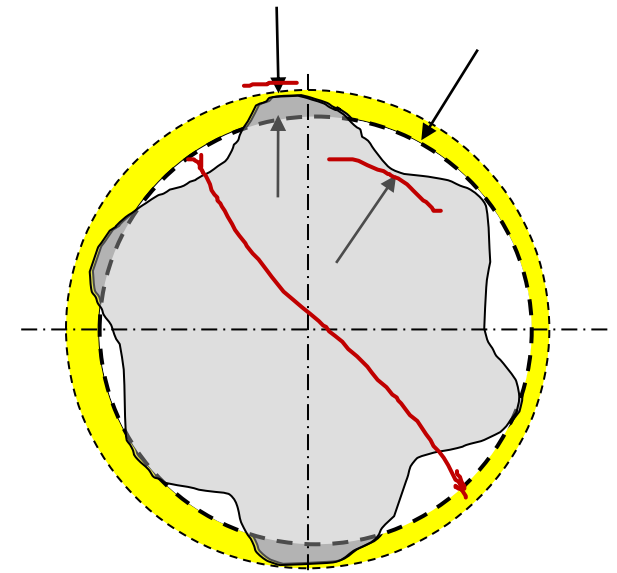
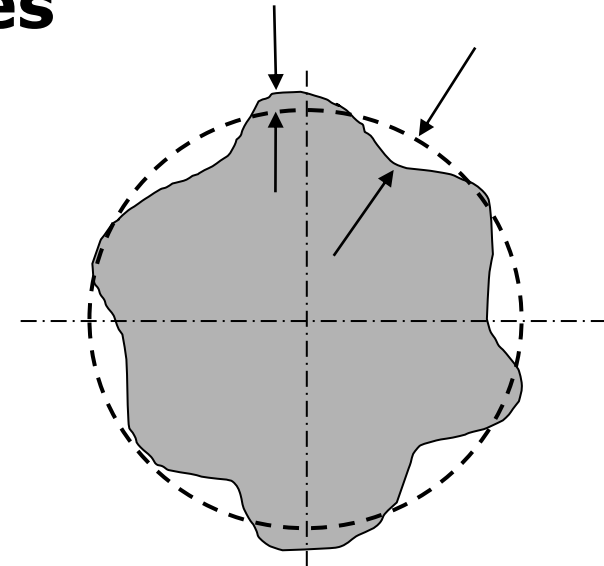
- Máximo círculo inscrito





Circularidade Definições

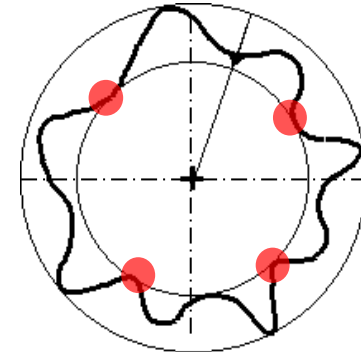
- **Circulo de referência** – para medir a circularidade é necessário comparar o perfil mensurado com um círculo ideal ou de referência. projeto
- **Circulo de referência por mínimos quadrados** – é um círculo onde a soma das áreas internas é igual a das áreas externas



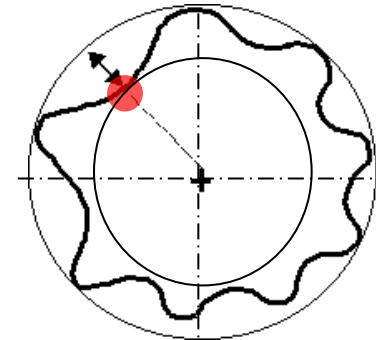


Circularidade Definições

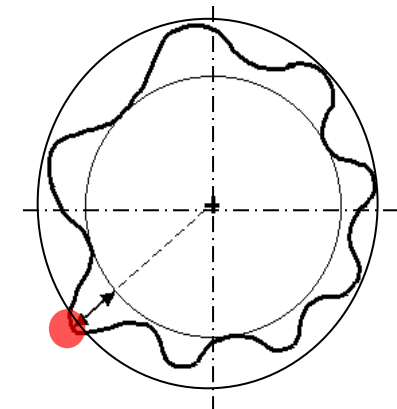
- Círculo de mínima zona MZC



- Mínimo círculo circunscrito



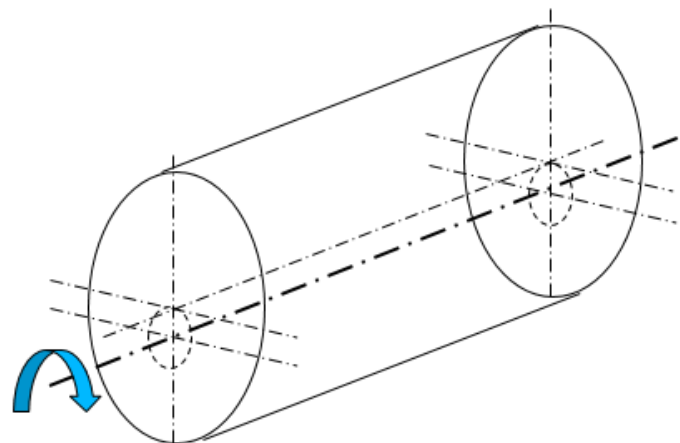
- Máximo círculo inscrito





Circularidade

- **Medições de baixa precisão** – Algumas medições de circularidade não necessitam ser de alta precisão. Em alguns componentes a medição da circularidade não é o objetivo principal. Para isto uma medição simples, ou de traço único as vezes é suficiente.



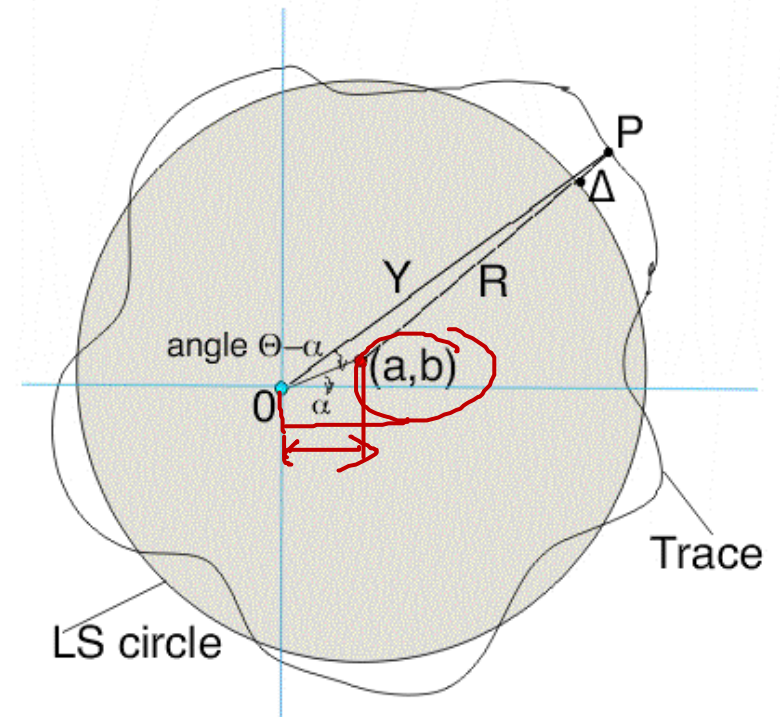


Circularidade

- Circularidade pelo método do traço único (*Single trace method*)

Onde:

- O – centro de giro
- Y – distância entre o centro de giro e perfil (Trace)
- P – é a distância do círculo de referência até o perfil
- R – Raio do círculo de referência
- Ângulo é dado por P-R
- O círculo de referência é obtido por mínimos quadrados





