



ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

**PMR 3501**  
**Engenharia de Precisão**

**A28**  
**Erros e compensação de erros  
em estruturas**

**2020.2**



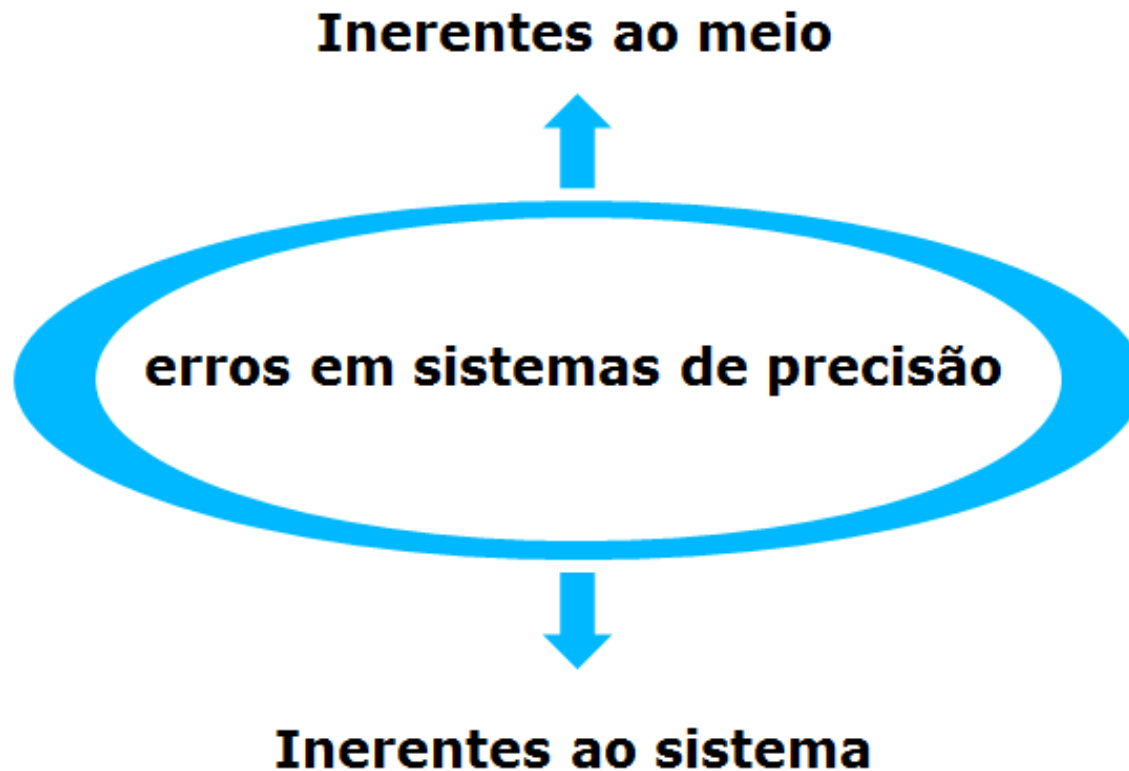
## Planejamento

Dia	S	Aula	Tópico	Prof.
08.10	5ª	A17	Elementos de máquinas de precisão – mancais e guias hidrostáticos	RS
14.10	4ª	A18	Elementos de máquinas de precisão – mancais e guias aerostáticos	RS
15.10	5ª	A19	Elementos de máquinas de precisão – mancais e guias de elementos rolantes	RS
21.10	4ª	A20	Elementos de máquinas de precisão – mancais não convencionais	RS
22.10	5ª	A21	Elementos de máquinas de precisão – transmissores do movimento	RS
28.10	4ª	A22	Elementos de máquinas de precisão – conversores do movimento	RS
29.10	5ª	A23	Elementos de máquinas de precisão – acoplamentos	RS
04.11	4ª	A24	Elementos de máquinas de precisão – atuadores	RS
05.11	5ª	A25	Estruturas de sistemas de precisão: Requisitos, Materiais e Fabricação	RS
11.11	4ª	A26	<b>Exercícios -4</b>	RS
12.11	5ª	A27	Estruturas de sistemas de precisão: configurações estruturais e laço estrutural	RS
18.11	4ª	A28	Estruturas de sistemas de precisão: considerações estáticas, dinâmicas e térmicas. Erros, propagação de erros / compensação de erros	RS
19.11	5ª	A29	Materiais para componentes de precisão	RS
25.11	4ª	A30	<b>Exercícios -5</b>	RS
26.11	5ª	A29	Apresentação de Estudo de Caso/Seminário	RS
02.12	4ª	A30	Apresentação de Estudo de Caso/Seminário	RS
03.12	5ª	A31	Apresentação de Estudo de Caso/Seminário	RS
09.12	4ª			
10.12	5ª			
14.12	3ª		<b>Encerramento do semestre 2020-2</b>	
06.12			Mecedor tridimensional de coordenadas	



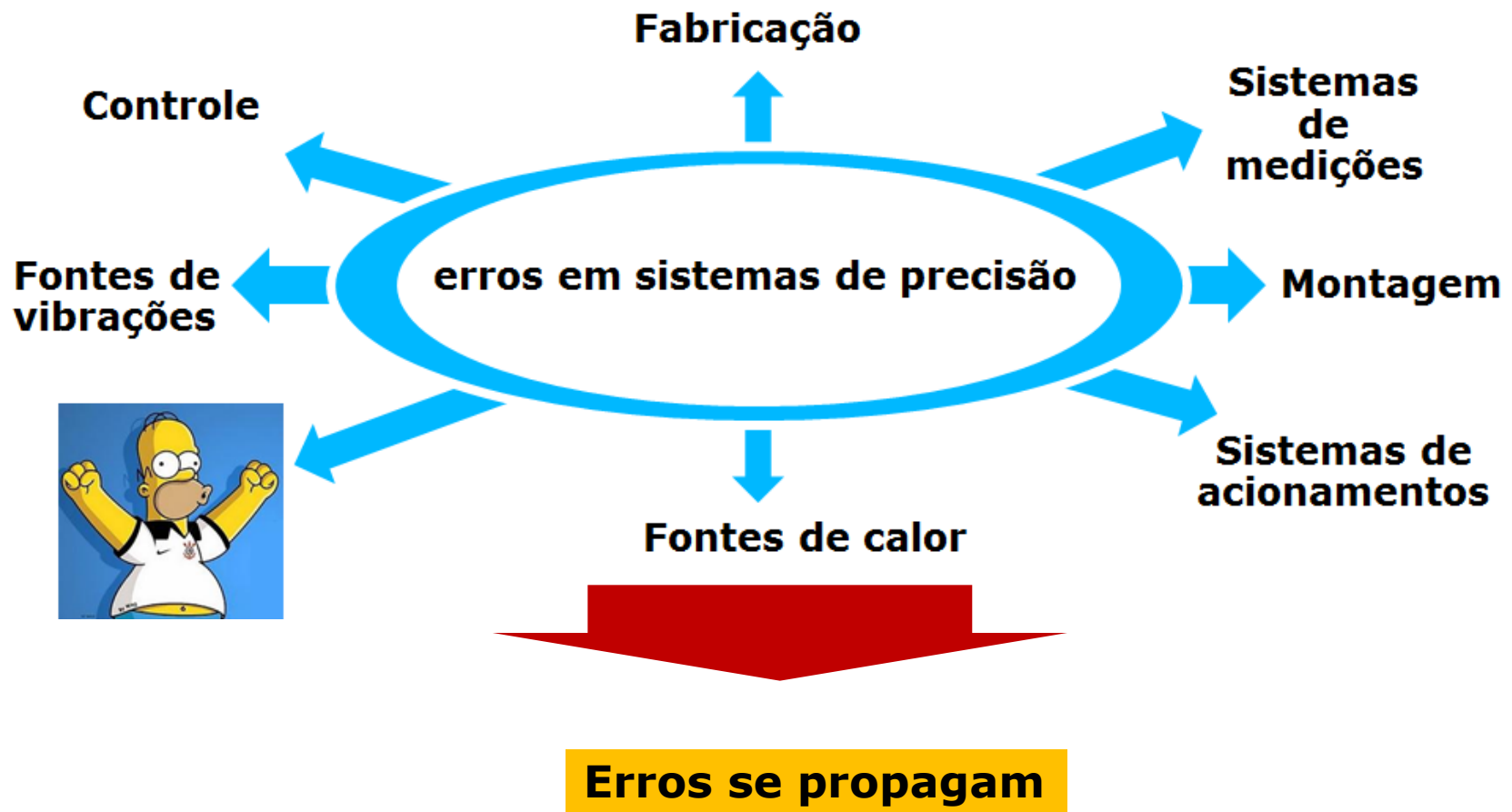


## **Origem de erros em sistemas de precisão**





## Origem de erros em sistemas de precisão





## **Abordagem para minimização e controle dos erros**





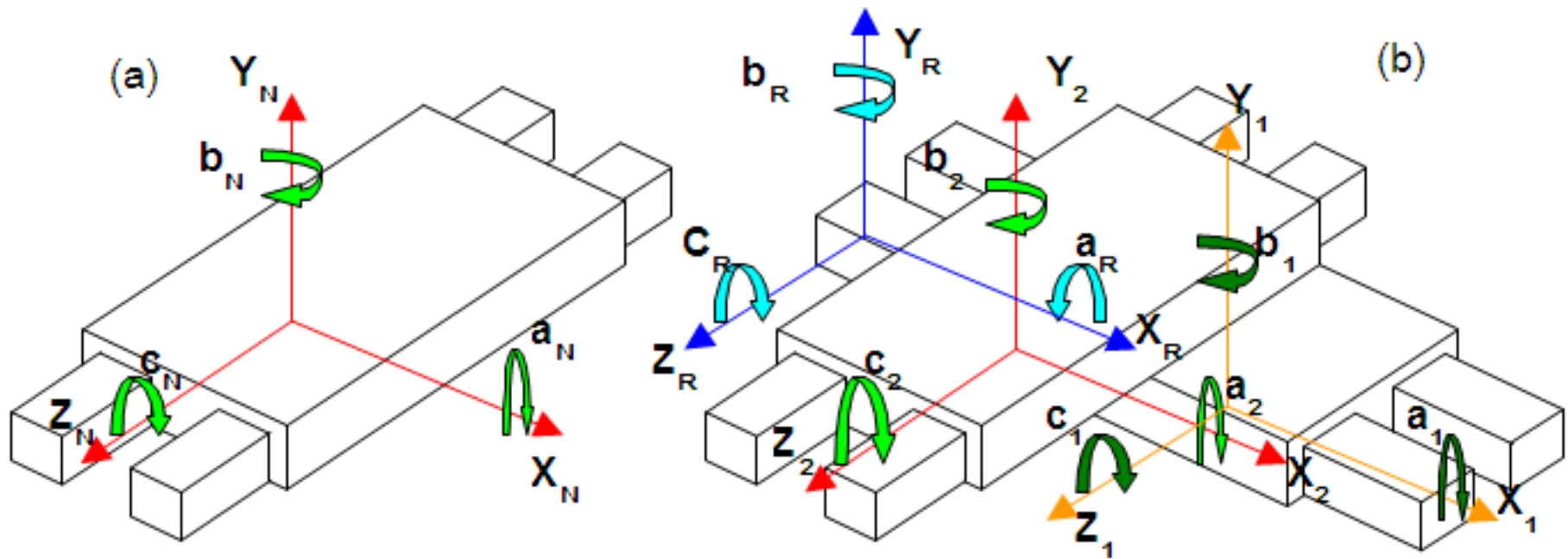
## Erros em estruturas

*Erros = f (configuração, montagem, material, fabricação, cinemática looping estrutural, tipo e posição de motores e sensores, etc.)*





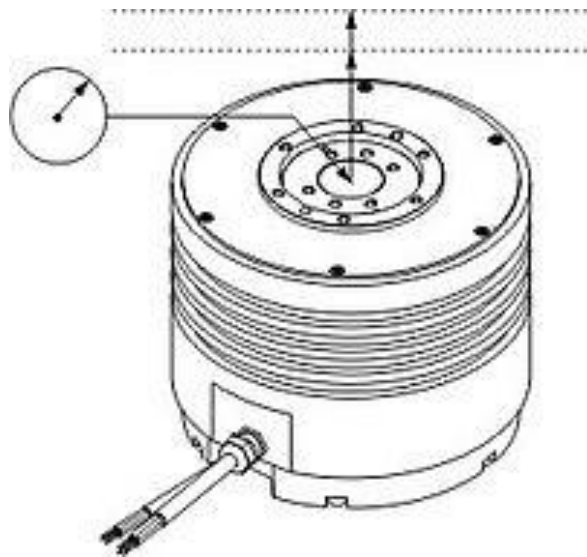
## Erros em sistemas de posicionamento lineares



