



ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

PMR 3501

Engenharia de Precisão

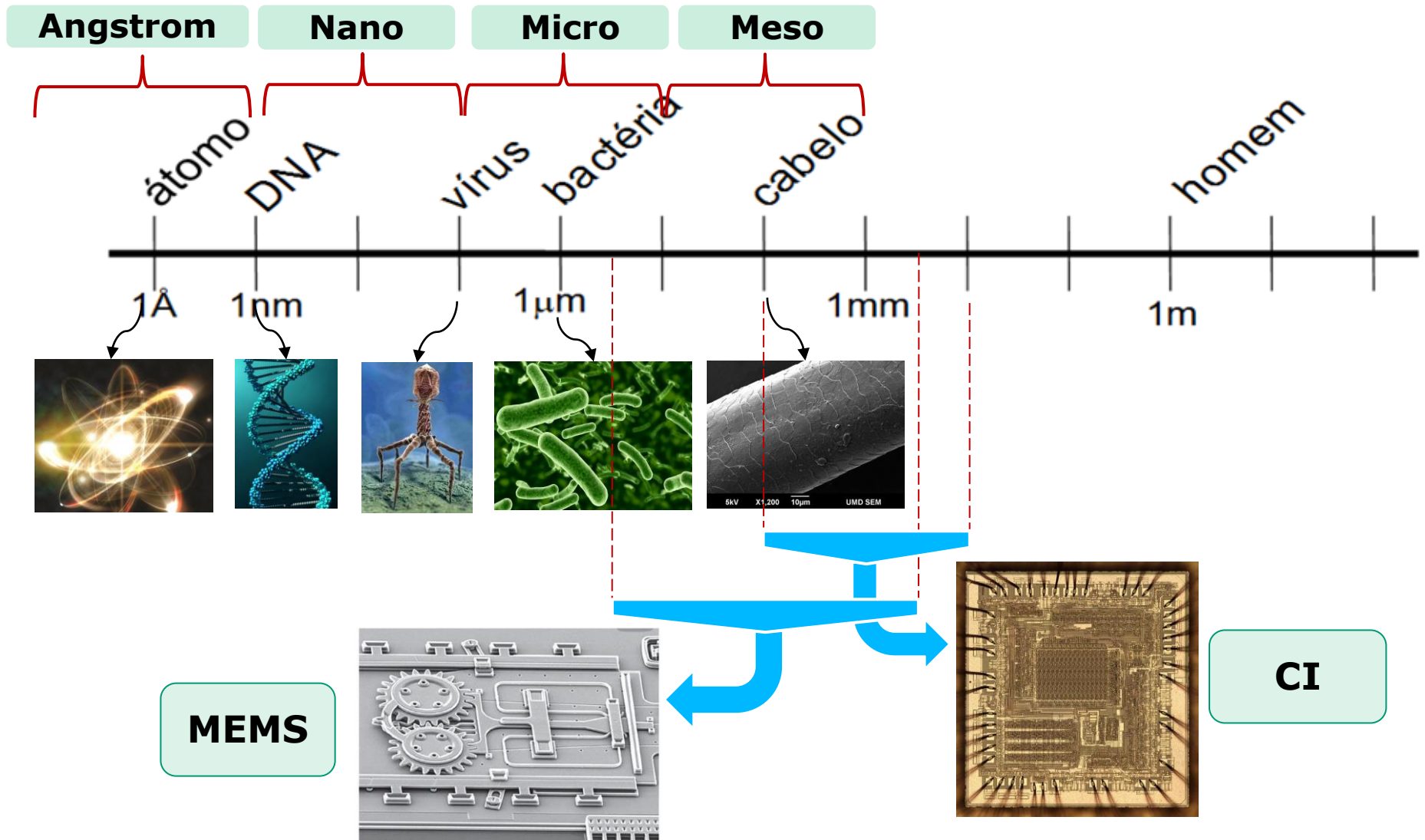
A18

Estruturas de sistemas de Precisão

2023.2