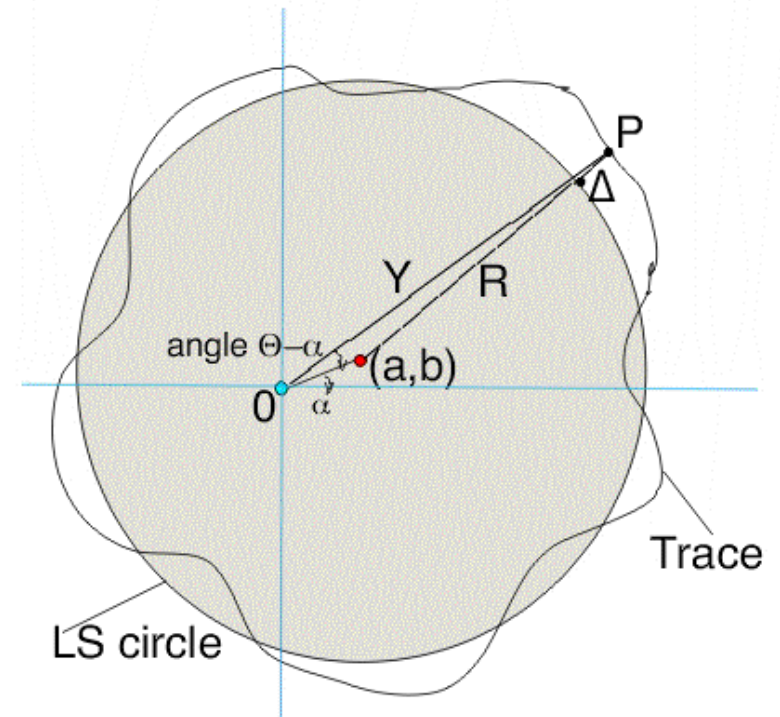
Circularidade

- Circularidade pelo método do traço único (*Single trace method*)
- Para este propósito o método *Single Trace* faz a varredura em 360° medindo Y_i para incrementos de θ_i da distância entre o centro de rotação e o perfil (trace).
- O círculo de mínimos quadrados é ajustado para os dados segundo:

$$\hat{R} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Y_i$$

$$\hat{a} = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N Y_i \cos(\theta_i)$$

$$\hat{b} = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N Y_i \sin(\theta_i)$$

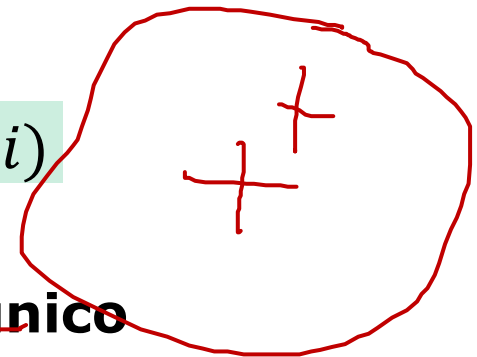




Não circularidade da geometria da peça

- Não circularidade da geometria da peça ocorre quando o desvio do perfil (trace) do círculo no ângulo θ_i , o qual define a não circularidade da peça é estimado por:

$$\hat{\Delta} = Y_i - \hat{R} - \hat{a} \cos(\theta_i) - \hat{b} \sin(\theta_i)$$



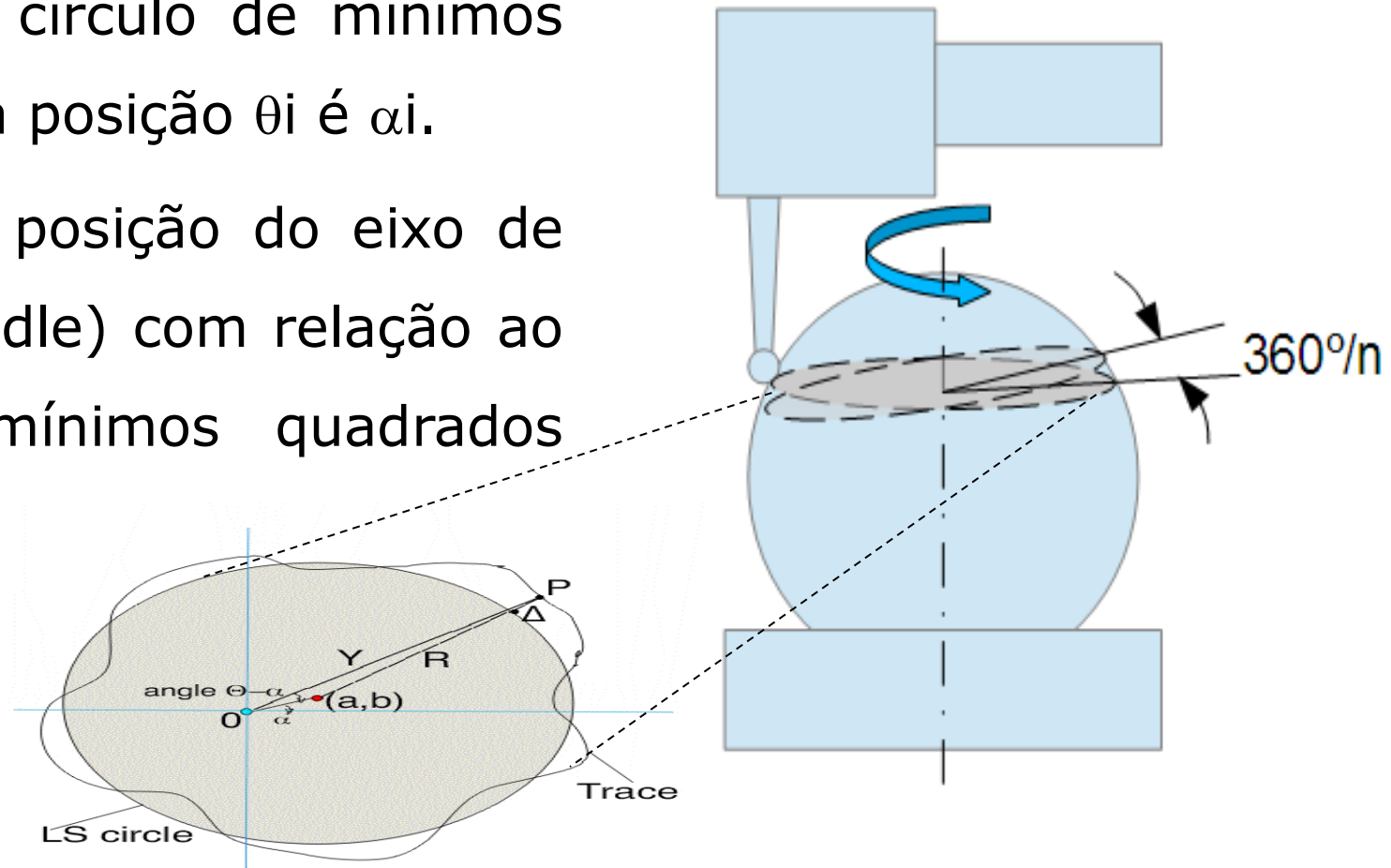
Restrições do método de traço único

- Neste método os desvios apresentados são uma composição do erro de giro da peça e do sistema de rotacional. Estes dois erros não podem ser separados, pois em geral o erro de giro do sistema rotacional é muito pequeno e dentro de limites aceitáveis, e pode ser desprezado.



Circularidade

- Medição de alta precisão por Múltiplos Perfis
- O desvio do círculo de mínimos quadrados na posição θ_i é α_i .
- O desvio da posição do eixo de rotação (spindle) com relação ao círculo de mínimos quadrados em α_i é β_i .