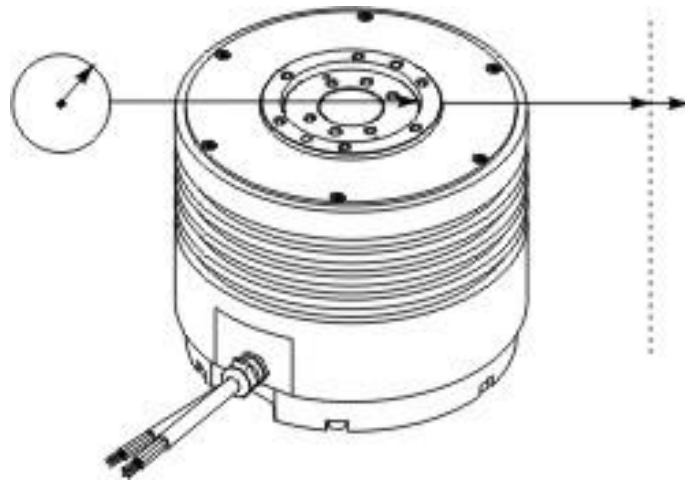


## Erros em sistemas rotativos

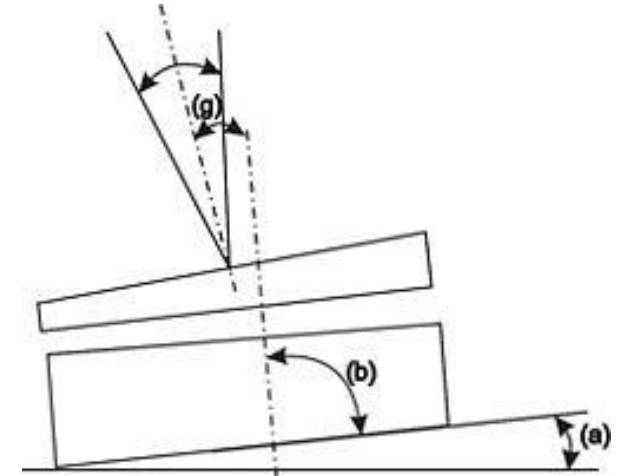
**Batimento axial**



**Batimento radial**



**Inclinação**

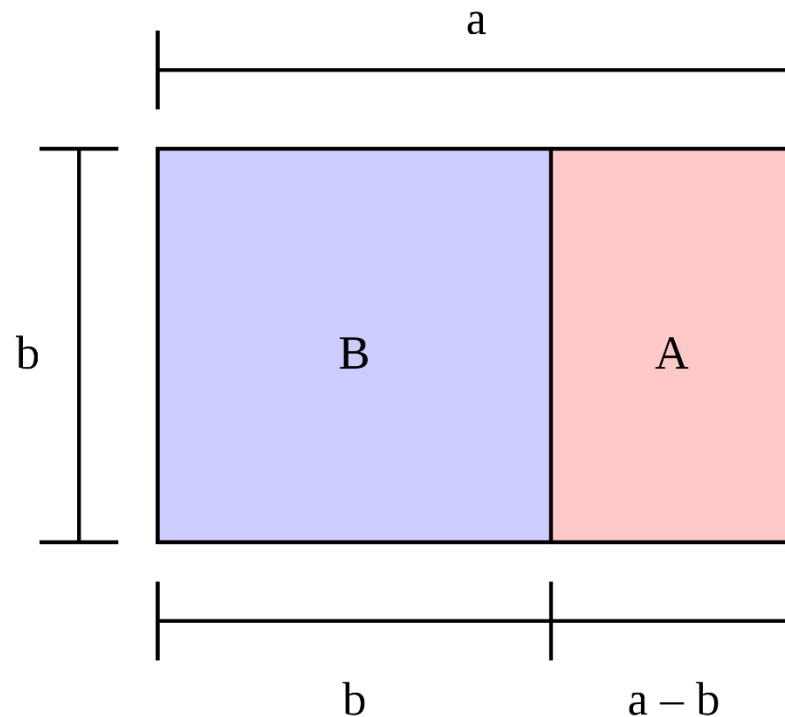






## Princípio do retângulo dourado

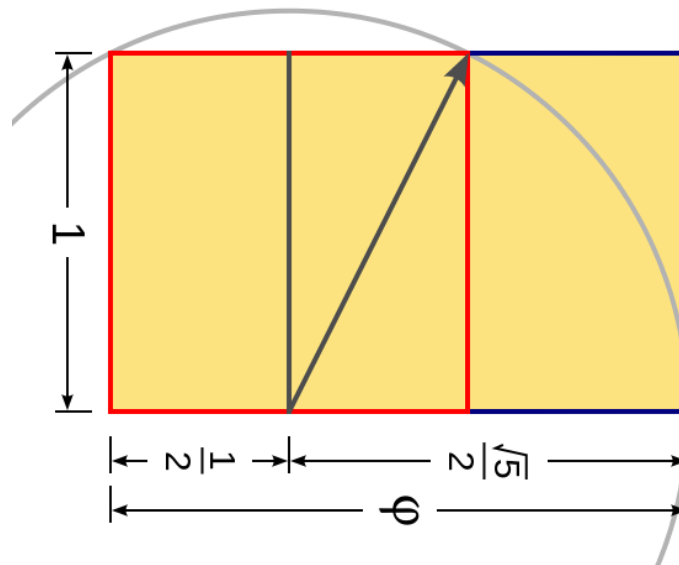
- O retângulo dourado é aquele que quando dividido, os retângulos resultantes mantem a mesma razão de proporcionalidade do retângulo original





## Princípio do retângulo dourado

- Geometricamente o retângulo dourado é um retângulo onde a dimensão dos lados obedecem a relação  $1 : \frac{1+\sqrt{5}}{2}$ ,
- onde  $1 = \varphi$ , é definida como a relação dourada, com  $\varphi = 1,618$





## Princípio do retângulo dourado

- As proporções do retângulo dourado são um ponto de partida natural para o dimensionamento de estruturas
- **Ver no youtube:**



Donald Duck: Mathmagic land (DISNEY)



## Princípios de Abbe

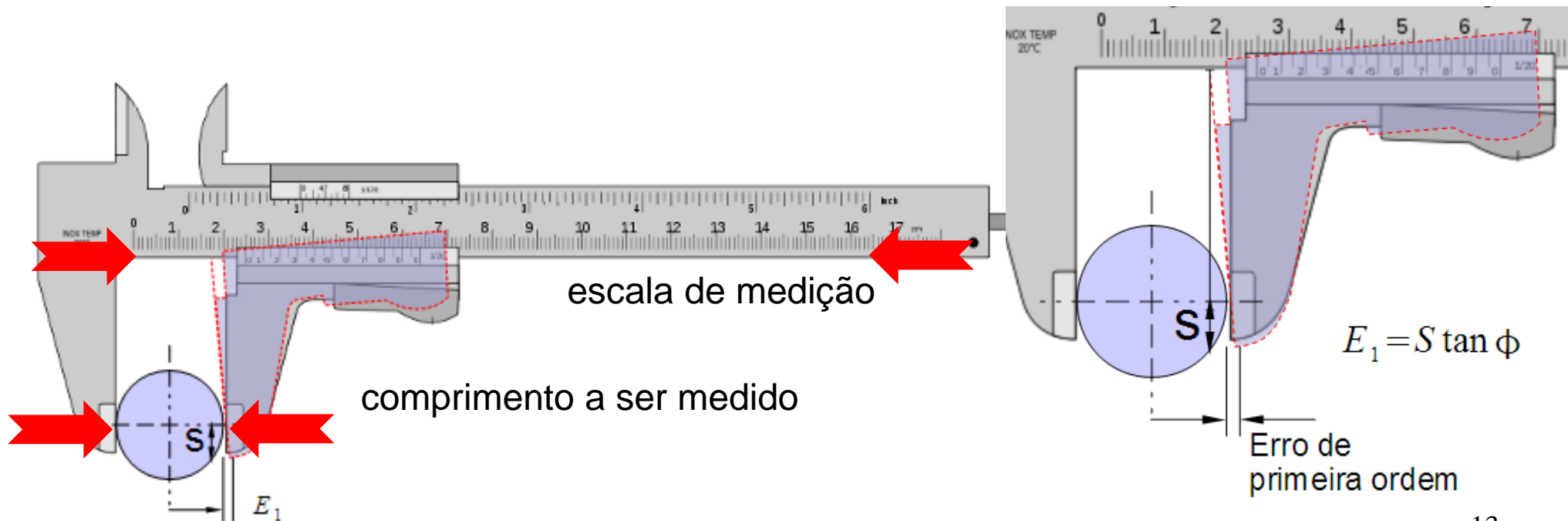
**Ernst Karl Abbe** (Janeiro 23, 1840 – Janeiro 14, 1905) era físico, cientista em óptica, empreendedor, reformador social. Lançou os fundamentos da óptica moderna junto com Otto Schott e Carl Zeiss. Sócio da Carl-Zeiss AG





## 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.

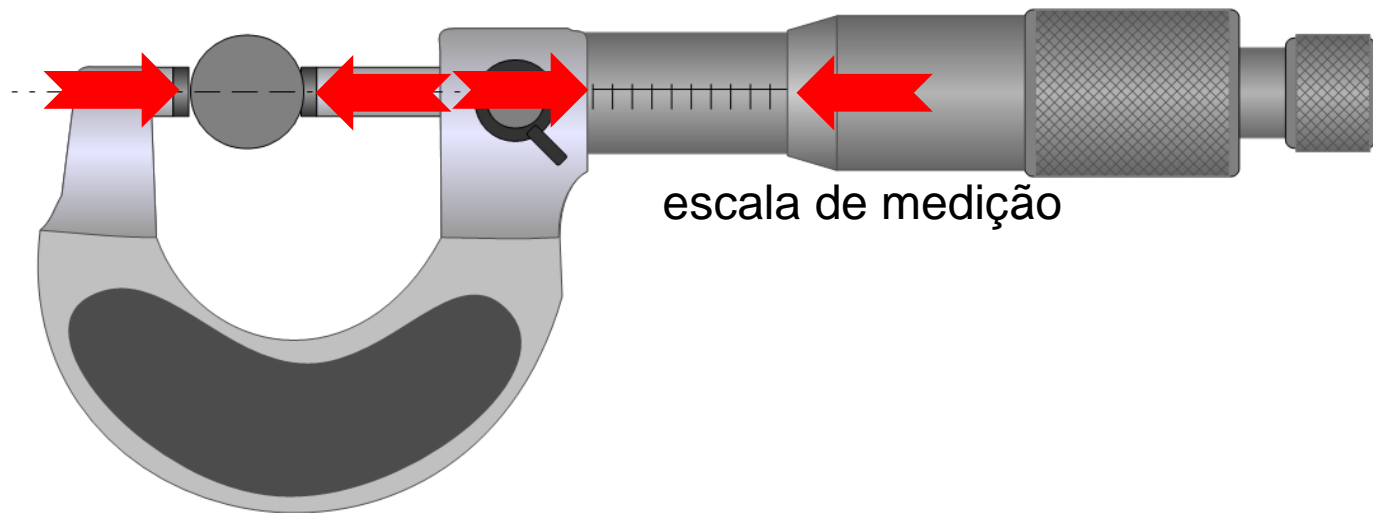




## Princípios de Abbe

**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.

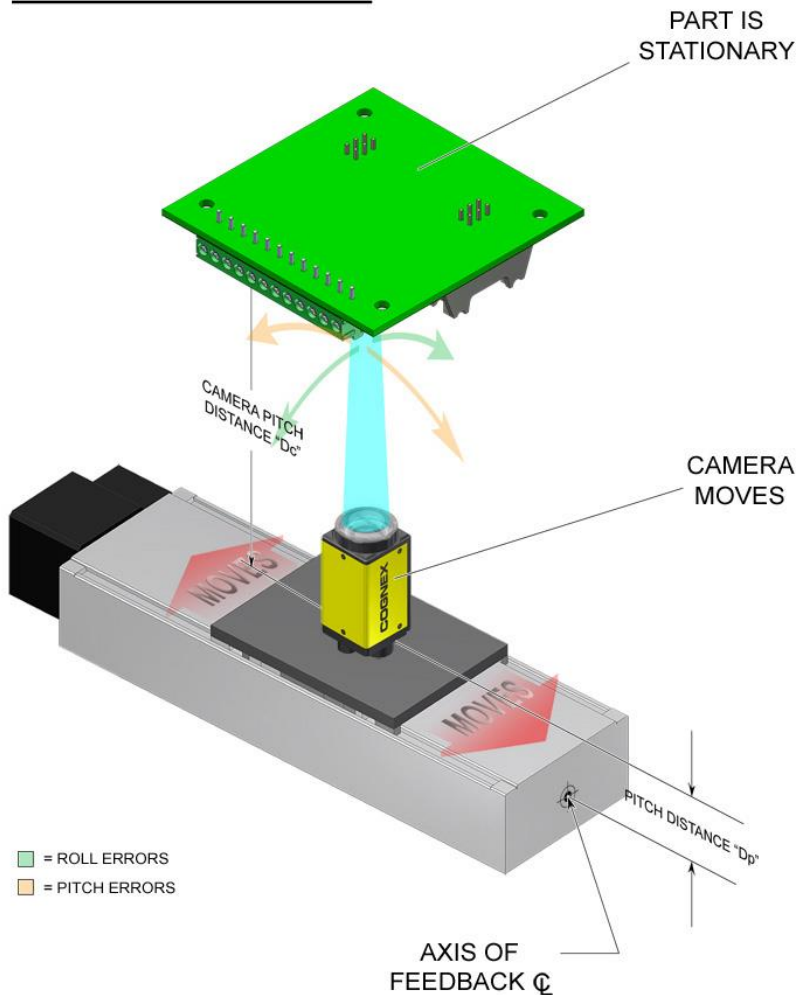
comprimento a ser medido



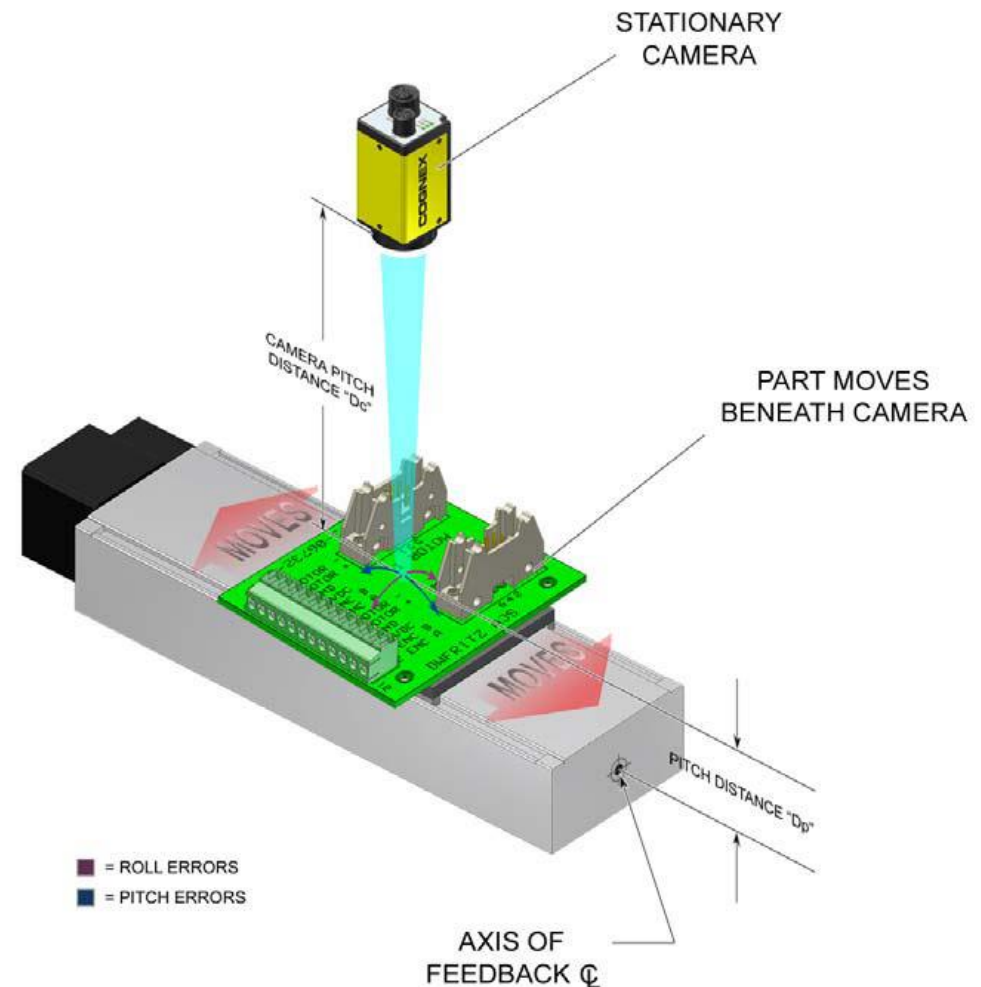


## Princípios de Abbe

### INHERENT ABBE ERRORS



### MINIMUM ABBE ERRORS





## Princípios da reciprocidade de Maxell

- Teorema da reciprocidade de Maxell
- Sejam A e B dois pontos quaisquer em um sistema elástico. Seja  $\mathbf{u}$  o deslocamento do ponto B em qualquer direção decorrente da aplicação de uma força P, atuando em qualquer direção V aplicada no ponto A. Seja  $\mathbf{v}$  o deslocamento do ponto A na direção V, em razão de uma força Q aplicada em B atuando na direção U.
- Então:  $Pv = Qu$