Efeito de escala

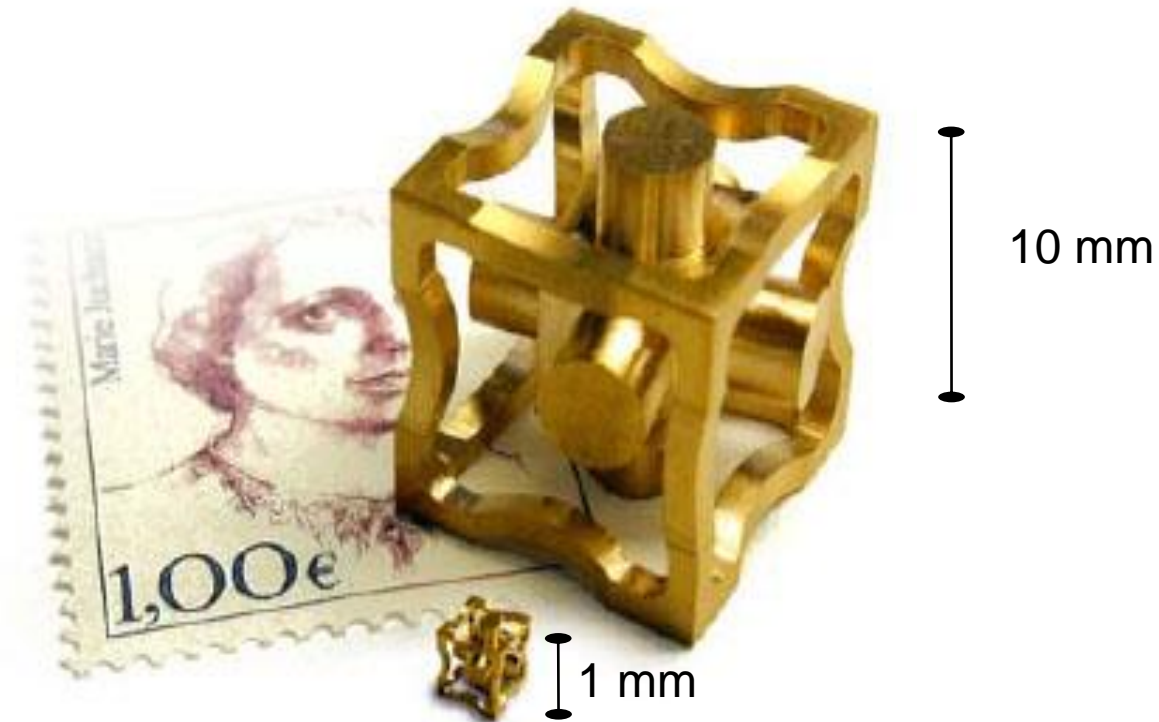


MEMS

CI



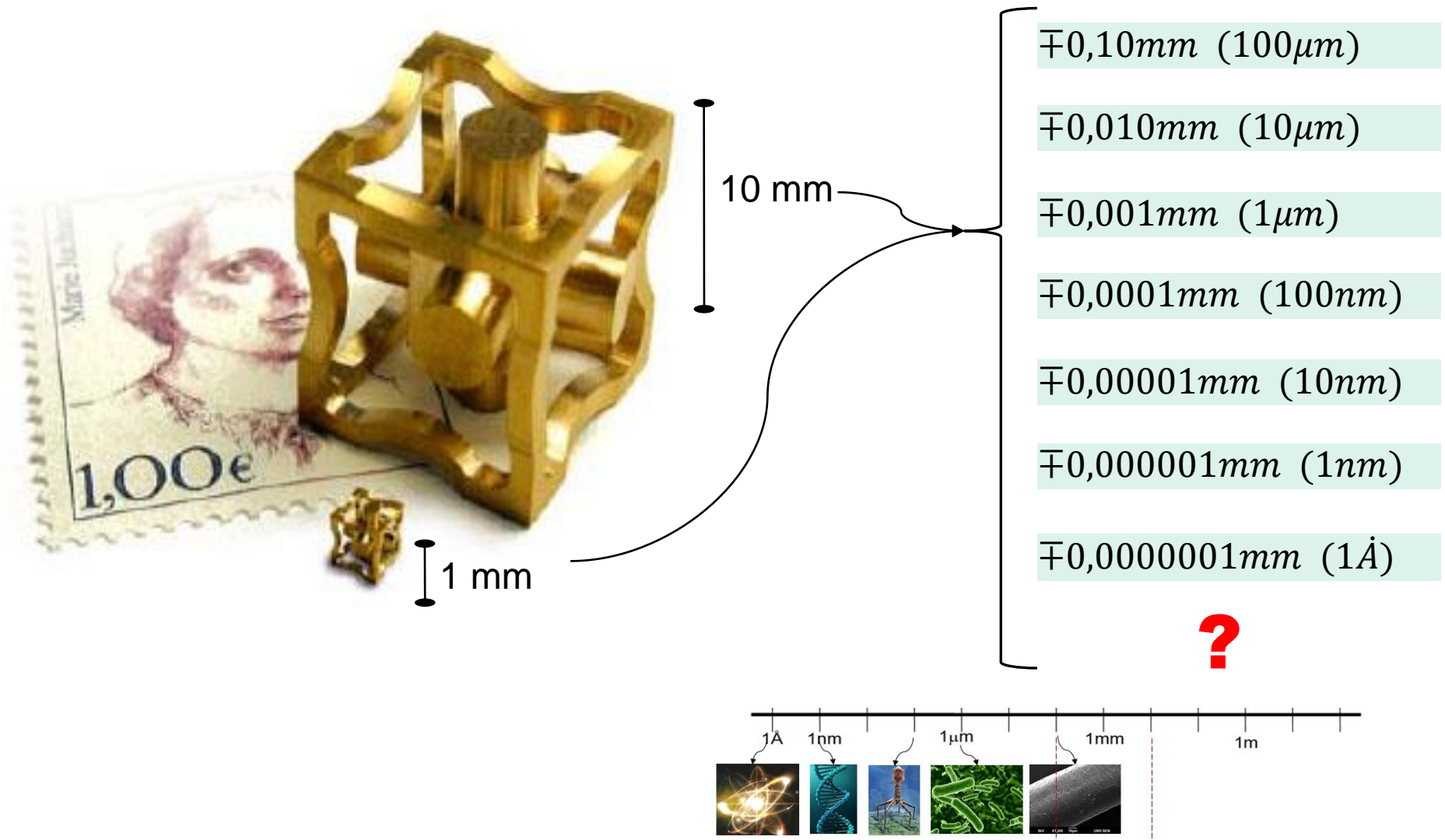
Processos de micro fabricação



<http://www.cnccookbook.com/CCNCMillFeedsSpeedsMicroMachining.htm>