Circularidade

- Medição de alta precisão por Múltiplos Perfis
- A estimativa dos parâmetros individuais é obtida como uma solução por mínimos quadrados, que requer 6 restrições. Esta garantem que a soma dos desvios horizontais e verticais do centro do círculo de mínimos quadrados seja zero.



Circularidade

- Medição de alta precisão por Múltiplos Perfis

- As expressões são:

$$\hat{\alpha}_i = \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n t_{k-i+j+n} Z_{kj}$$

$$\hat{\beta}_i = \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n t_{k-i+1+n} Z_{kj}$$

$$\hat{R}_j = \sum_{k=1}^n Z_{kj}$$

$$\hat{a}_j = \frac{2}{N} \sum_{k=1}^N Z_{kj} \cos(\theta_k)$$

$$\hat{b}_j = \frac{2}{N} \sum_{k=1}^N Z_{kj} \sin(\theta_k)$$

- Onde:

$$Z_{ij} = K \cos(\delta) Y_{ij}$$

$$t_m = \frac{n-3}{n}; \text{ para } m = 1$$

$$t_m = \frac{1}{n^2} (1 + 2 \cos(\theta_m)) ; \text{ para } 2 \leq m \leq n$$

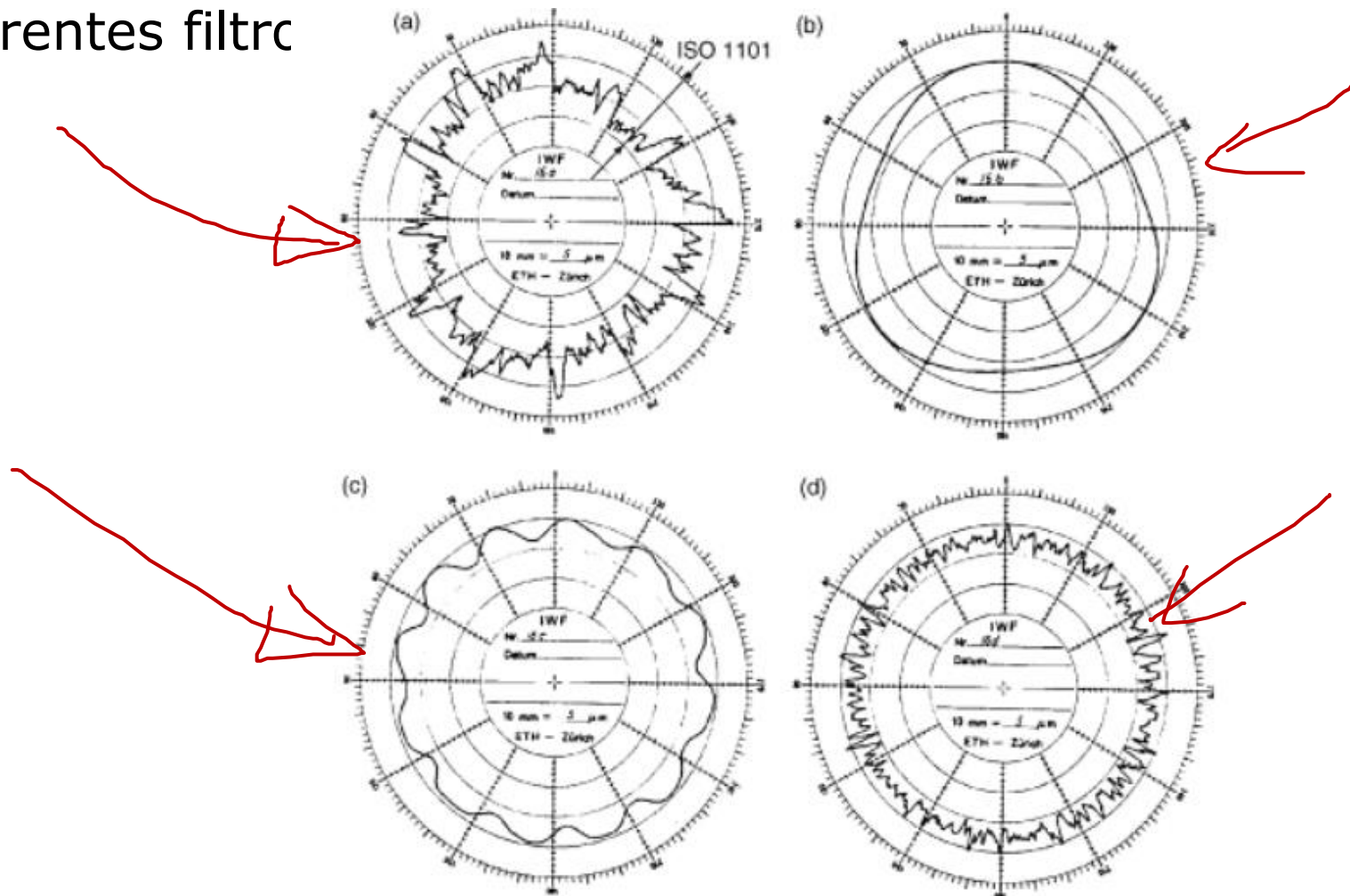
- E o desvio padrão para o perfil estimado é dado por:

$$S_{\alpha i} = S_{\beta i} = \frac{\sqrt{n-3}}{n} S; \text{ para } i = 1..n$$



Circularidade

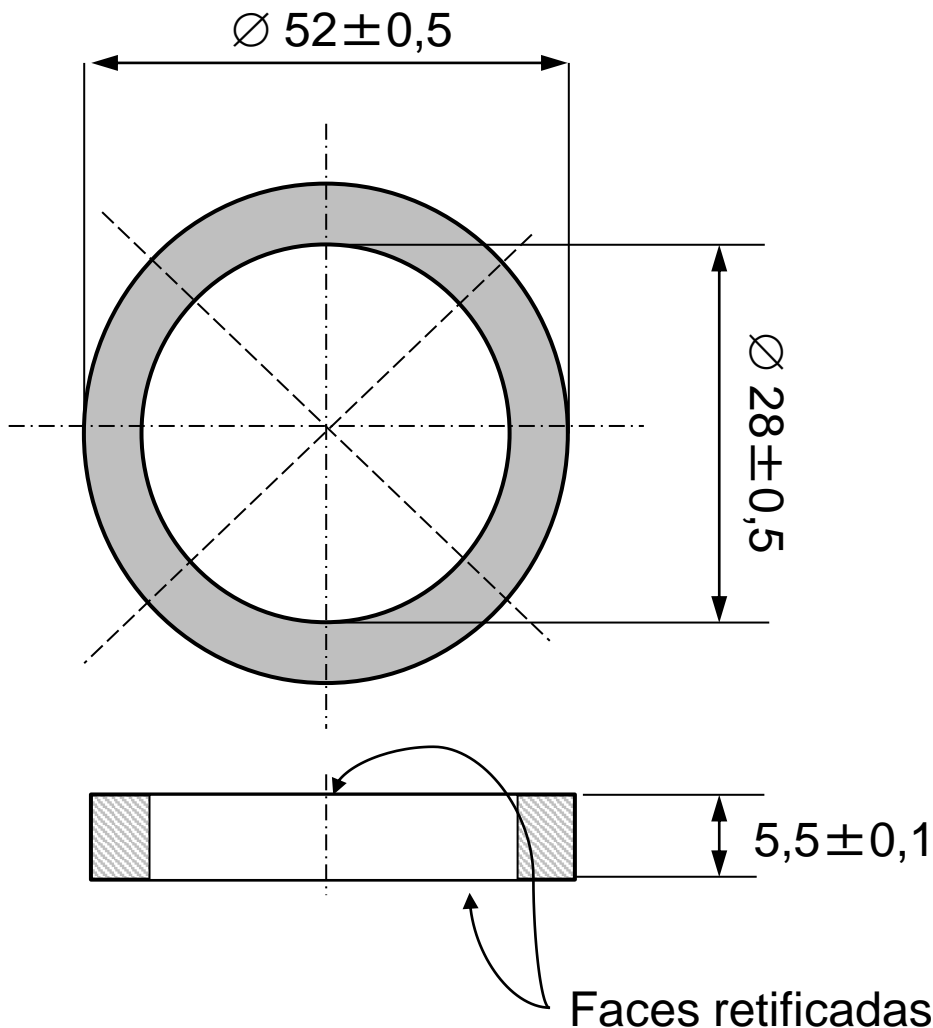
- Medição de alta precisão por Múltiplos Perfis com diferentes filtros