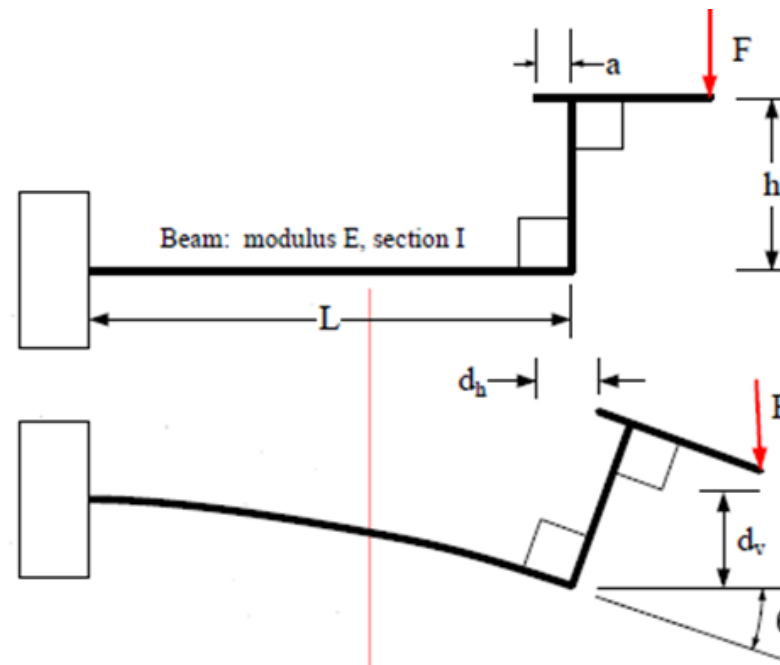
## Erros em cascata

Uma pequena deflexão angular em uma parte do sistema rapidamente se propaga e é amplificado no seguinte componente associado

$$d_v = \frac{FL^3}{3EI}$$

$$d_h = h\theta = \frac{3hd_v}{2L}$$

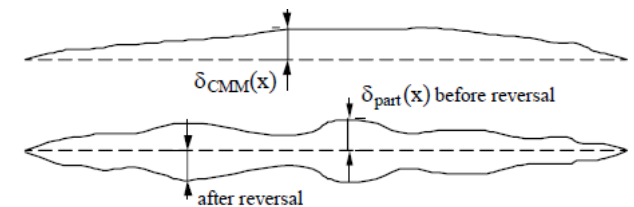
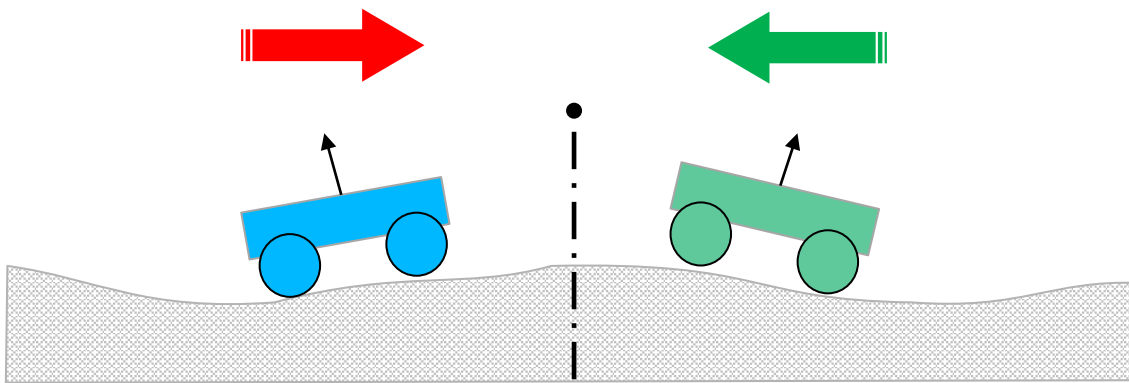
$$\theta = \frac{FL^2}{2EI} = \frac{3d_v}{2L}$$





## Princípios da reciprocidade de Maxell

- Reciprocidade reversa
- A reciprocidade reversa permite quantificar e eliminar os erros de repetitividade de um sistema de precisão



$$Z_{\text{probe before reversal}}(x) = \delta_{CMM}(x) - \delta_{part}(x)$$

$$Z_{\text{probe after reversal}}(x) = \delta_{CMM}(x) + \delta_{part}(x)$$

$$\delta_{part}(x) = \frac{-Z_{\text{probe before reversal}}(x) + Z_{\text{probe after reversal}}(x)}{2}$$



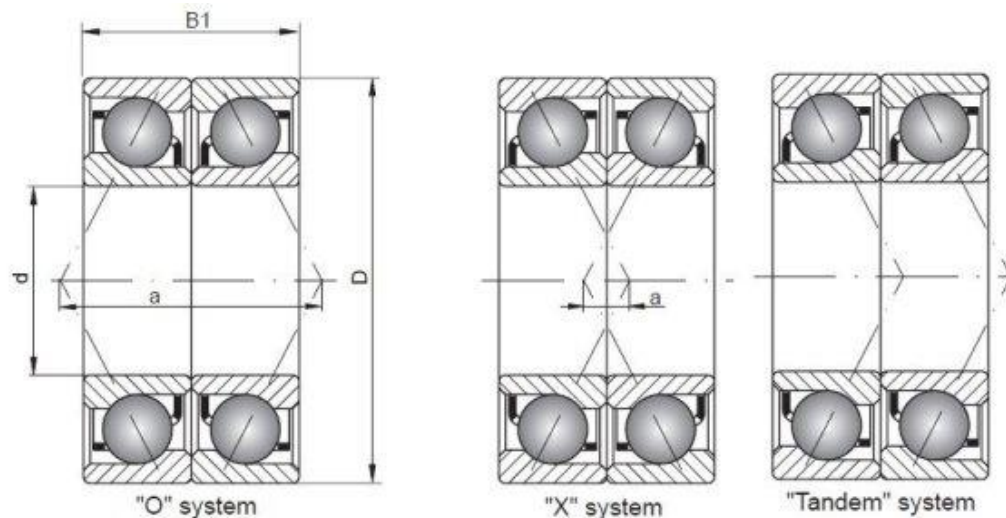
## Auto princípios

- A forma como um sistema reagem a uma entrada determina a sua saída.
- Recomendação: Um projeto pode utilizar as entrada para atingir a saída desejada
  - Um efeito inicial é utilizado para tornar o sistema pronto para uso
  - O efeito auxiliar é aquele que gera as entradas do sistema e amplificar a saída



## Auto princípios

- ▶ A forma como um sistema reagem a uma entrada determina a sua saída.
  - **Exemplo 1:** Mancais de contato angular montados opostamente (O ou X) são estáveis, efeito de simetria.

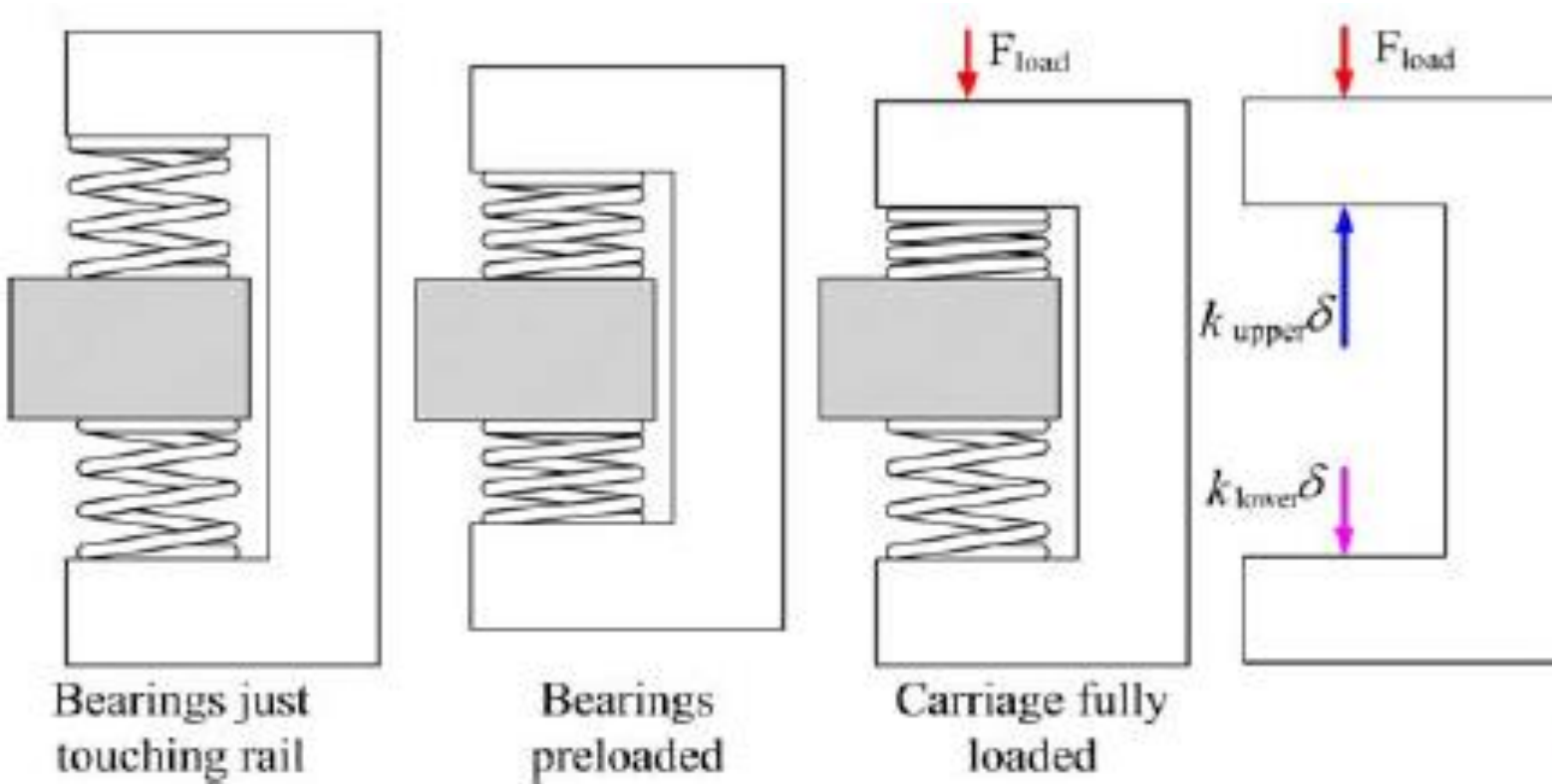


Alinhamento  
Comportamento térmico





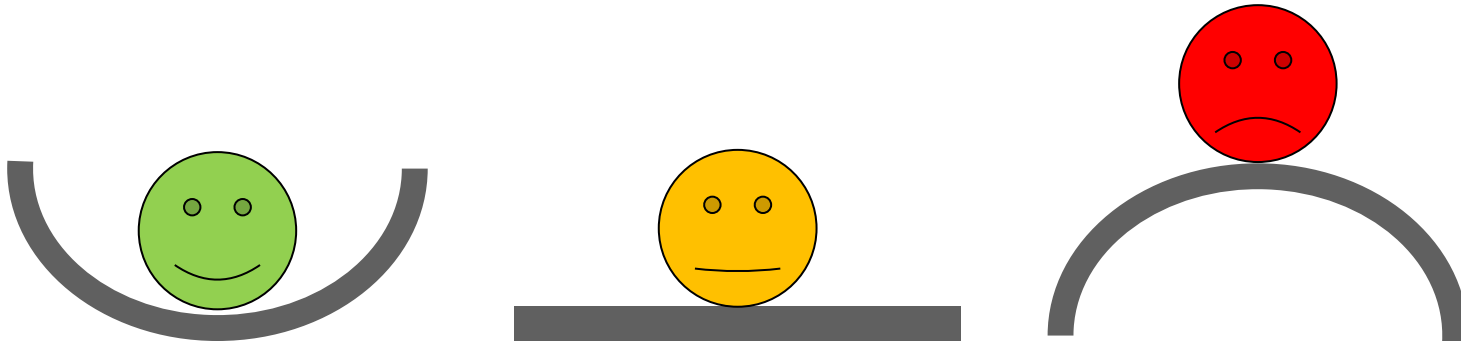
## Minimização de erros por pré-carregamento





## Estabilidade

- Todos os sistemas são estáveis, neutros ou instáveis.

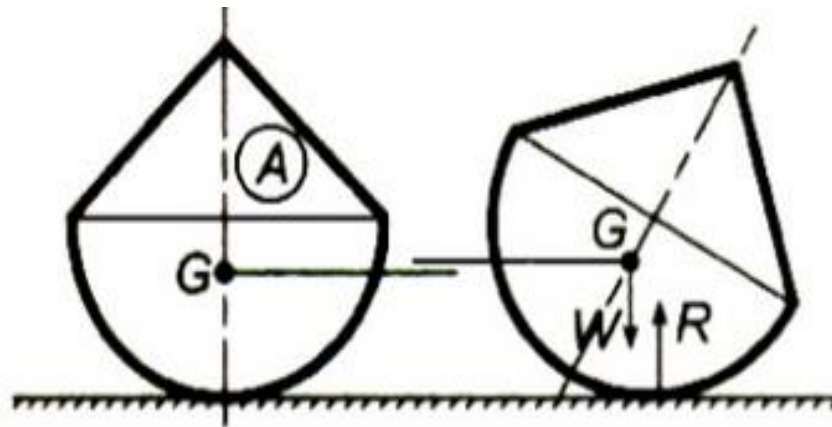




## Estabilidade

### Equilíbrio estável

- Um corpo é dito em equilíbrio estável quando ele retorna a sua posição original de equilíbrio após sofrer um pequeno distúrbio que o leve não significativamente para fora da posição de equilíbrio.
- As forças atuantes no corpo após o distúrbio tenderão a trazer o corpo de volta para sua posição original de equilíbrio.