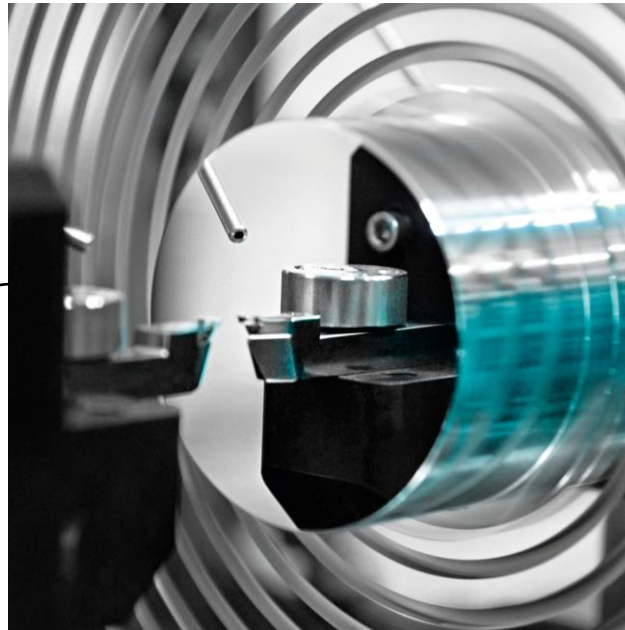


Processos de micro fabricação





Usinagem de ultra precisão



Alta definição
geométrica

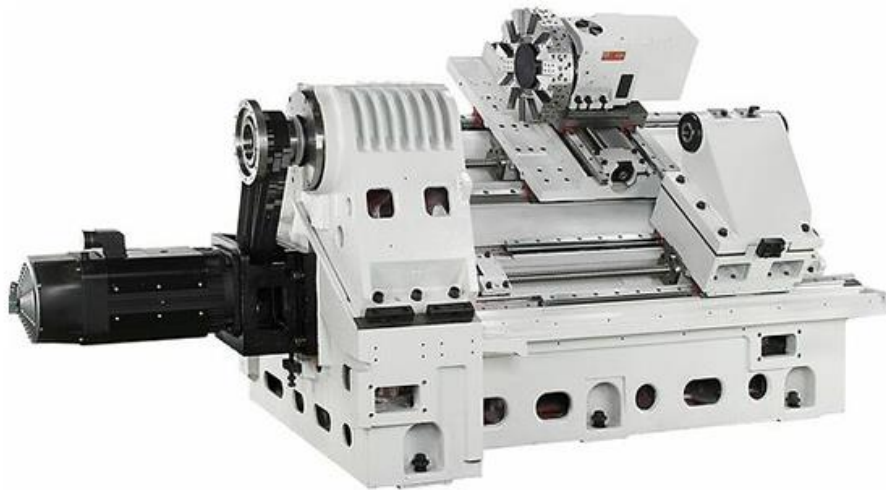