Experimento - 3

Avaliação circularidade de um anel de ensaios



Descrição da peça

Anel de ensaio tribológico

Material: Aço ABNT 1045 temperado

Medição dos diâmetros interno e externo

- Paquímetro digital
- F.O. 0-155mm
- Resolução: 0,01mm

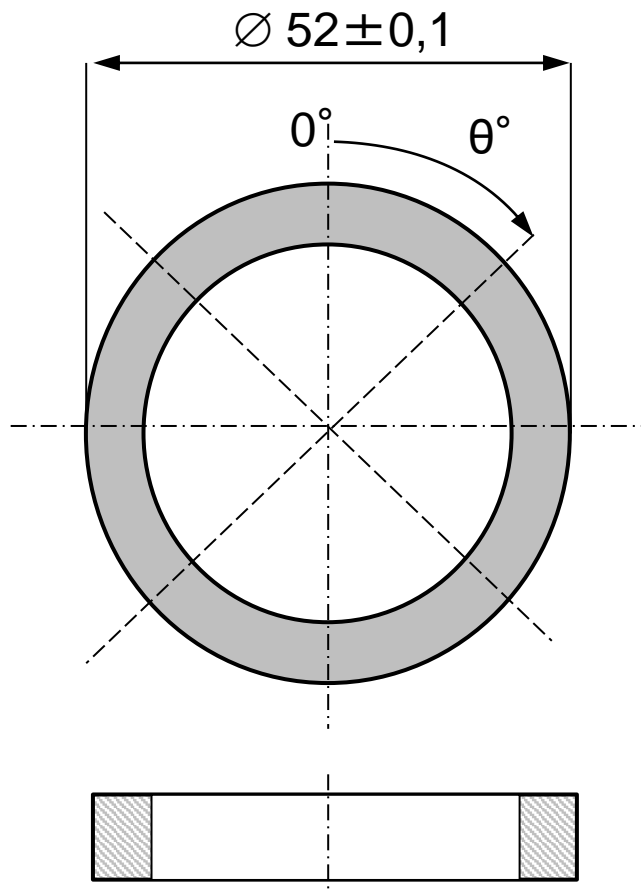
Medição da espessura

- Micrometro analógico
- F.O. 0-25mm
- Resolução: 0,01mm



Experimento - 3

Avaliação circularidade de um anel de ensaios



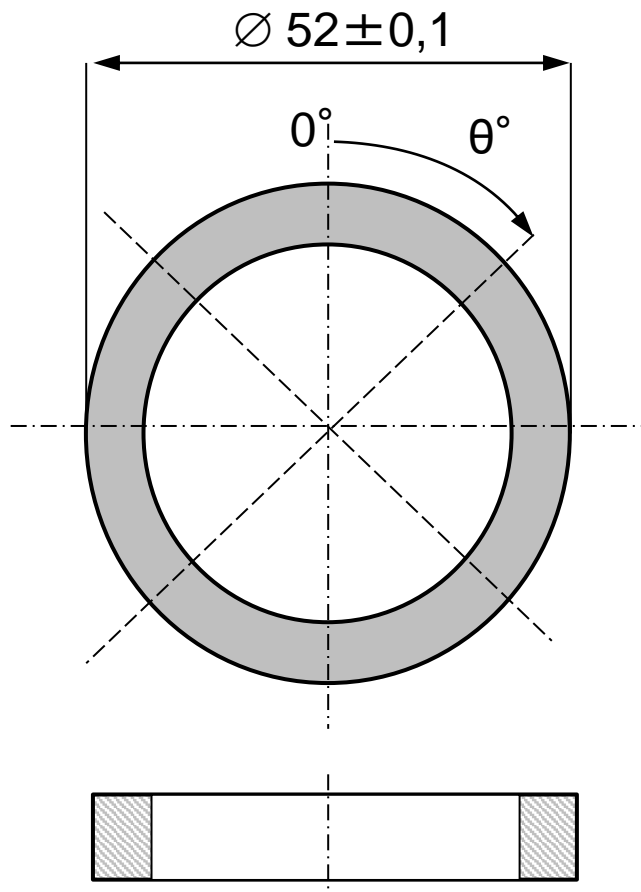
Leituras diâmetro externo

theta	L1	L2	L3	L4	L5
0°	51,99	51,95	51,97	51,99	51,98
30°	52,02	52,07	52,00	52,02	52,07
60°	52,05	51,97	52,01	52,03	52,07
90	51,97	51,98	51,96	51,99	51,97
120	51,96	52,04	51,97	51,96	52,02
150°	51,97	52,01	51,97	51,98	51,96



Experimento - 3

Avaliação circularidade de um anel de ensaios



Exp 3 A – Com base nos dados da planilha determinar analítica e graficamente (plotar os resultados):

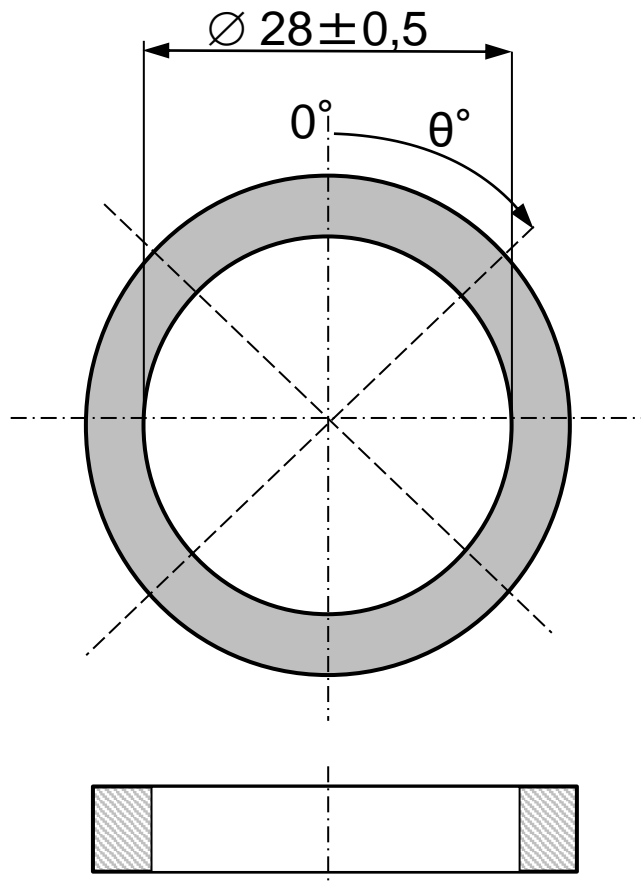
- Círculo de mínima zona MZC
- Mínimo círculo circunscrito
- Máximo círculo inscrito
- Círculo ~~de~~ referência
- Círculo de referência por mínimos quadrados