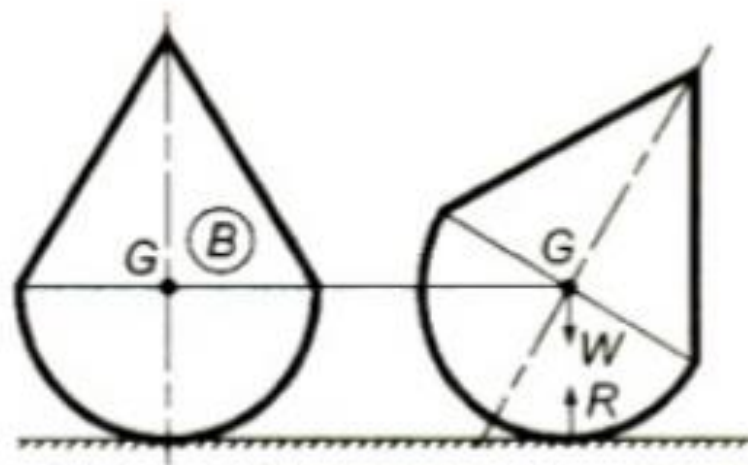
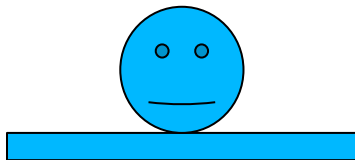




## Estabilidade

### Equilíbrio neutro

- Um corpo é dito em equilíbrio neutro quando ele permanece em equilíbrio em sua nova posição após sofrer um distúrbio.
- As forças atuantes no corpo após o distúrbio tenderão a restabelecer um novo equilíbrio



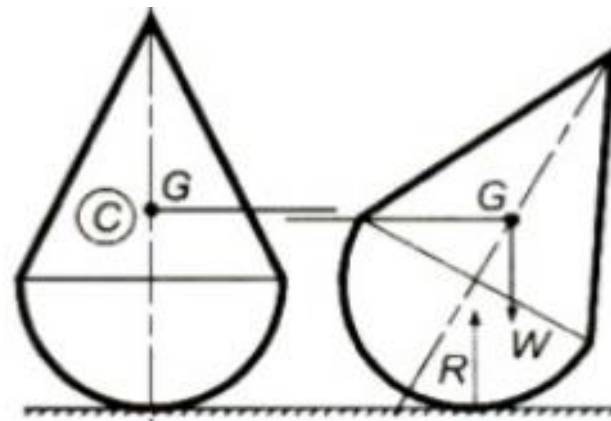
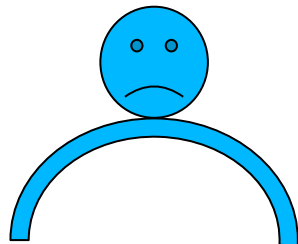




## Estabilidade

### Equilíbrio instável

- Um corpo é dito em equilíbrio instável quando ele NÃO retorna a sua posição original de equilíbrio após sofrer um pequeno distúrbio.
- As forças atuantes no corpo após o distúrbio tenderão a deslocar o centro de massa sempre para longe da posição original de equilíbrio

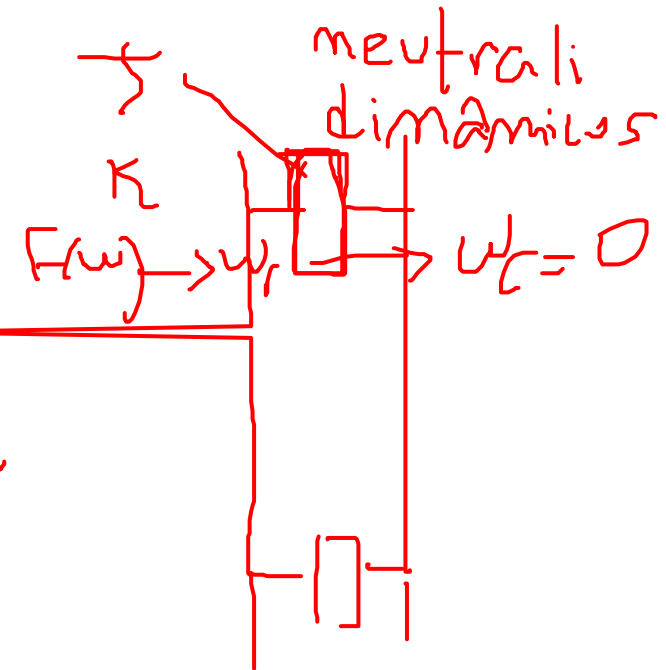
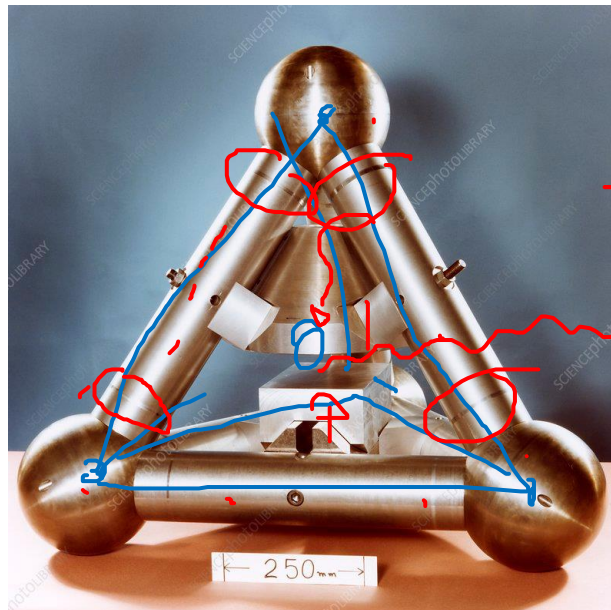
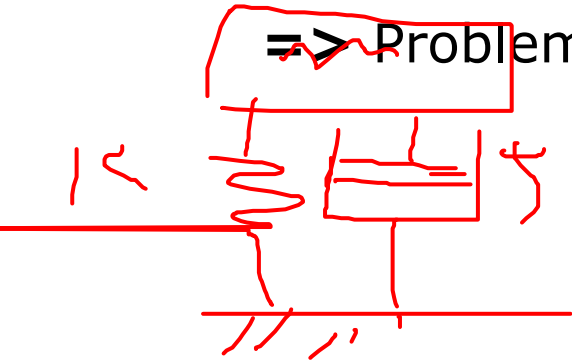




## Simetria

- Simetria é forma poderosa de minimizar erros
- Simetria pode ser prejudicial (Lei de Maxell aplicada a simetria)

**=> Problema de temperaturas diferenciais**





## Superposição

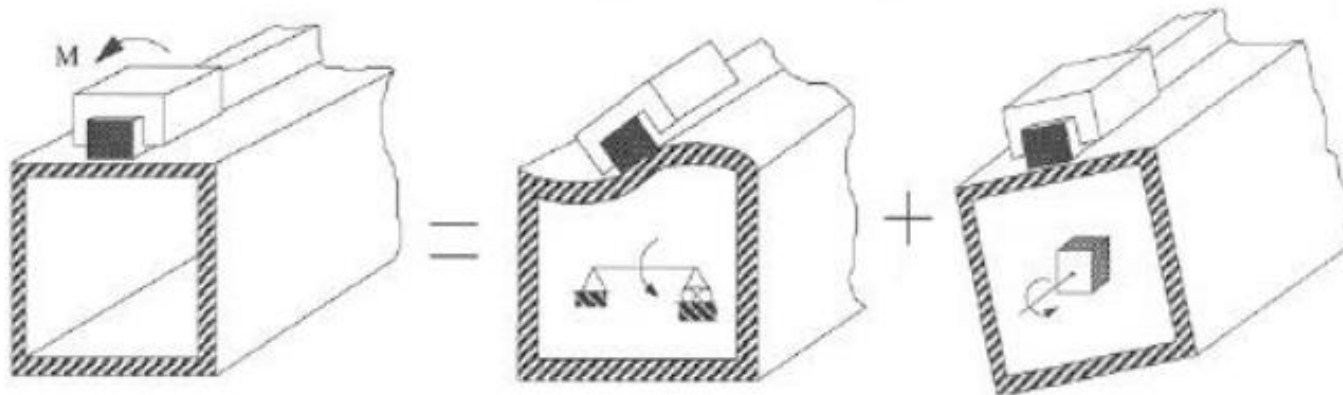
- *"With certain exceptions (large or plastic deformations), the effect (stress, strain, or deflection) produced on an elastic system by any final state of loading is the same whether the forces that constitute the loading are applied simultaneously or in any given sequence and is the result of the effects that the several forces would produce if each acted singly"*

(Roark, R.; Young, W.; *Formulas for Stress and Strain*, X McGraw Hill, New York, 1975)



## Superposição

- A reciprocidade afirma que mesmos pequenos problemas podem adicionar grandes dificuldades
- O segredo está em como dividir um problema de forma lógica em pequenas partes



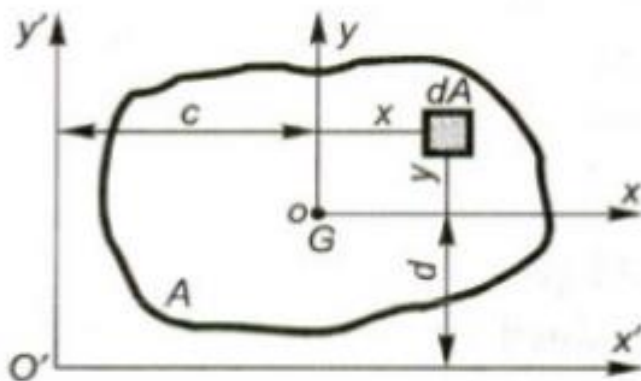
- Mesmo o problema mais complexo pode ser dividido em problemas menores



## Teorema dos eixos paralelos

- O teorema dos Eixos paralelos ou Teorema da transformação de coordenadas

Se o Momento de Inércia  $I_{xxG}$  e  $I_{yyG}$  de um plano com área  $A$  sobre um centroide de eixos  $x$  e  $y$ . Então o Momento de Inercia sobre a mesma área  $A$  sobre eixos  $x'$  e  $y'$  paralelos ao eixos  $x$  e  $y$ , a uma distância  $d$  e  $c$  respectivamente, é dado por



$$I_{x'x'} = I_{xxG} + Ad^2$$

$$I_{y'y'} = I_{yyG} + Ac^2$$



## Teorema dos eixos paralelos

- O problema dos Eixos paralelos é útil para calcular momentos de inercia para objetos de forma complexa.
- Mas este é mais útil quando aplicado como filosofia de projeto.

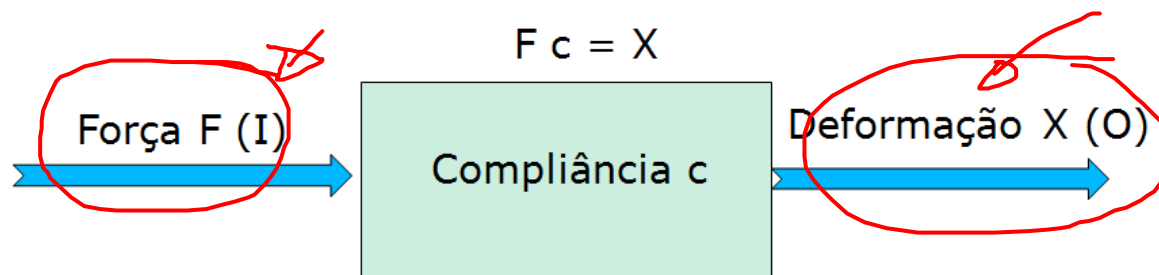
***A rigidez de um projeto é proporcional ao quadrado das distâncias dos membros da estrutura com relação ao eixo neutro***



## Princípio da compliância

- Todo corpo se deforma com a aplicação de uma força, seja esta estática ou dinâmica.
- A compliância indica a relação causal entre força e deformação.
- O inverso da compliância é a rigidez.

**Quando medindo compliância a força deve ser aplicada em qualquer ponto e em qualquer direção, e a deformação deve ser medida também em qualquer ponto e qualquer direção.**



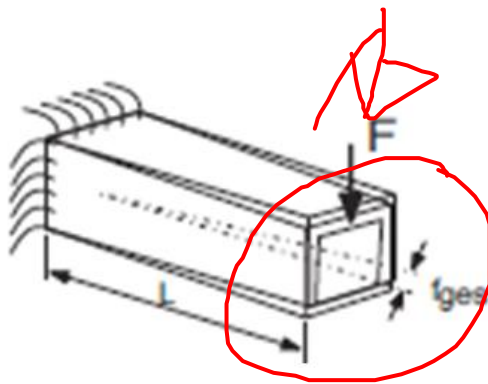
$$F = K X$$

$$K = 1/c$$

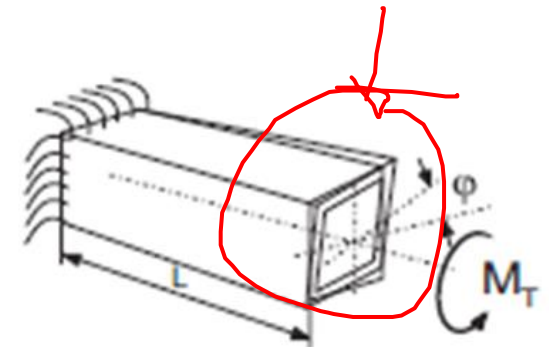
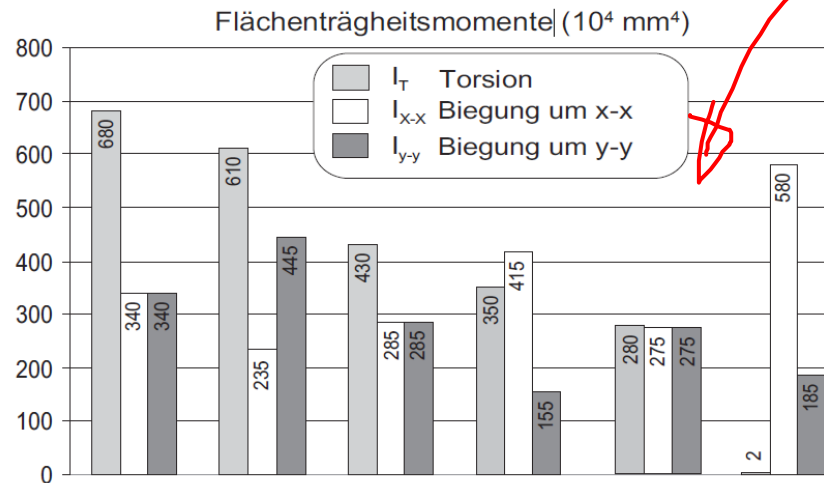