Considerem excentricidade 0



Experimento - 3

Avaliação dimensional de um anel de ensaios



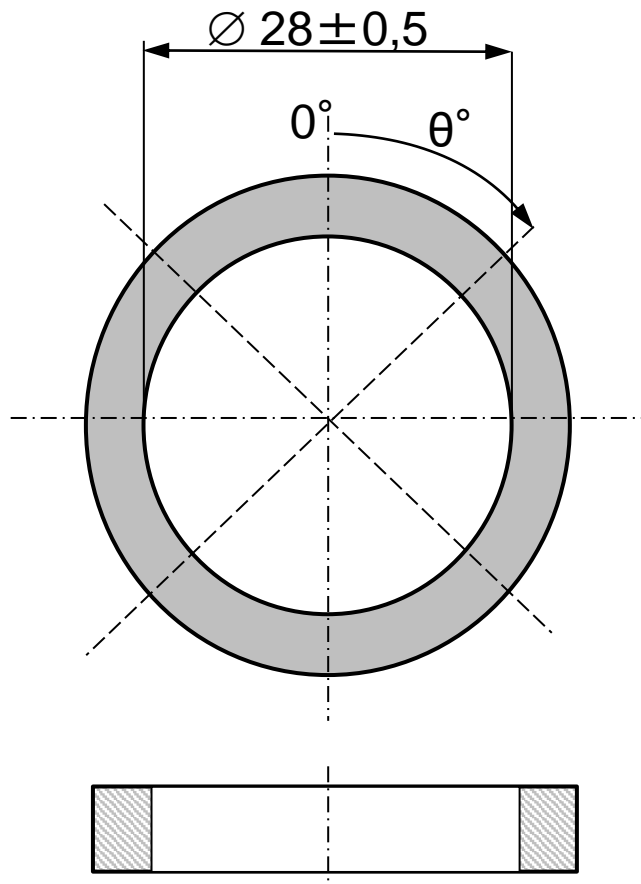
Leituras diâmetro interno

theta	L1	L2	L3	L4	L5
0°	27,83	27,94	27,86	27,76	27,91
30°	27,89	27,87	27,90	29,91	27,84
60°	27,92	27,90	27,84	27,88	27,95
90	27,95	27,85	27,87	27,95	27,94
120	27,93	29,94	27,95	27,93	27,91
150°	27,95	27,89	27,96	27,97	27,94



Experimento - 3

Avaliação dimensional de um anel de ensaios



Exp 3 B – Com base nos dados da planilha determinar analítica e graficamente (plotar os resultados):

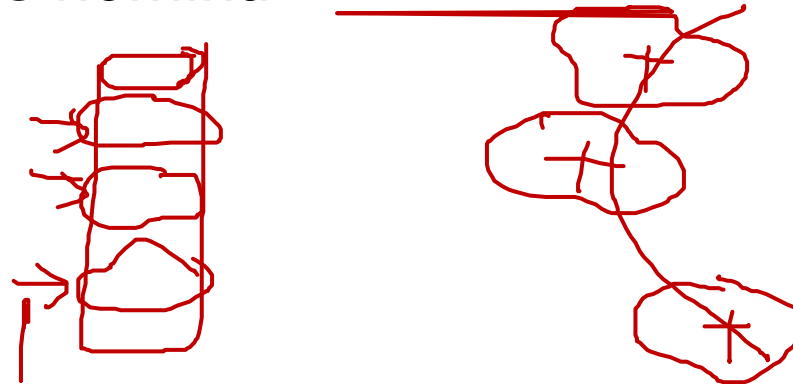
- Círculo de mínima zona MZC
- Mínimo círculo circunscrito
- Máximo círculo inscrito
- Círculo de referência
- Círculo de referência por mínimos quadrados

Considerem excentricidade 0



Cilindricidade

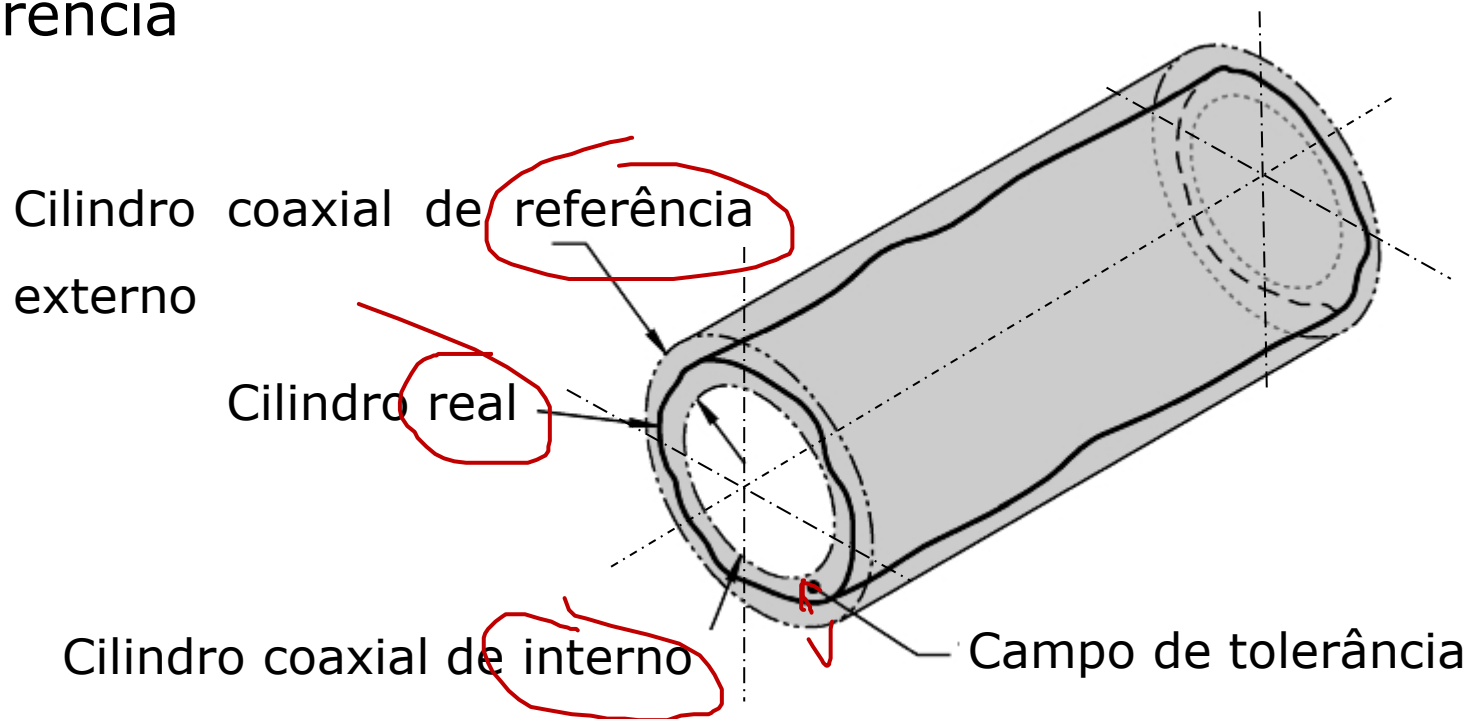
- **Cilindricidade** – aplica-se a todas as secções de uma superfície cilíndrica simultaneamente. A superfície deve estar contida entre duas superfícies cilíndricas que definem a zona de tolerância determinadas pelo melhor ajuste nominal.





Cilindricidade

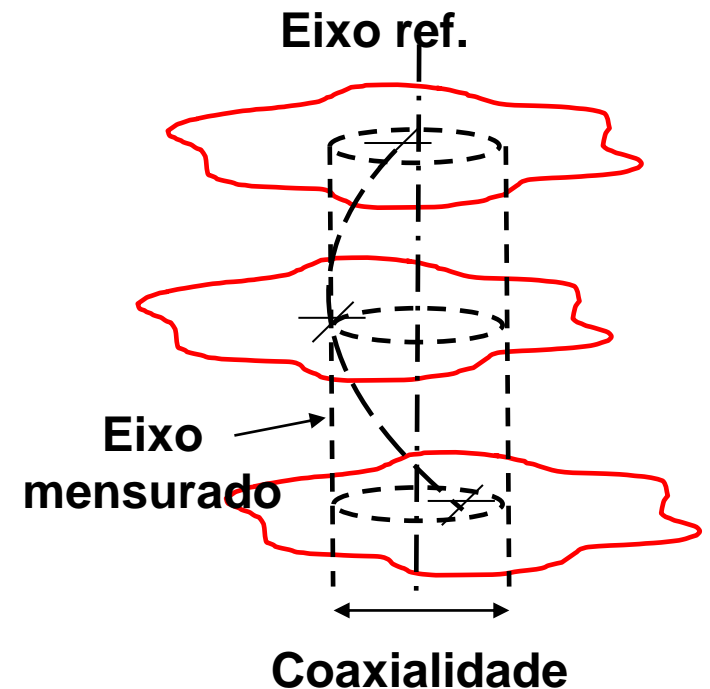
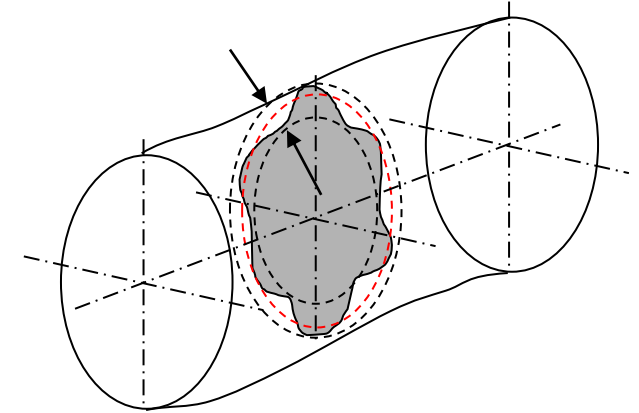
- De acordo com a norma ISO 1101, o desvio de cilindricidade é a soma das máximas distâncias radiais da superfície da peça com relação a um cilindro de referência





Cilindricidade

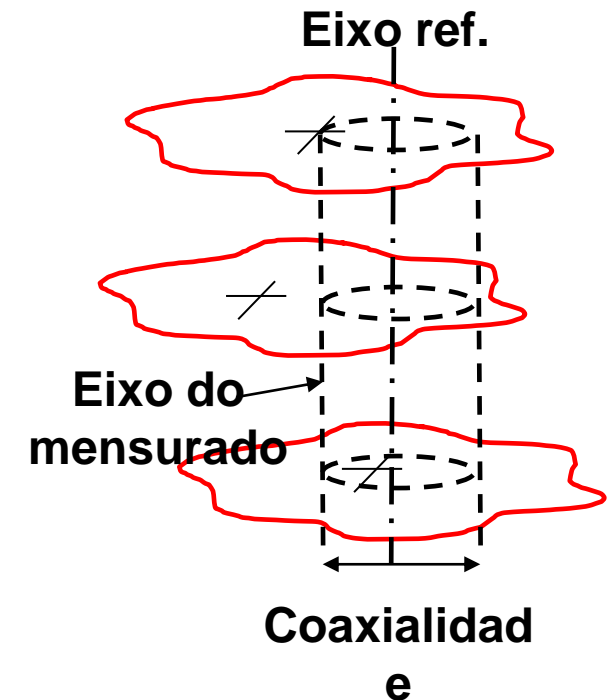
- ▶ **Batimento** – refere-se ao desvio superficial com relação a um referência perfeita quando o mensurado é colocado em rotação com relação ao seu eixo de revolução.
- ▶ **Coaxialidade** – coaxialidade é definida pelo diâmetro de um cilindro de comprimento definido, com relação a um cilindro de referência (datum) que envolve completamente os centroides dos planos formados pelo cilindro em análise. DIN 7167





Definições

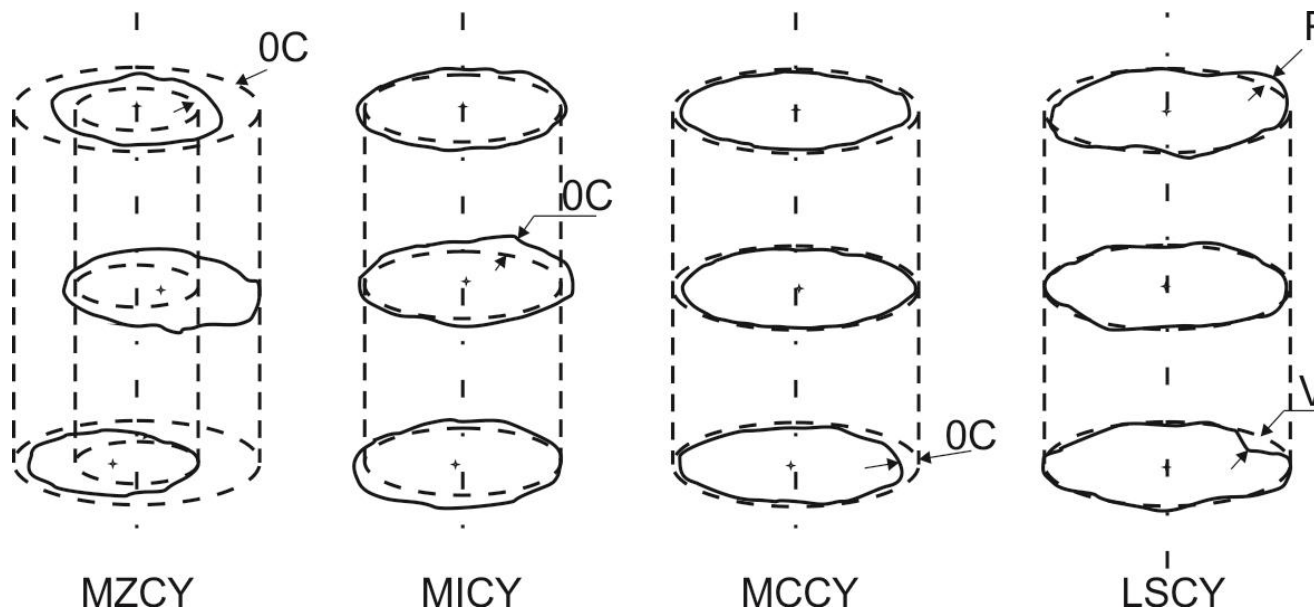
- **Coaxialidade ISO** – a norma ~~ISSO~~ 1101 define coaxialidade como o diâmetro de um cilindro coaxial ao eixo de referência, e será engloba o eixo do cilindro a ser avaliado.