## Complância e secção transversal

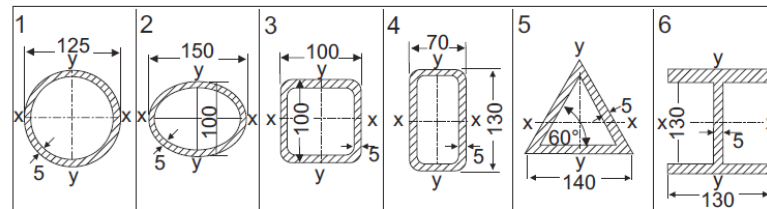
- Para minimizar a deformação em um sistema cada componente individual deve ser projetado de forma a apresentar a menor complância



$$f_{ges} = \frac{F \cdot L^3}{3 \cdot IE} + \frac{F \cdot L}{KAG}$$



$$\phi = \frac{M_T \cdot L}{G \cdot I_T}$$

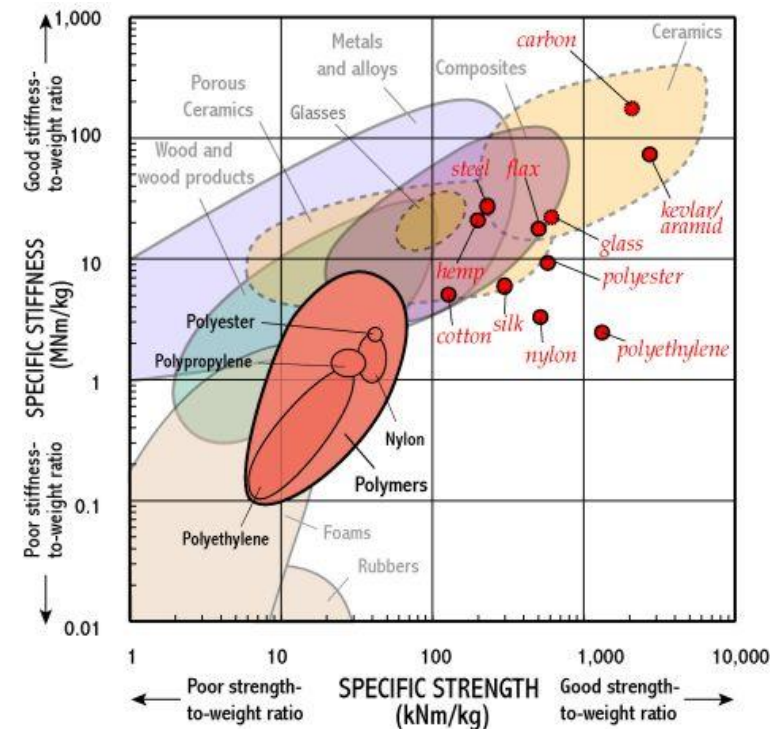






## Compliância e secção transversal

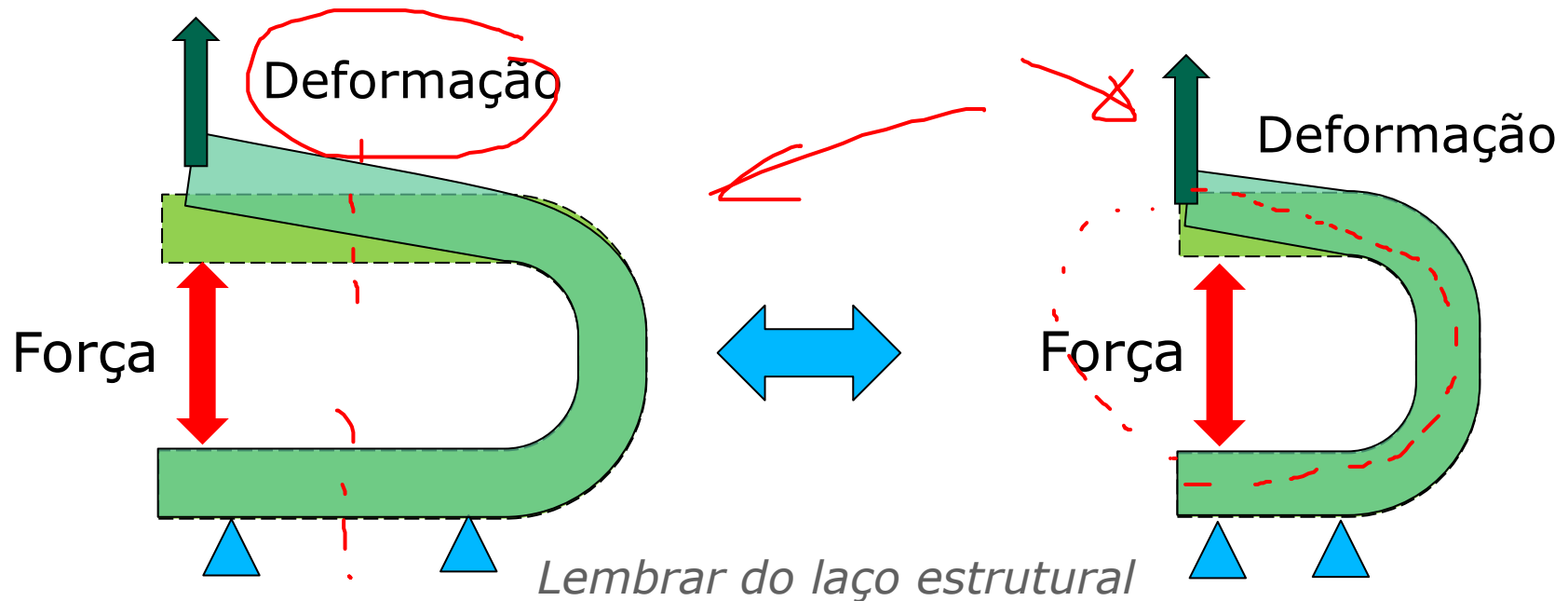
- Para reduzir a compliância cada termo do produto  $EI$ , ou  $GI$ , deve ser maximizado.
- Materiais com valores elevados de módulo de elasticidade  $E$  devem ser selecionados



Ashby, M.F.; Materials Selection in Mechanical Design, Fourth Edition, Elsevier Science 2010



## Minimização do comprimento da linha de força



*Lembrar do laço estrutural*

### Centros de ação

- Os centros de ação são pontos onde uma força é aplicada sem gerar momento.
  - Centro de massa
  - Centro de rigidez
  - Centro de atrito
  - Centro de expansão térmica



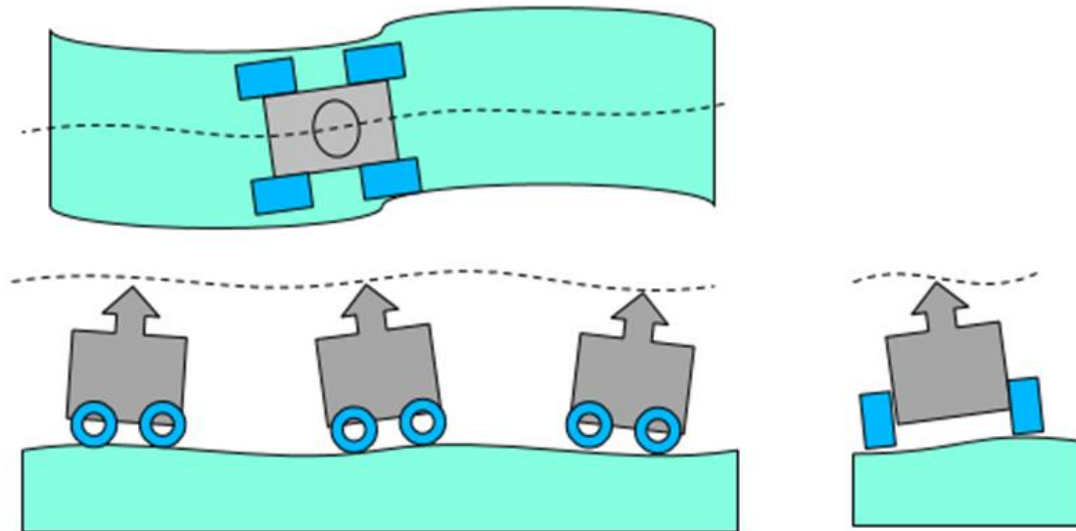
## Princípio da correção de erro

- O Princípio da correção de erro se aplica a sistemas operando a baixa velocidade, onde as forças de inércia, vibrações, e etc. não afetam a precisão.
- Para velocidades acima de certos nível deve se considerar adicionar teoria de controle ao princípio de correção de erro.
- **Ou seja:** a partir de um certo ponto as soluções puramente mecânicas não permitem atingir determinados níveis de precisão, então soluções integradas (meca-opto-eletrônicas) devem empregadas



## Métodos de correção de erro

- Erros sistemáticos ou repetitivos – erros que podem ser previstos para qualquer ponto no espaço e no tempo





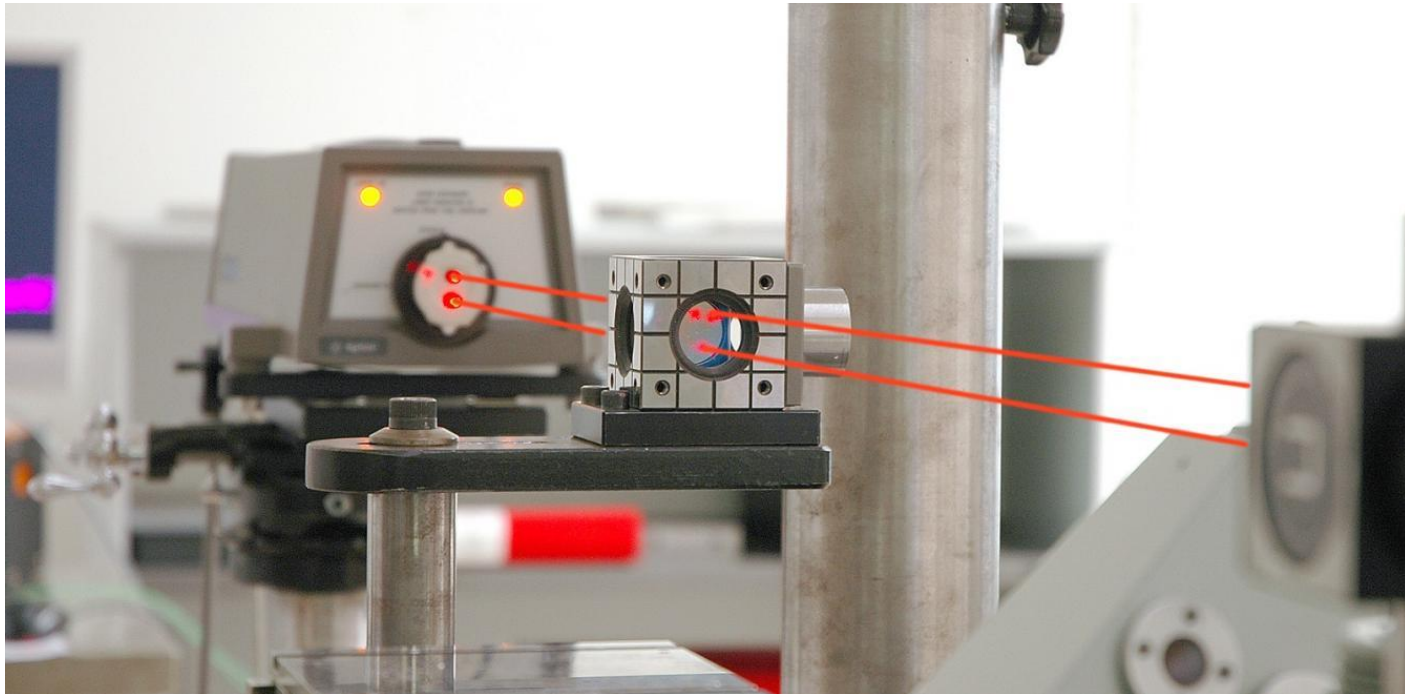
## Métodos de correção de erro

- Erros aleatórios ou não repetitivos – são erros causados por deformações térmicas, deformações por ação de forças, massas móveis, erros aleatórios tais como os provenientes do desgaste e vibrações.
- Para corrigir erros aleatórios primeiro deve se separar os repetitivos dos não repetitivos.
- Para os erros repetitivos: Realize medições precisas e use os dados para realizar as correções
- Para os erros não repetitivos: monitore (sistemas ativos de compensação de erros)



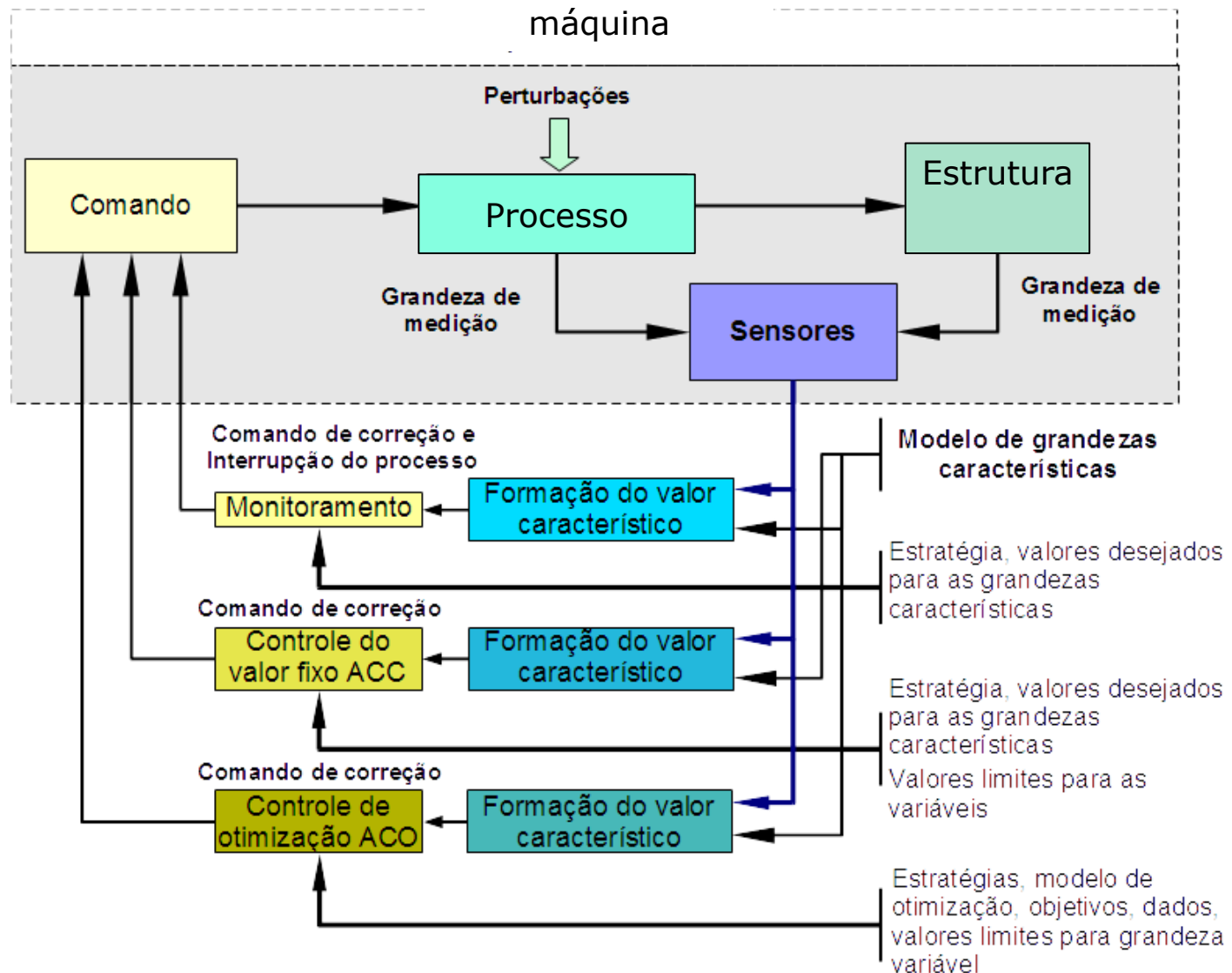
## **Métodos de correção de erro**

- Correção de erros por cálculos teóricos
- Correção de erros através de modelos estáticos
- Correção de erros por realimentação do controle