Circularidade

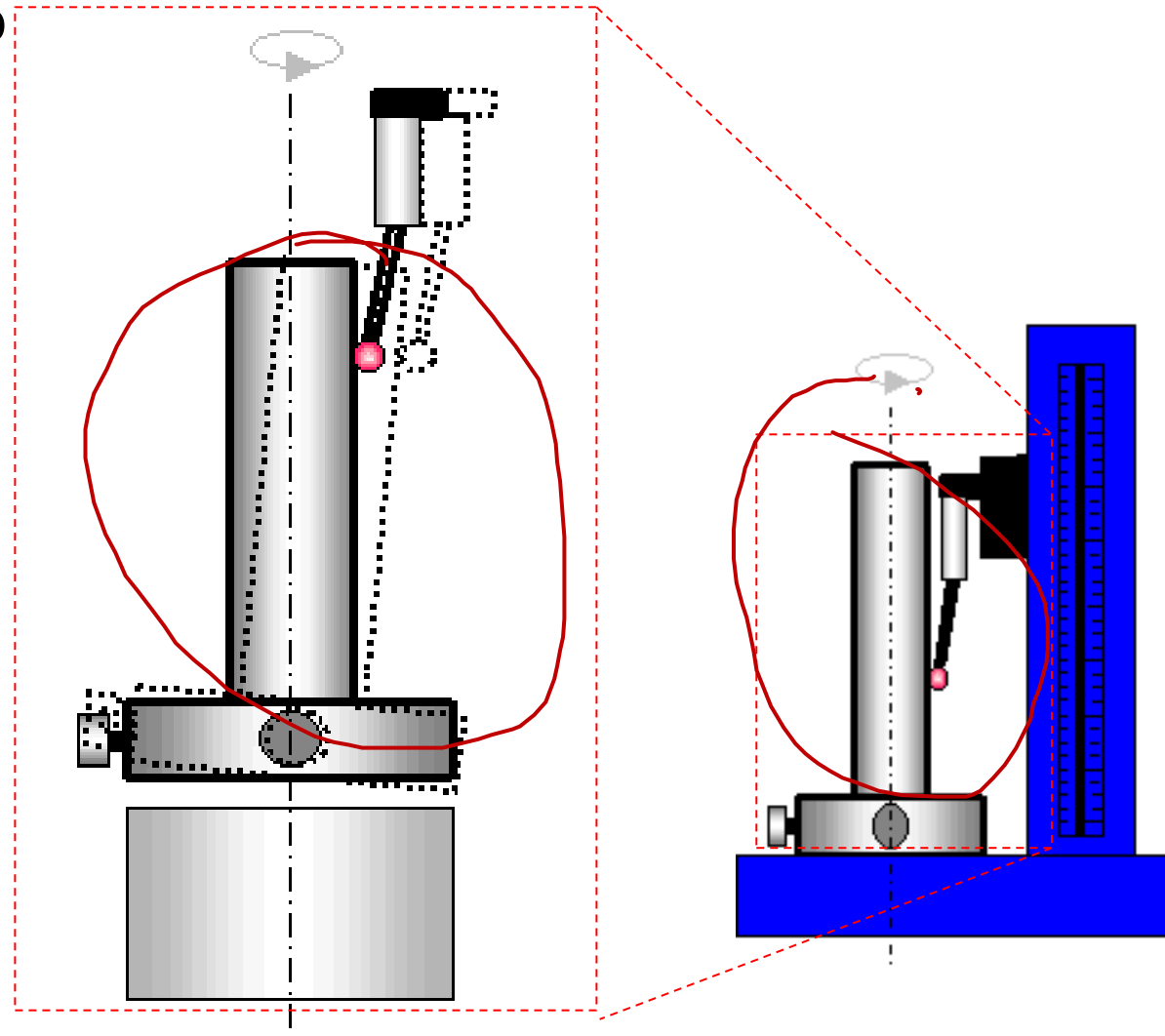
- Métodos de medição –
 - Mínima zona (padrão ISO) - MZCY
 - Mínimo cilindro inscrito - MICY
 - Mínimo cilindro circunscrito - MCCY
 - Cilindro por mínimos - LSCY