## Monitoramento de erro





## **Compensação de erros em sistemas de precisão**

### **Erros do meio**

- Controle de temperatura
- Controle de umidade
- Controle de contaminantes (sólidos e biológicos)
- Controle de vibrações

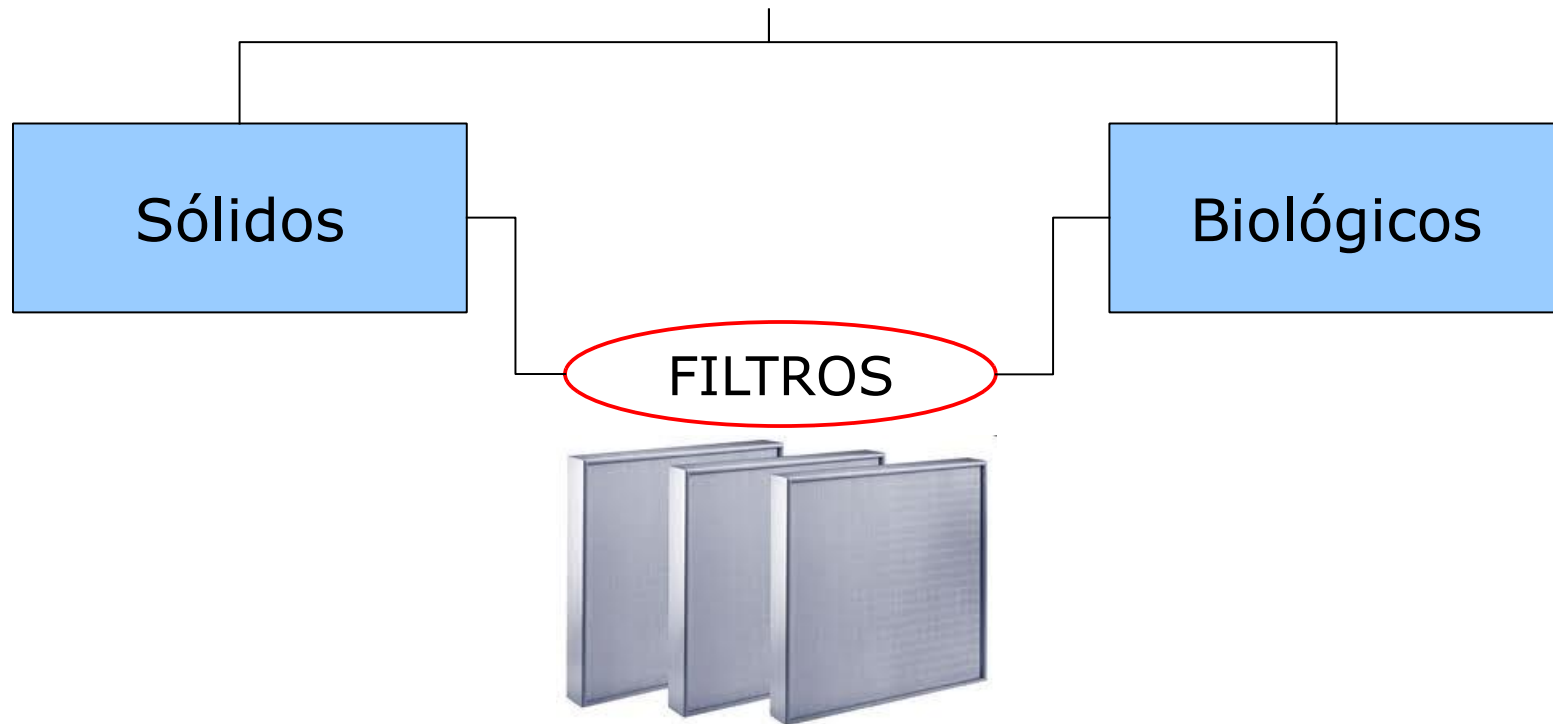




## Compensação de erros em sistemas de precisão

### Erros do meio

Controle de contaminantes (sólidos e biológicos)

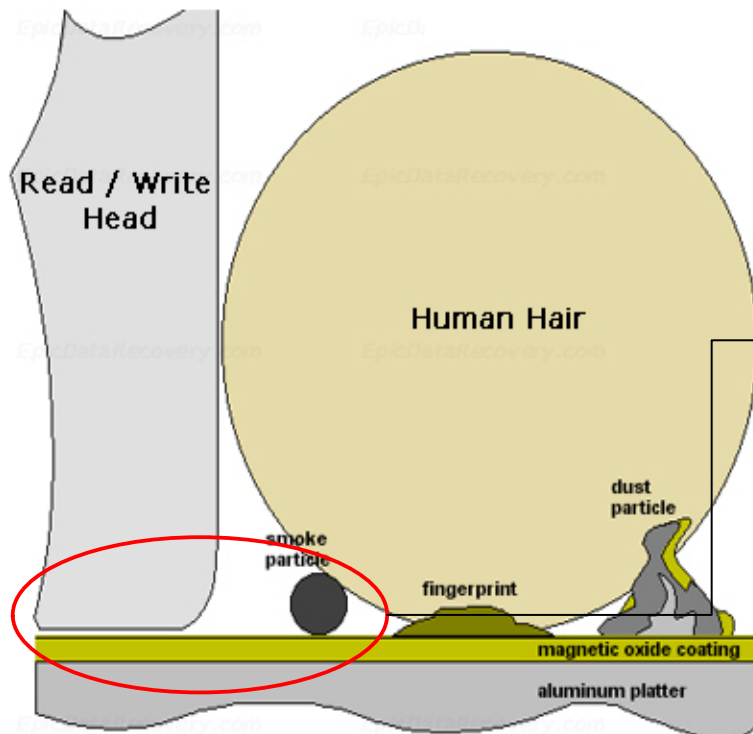




## Compensação de erros em sistemas de precisão

### Erros do meio

Controle de contaminantes (sólidos e biológicos)

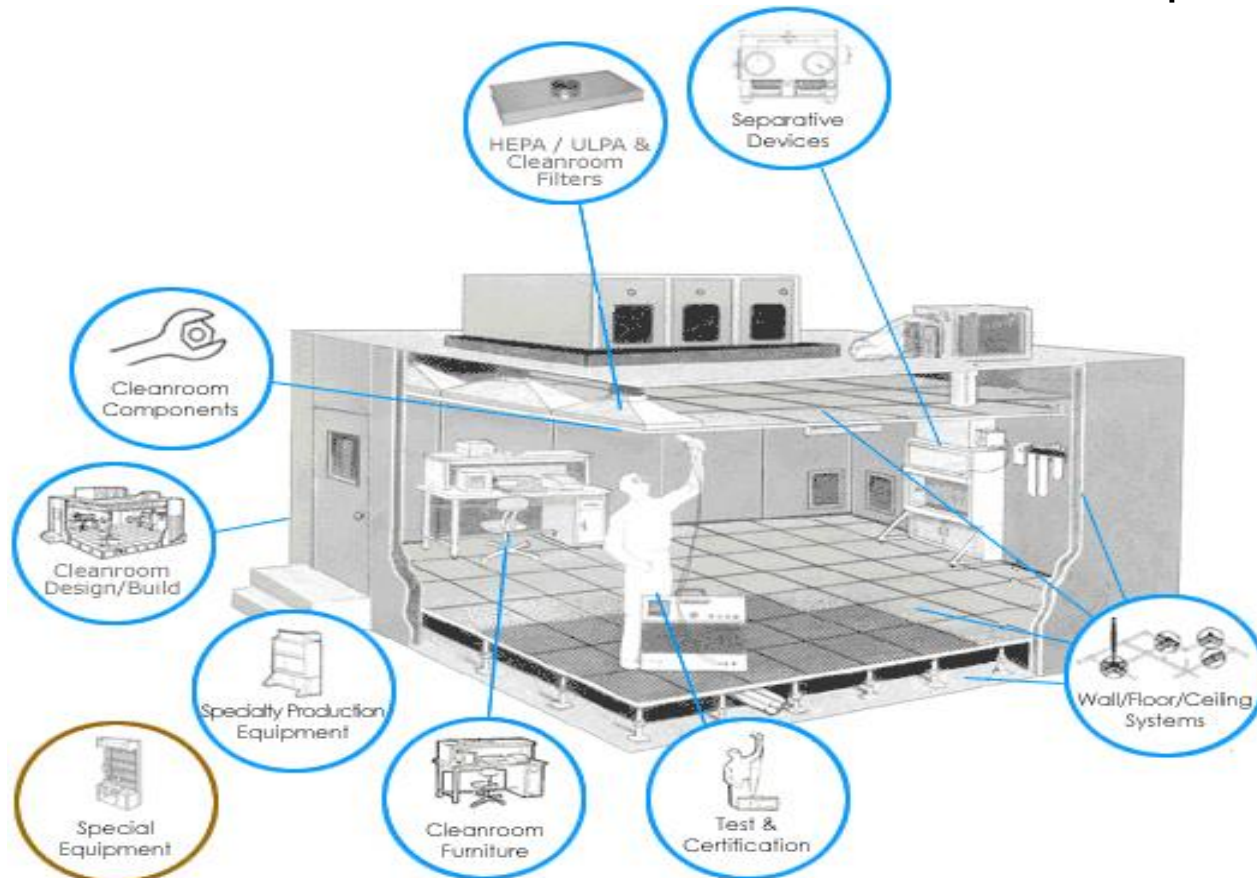




## Compensação de erros em sistemas de precisão

### Erros do meio

Controle de contaminantes e Salas limpas

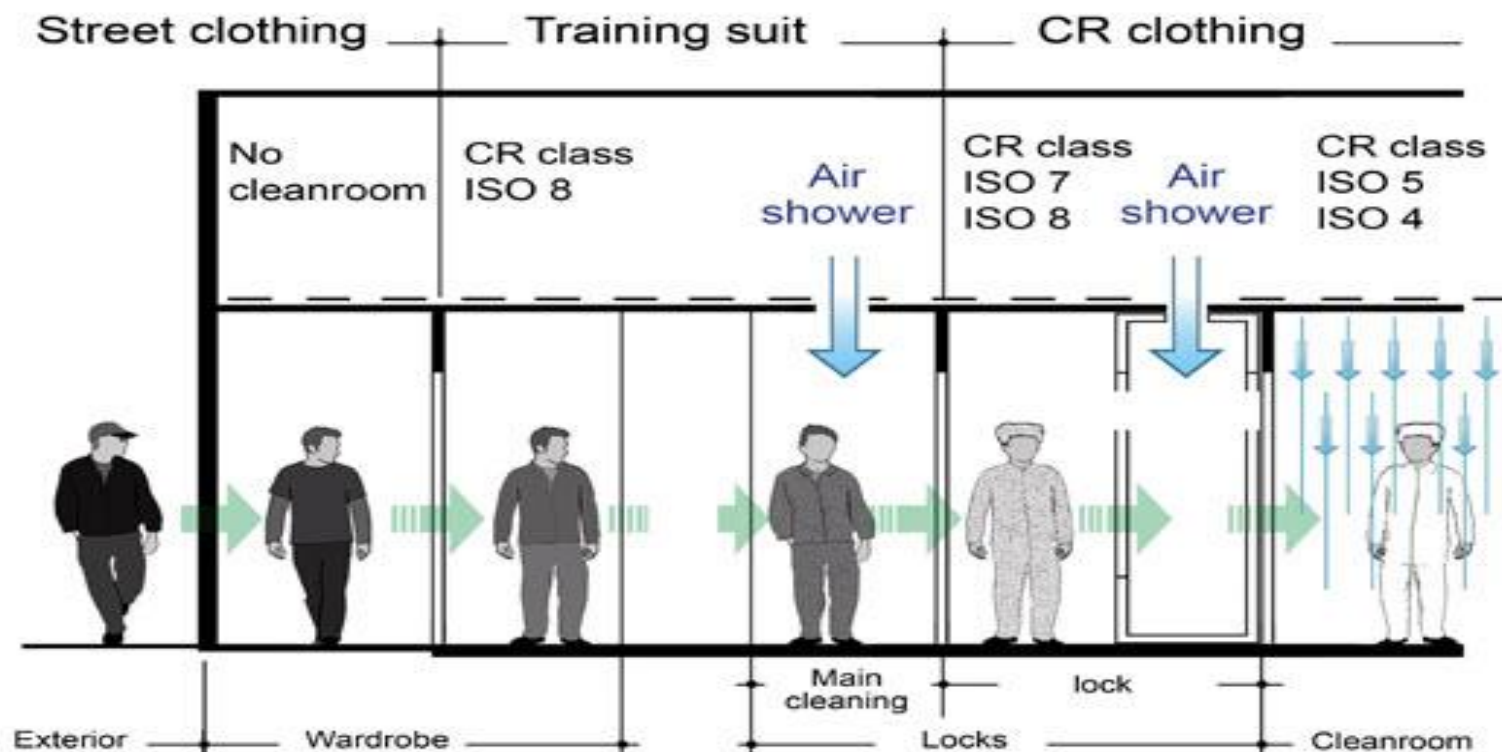




## Compensação de erros em sistemas de precisão

### Erros do meio

Controle de contaminantes e Salas limpas

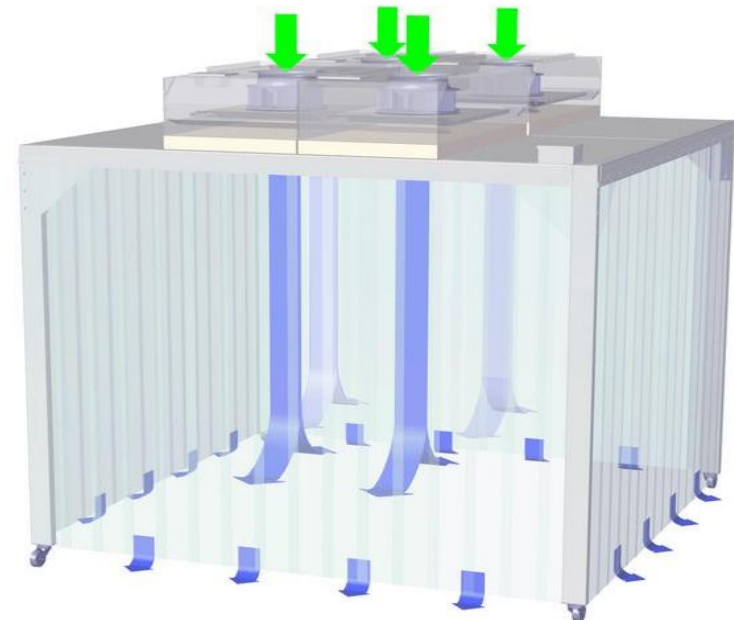
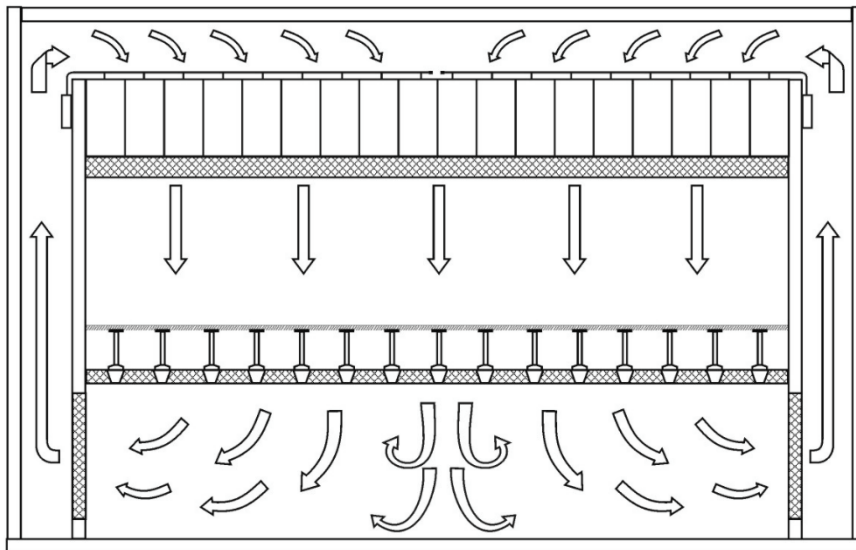




## Compensação de erros em sistemas de precisão

### Erros do meio

Controle de contaminantes e Salas limpas





## Compensação de erros em sistemas de precisão

### Erros do meio

Controle de contaminantes e Salas limpas

#### ISO 14644-1 cleanroom standards

Class	maximum particles/m <sup>3</sup>						FED STD 209E equivalent
	≥0.1 μm	≥0.2 μm	≥0.3 μm	≥0.5 μm	≥1 μm	≥5 μm	
ISO 1	10	2.37	1.02	0.35	0.083	0.0029	
ISO 2	100	23.7	10.2	3.5	0.83	0.029	
ISO 3	1,000	237	102	35	8.3	0.29	Class 1
ISO 4	10,000	2,370	1,020	352	83	2.9	Class 10
ISO 5	100,000	23,700	10,200	3,520	832	29	Class 100
ISO 6	1.0 × 10 <sup>6</sup>	237,000	102,000	35,200	8,320	293	Class 1,000
ISO 7	1.0 × 10 <sup>7</sup>	2.37 × 10 <sup>6</sup>	1,020,000	352,000	83,200	2,930	Class 10,000
ISO 8	1.0 × 10 <sup>8</sup>	2.37 × 10 <sup>7</sup>	1.02 × 10 <sup>7</sup>	3,520,000	832,000	29,300	Class 100,000
ISO 9	1.0 × 10 <sup>9</sup>	2.37 × 10 <sup>8</sup>	1.02 × 10 <sup>8</sup>	35,200,000	8,320,000	293,000	Room air



## Compensação de erros em sistemas de precisão

### Erros do meio

#### Controle de temperatura

As principais fontes de calor:

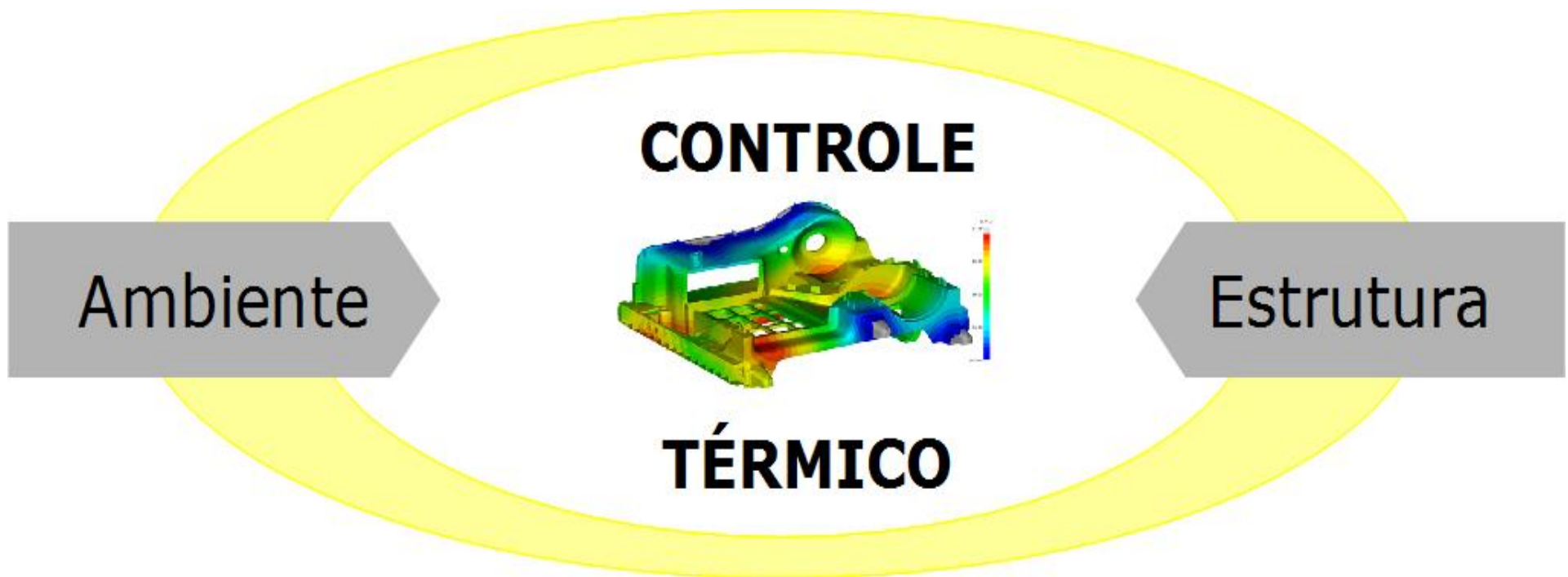
- eletrônica de potência (ex. fontes, controladores..)
- computadores (auxiliar e CNC)
- acionamentos do eixos principais e árvore
- iluminação do ambiente
- ambiente (ex. paredes)
- pessoas
- atrito das partes com movimento relativo