Circularidade

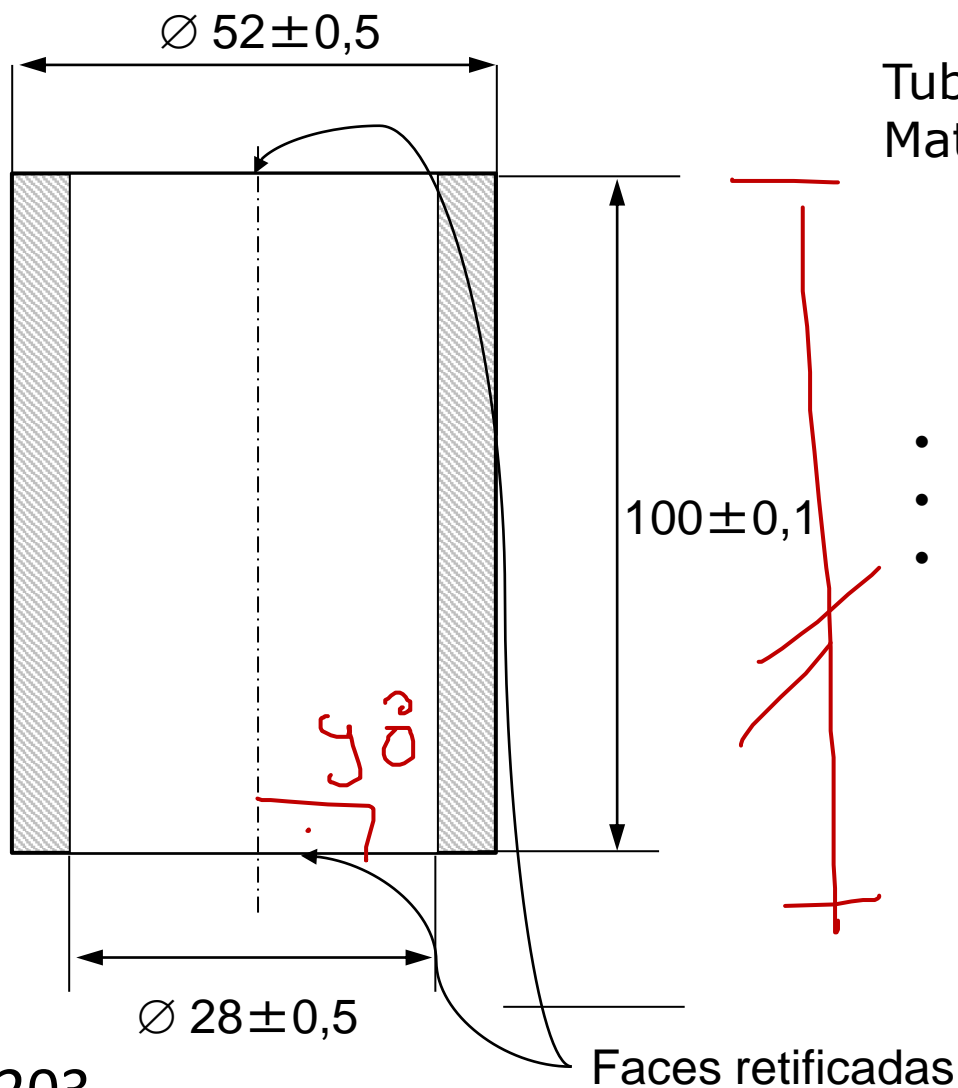
- ▶ Erros de seno





Experimento - 4

Avaliação cilindricidade de um tubo



Descrição da peça

Tubo de ensaio tribológico

Material: Aço ABNT 1045 temperado

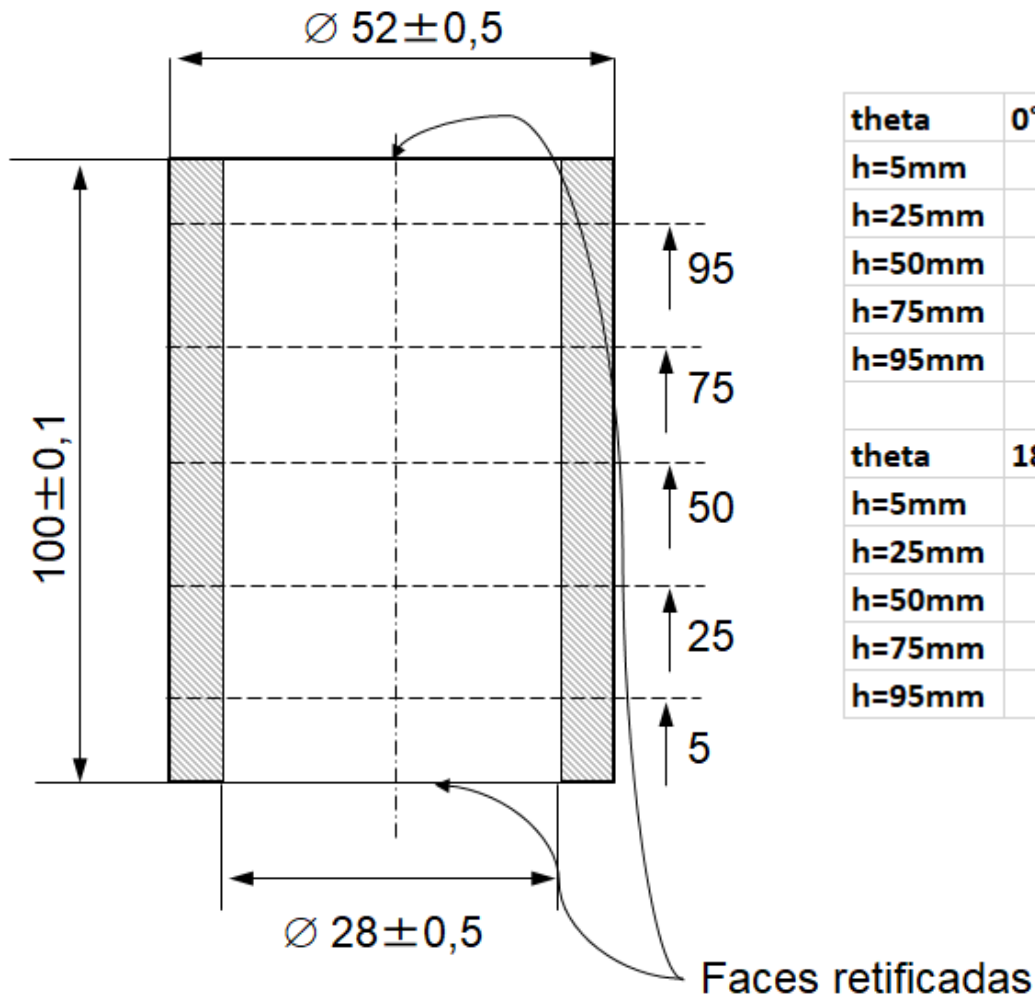
Medição dos diâmetros interno e externo

- Paquímetro digital
- F.O. 0-155mm
- Resolução: 0,01mm



Experimento - 4

Avaliação cilíndricidade de um tubo

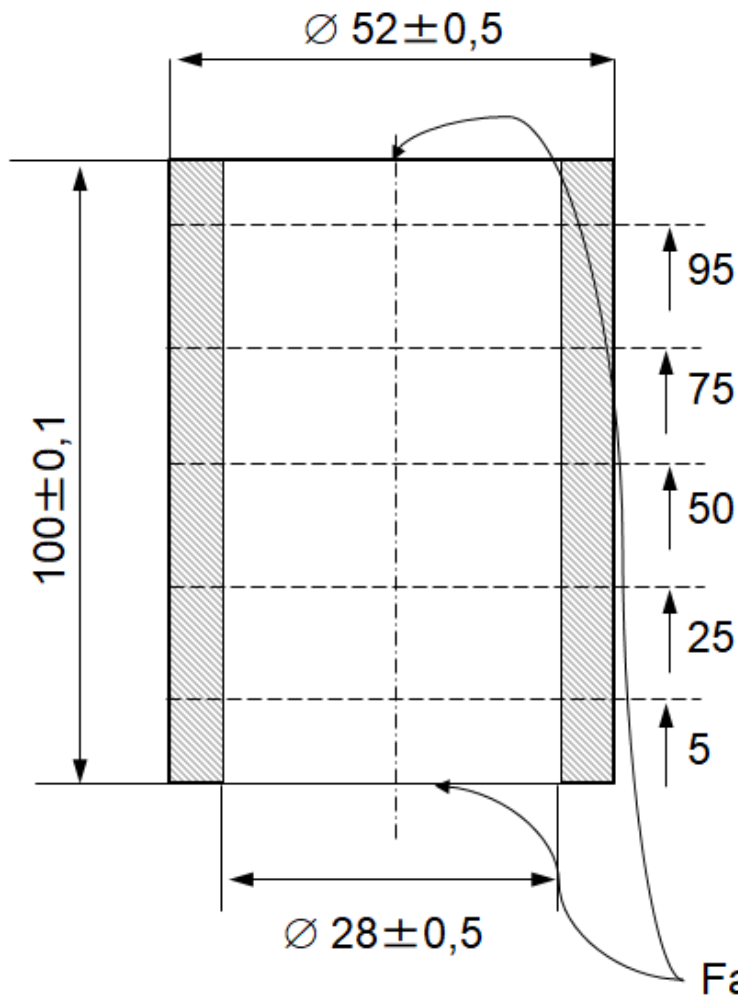


theta	0°	30°	60°	90°	120°	150°
h=5mm	26,01	25,99	26,01	26,01	26,01	25,99
h=25mm	25,99	26,02	26,02	25,99	26,02	25,99
h=50mm	26,00	25,96	26,01	25,99	26,01	25,96
h=75mm	26,01	26,01	26,01	26,02	26,01	26,02
h=95mm	25,99	26,03	26,02	25,99	26,02	25,99
theta	180°	210°	240°	270°	300°	330°
h=5mm	26,01	26,01	26,01	25,99	26,01	26,01
h=25mm	26,02	26,02	26,02	26,02	25,99	25,99
h=50mm	26,01	26,01	26,01	25,96	26,00	25,99
h=75mm	26,01	26,01	26,01	26,01	26,01	26,02
h=95mm	26,02	26,02	26,02	26,03	25,99	25,99



Experimento - 4

Avaliação cilindridade de um tubo



theta	0°	30°	60°	90°	120°	150°
h=5mm	26,01	25,99	26,01	26,01	26,01	25,99
h=25mm	25,99	26,02	26,02	25,99	26,02	25,99
h=50mm	26,00	25,96	26,01	25,99	26,01	25,96
h=75mm	26,01	26,01	26,01	26,02	26,01	26,02
h=95mm	25,99	26,03	26,02	25,99	26,02	25,99
theta	180°	210°	240°	270°	300°	330°
h=5mm	26,01	26,01	26,01	25,99	26,01	26,01
h=25mm	26,02	26,02	26,02	26,02	25,99	25,99
h=50mm	26,01	26,01	26,01	25,96	26,00	25,99
h=75mm	26,01	26,01	26,01	26,01	26,01	26,02
h=95mm	26,02	26,02	26,02	26,03	25,99	25,99

Exp 4 – Com base nos dados da planilha determinar analítica e graficamente (plotar os resultados) a cilindridade da peça.

Considerem excentricidade 0



Medição Óptica - Projetor de Perfil

Módulo auto instrutivo

Estrutura de um projetor de perfil

 <https://www.youtube.com/watch?v=jTbRMMgbnNU>

Uso do projetor de perfil

 <https://www.youtube.com/watch?v=qVvq33ibaSc>

 <https://www.youtube.com/watch?v=0xWiFHITcCE>



ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

- Fim -