## Compensação de erros em sistemas de precisão

### Erros do meio

Controle de temperatura







## Compensação de erros em sistemas de precisão

### Erros do meio

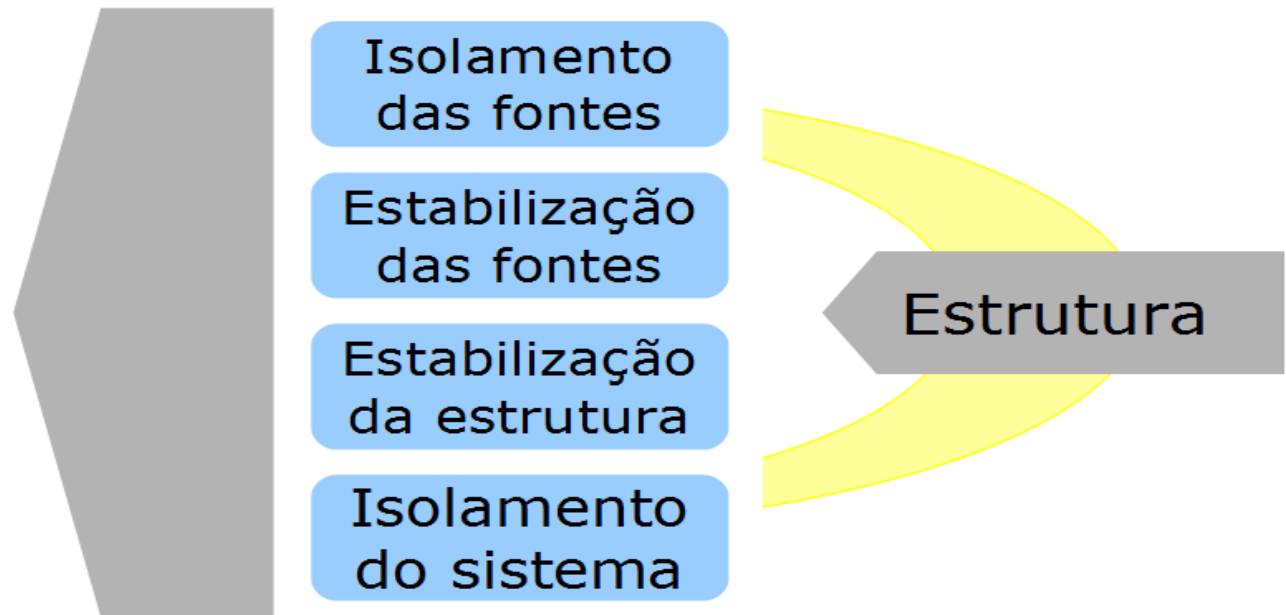
Controle de temperatura



**coolers**



**Heat pipes**

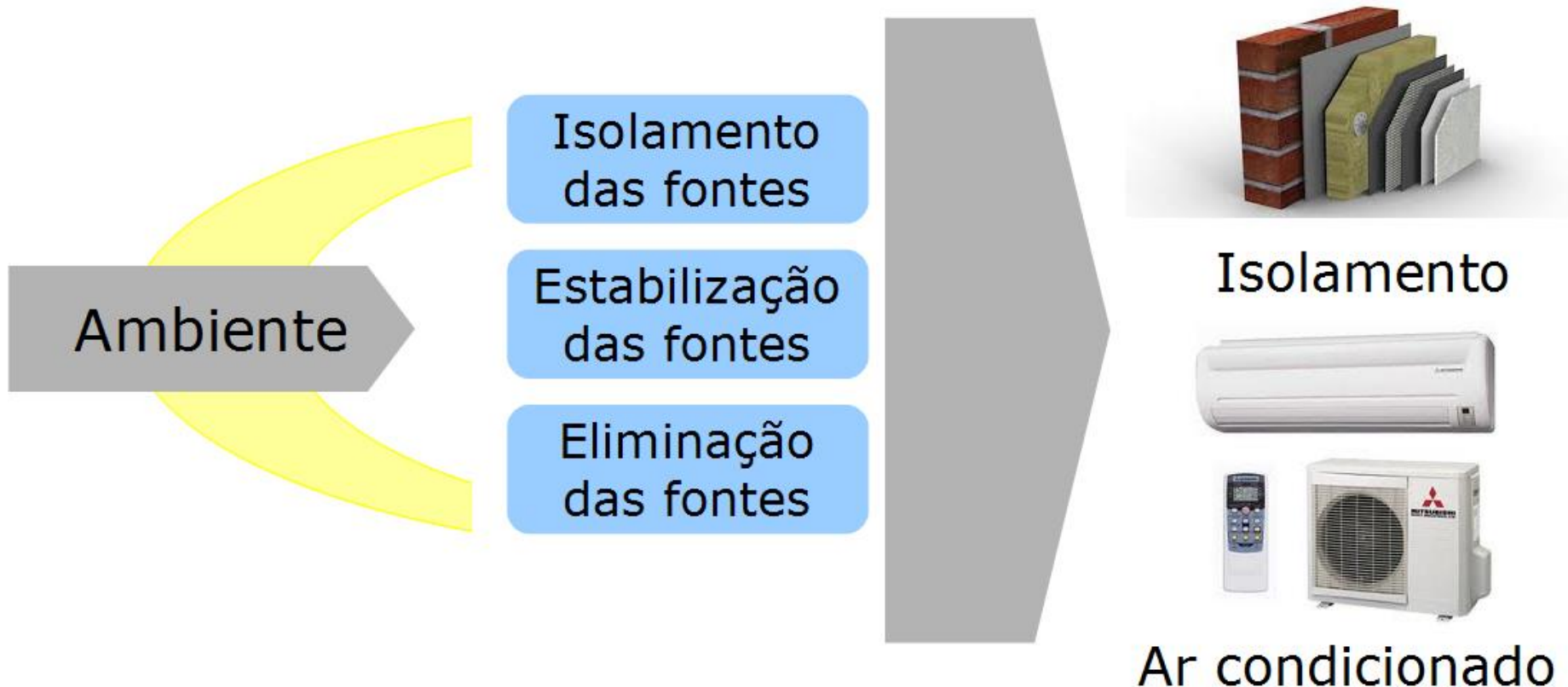




## Compensação de erros em sistemas de precisão

### Erros do meio

Controle de temperatura

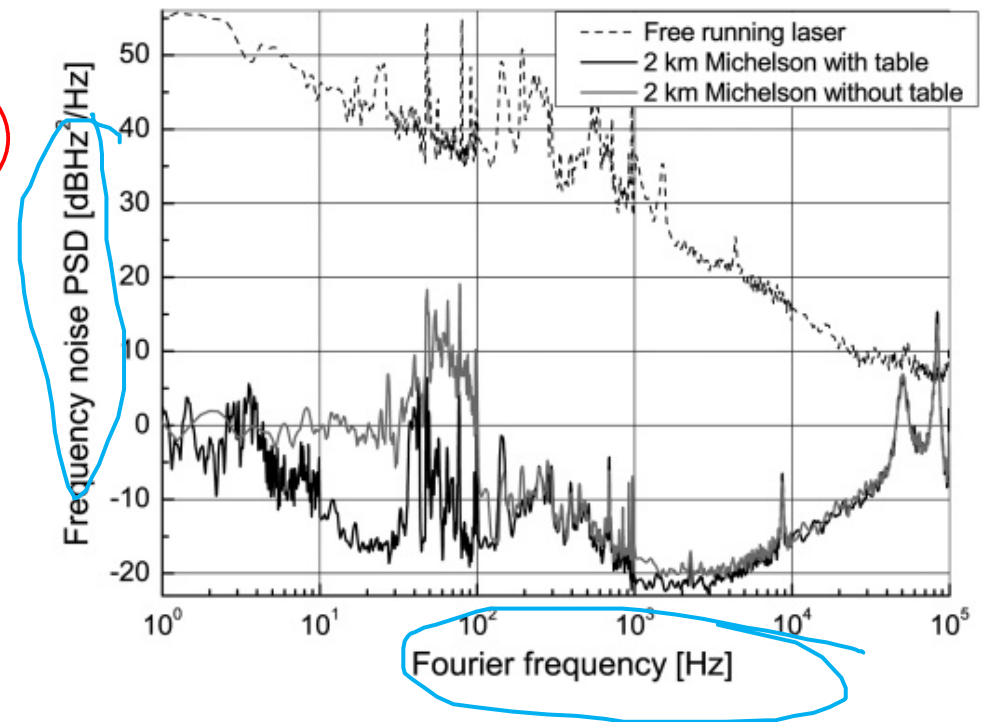
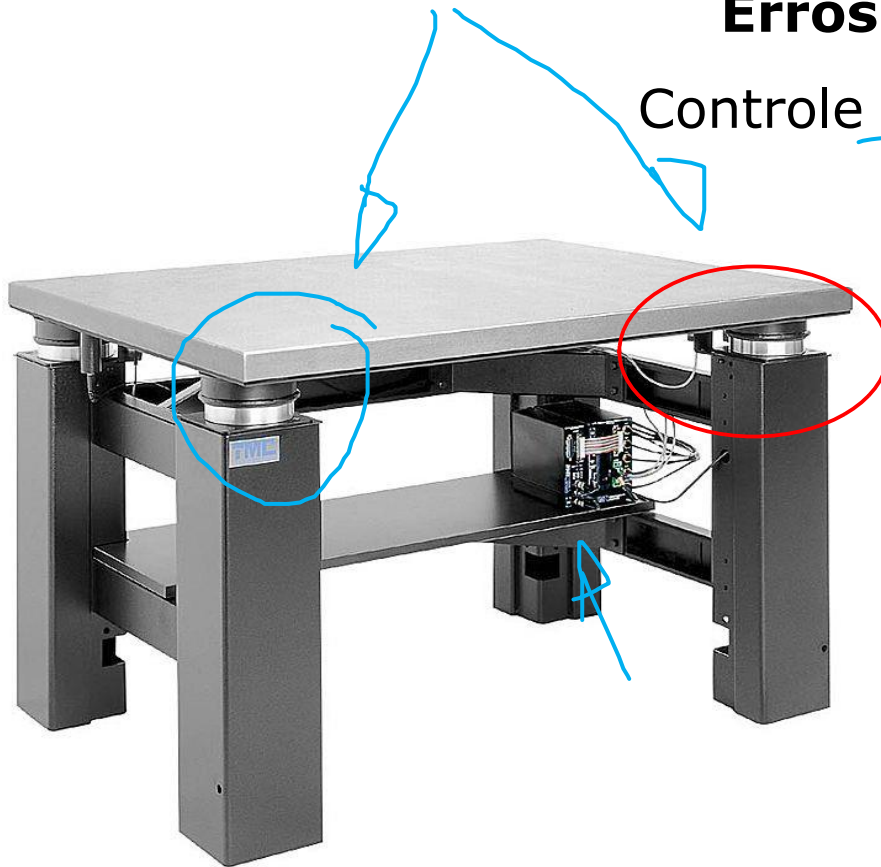




## Compensação de erros em sistemas de precisão

### Erros do meio

Controle de vibrações

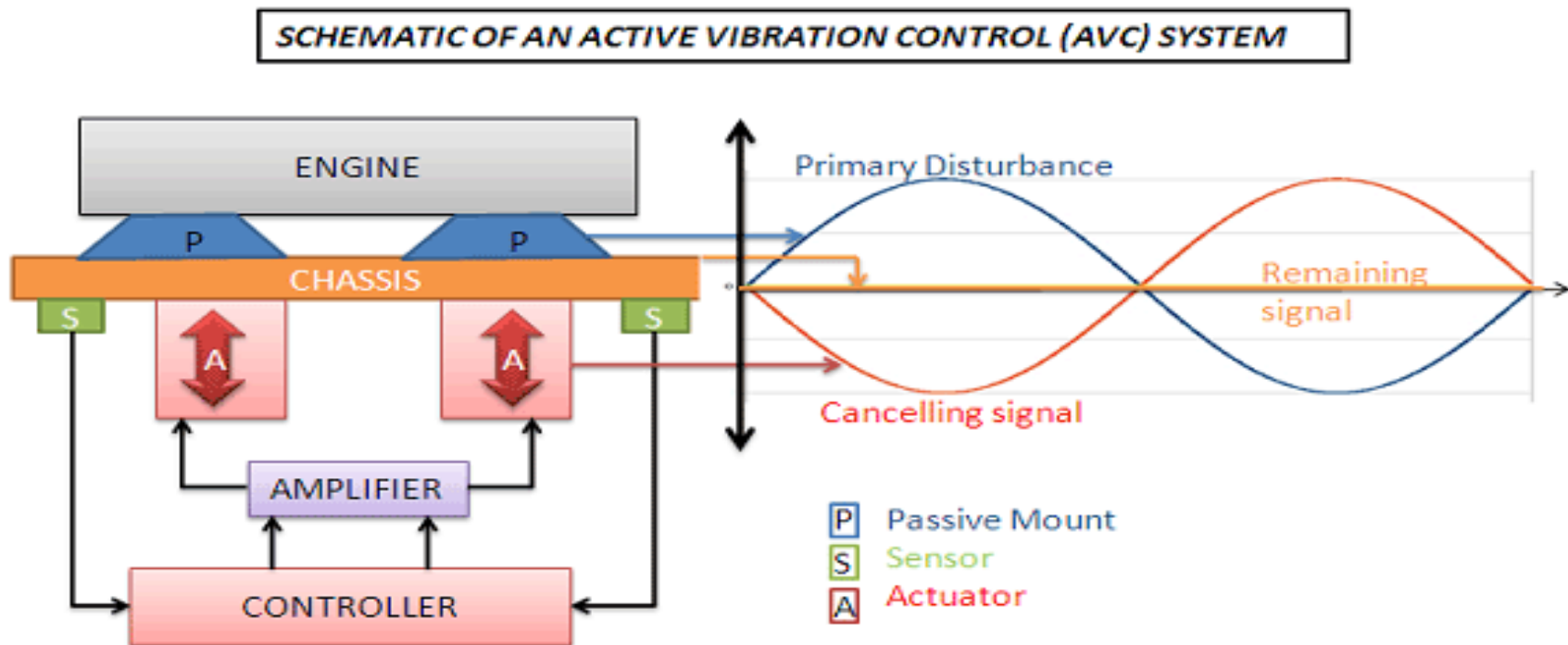




## Compensação de erros em sistemas de precisão

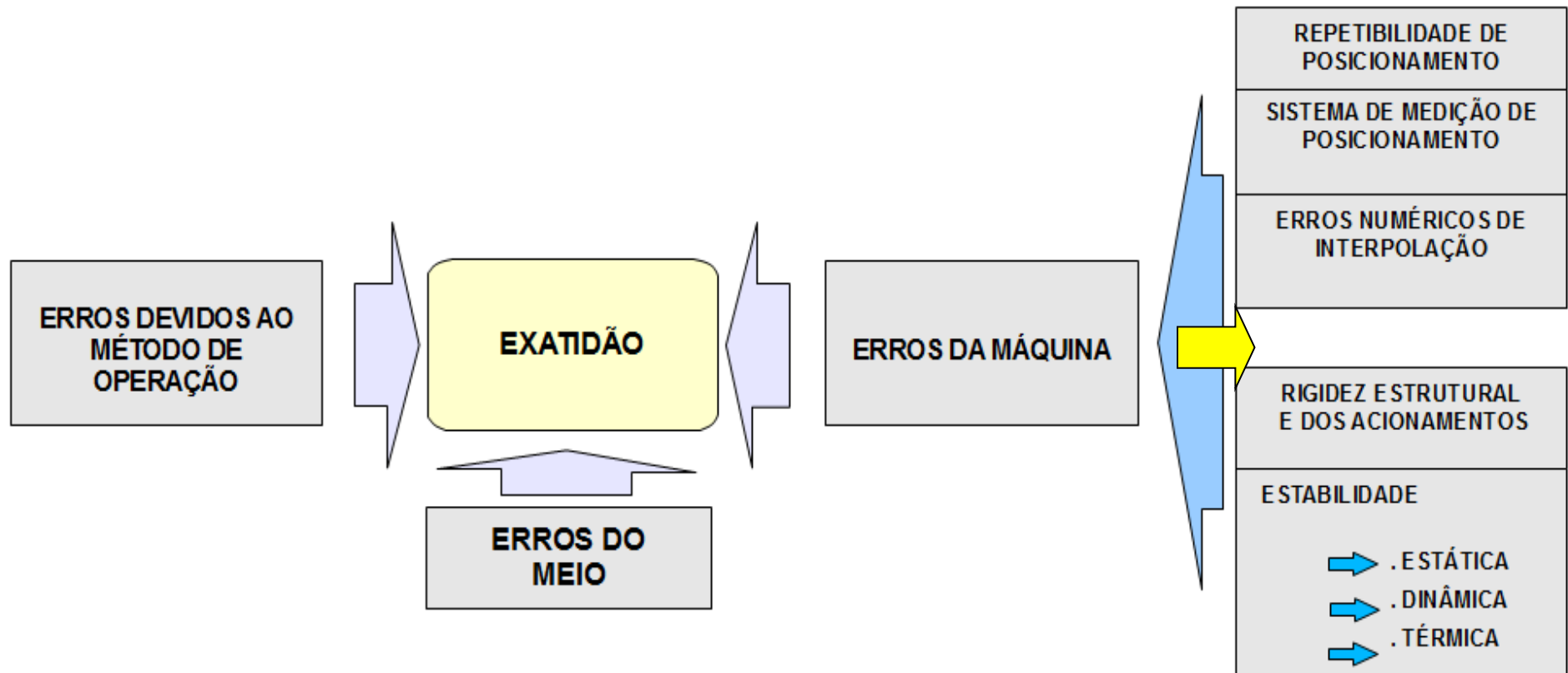
### Erros do meio

### Controle de vibrações





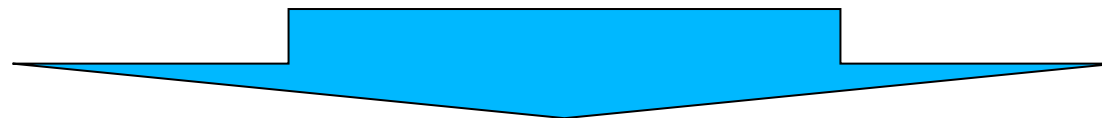
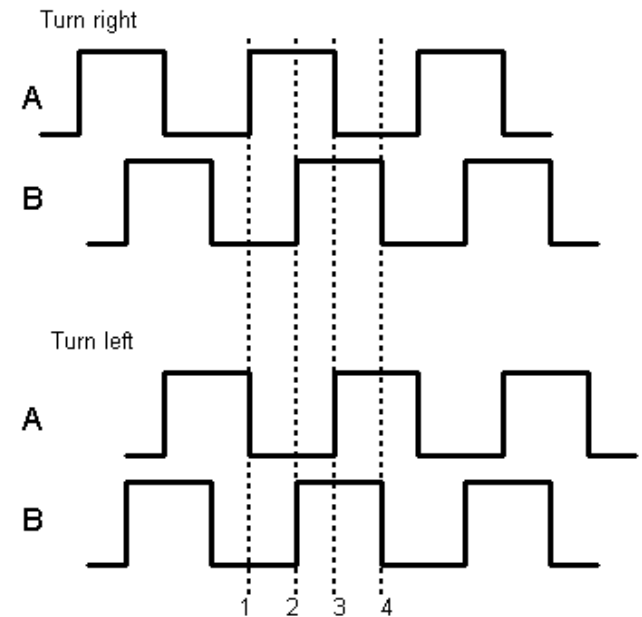
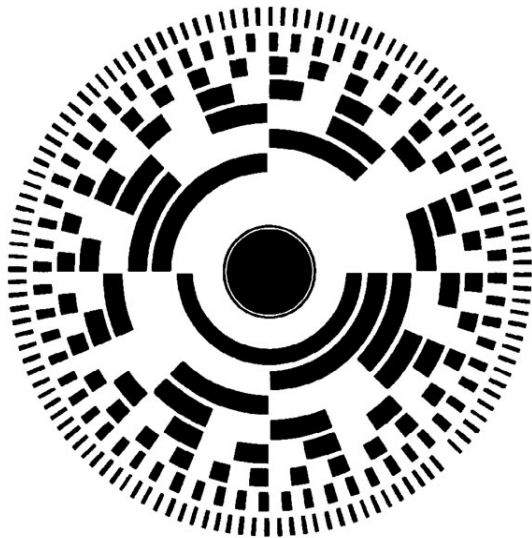
## Outro Erros em sistemas de Precisão





## Erros da máquina

### Sistemas de medição



**ERROS**



## Erros da máquina

### Erros de interpolação e truncamento numéricos

0,001999 mm

0,000199 mm

0,000019 mm

0,000002 mm

0,0019 ou 0,002 ou 0,001 ??

0,00019 ou 0,0002 ou 0,0001 ??

10 ou 20 nm ??

1 ou 2 nm ??



## Erros da máquina

### Erros de interpolação e truncamento numéricos

0,0019 ou 0,002 ou 0,001 ??

0,00019 ou 0,0002 ou 0,0001 ??

10 ou 20 nm ??

1 ou 2 nm ??

Quão significativo  
são esses erros?

Qual o tamanho  
de memória?

Qual a velocidade  
de processamento?





**ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**

---

**FIM DA AULA**