Alto acabamento
superficial

Alta definição
dimensional

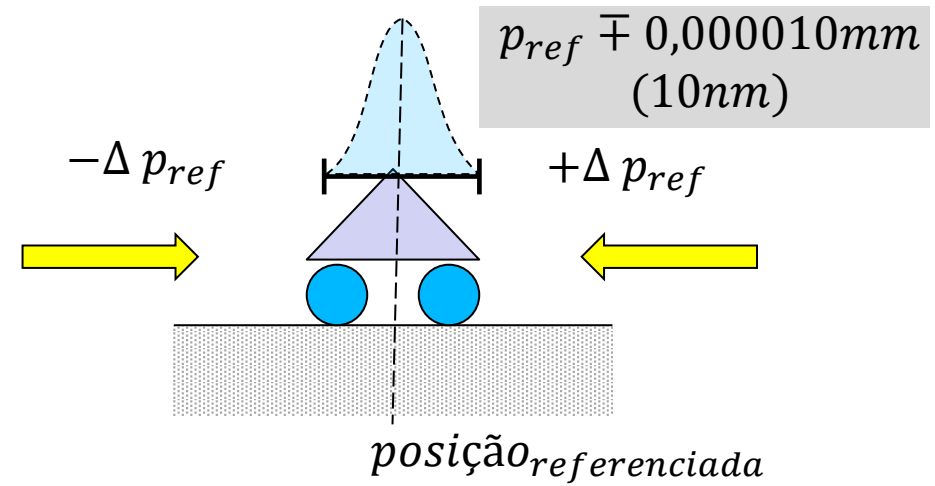
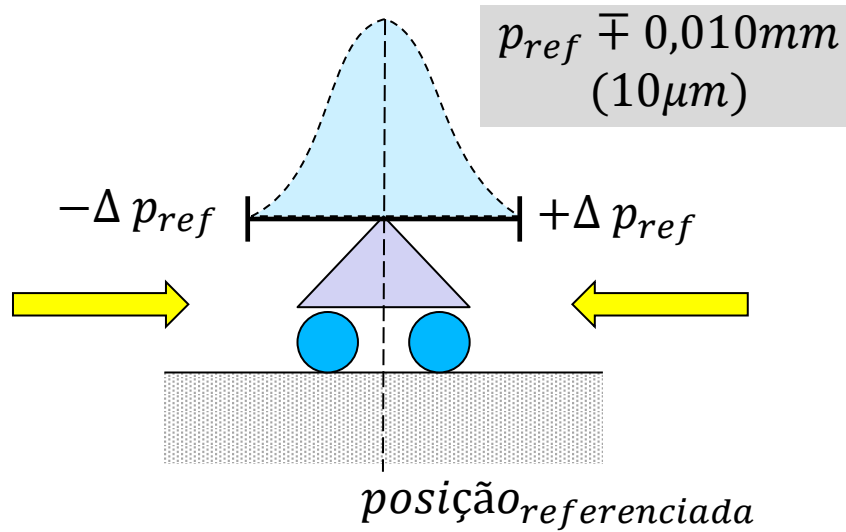


Máquinas de ultra precisão

M-F CNC convencional

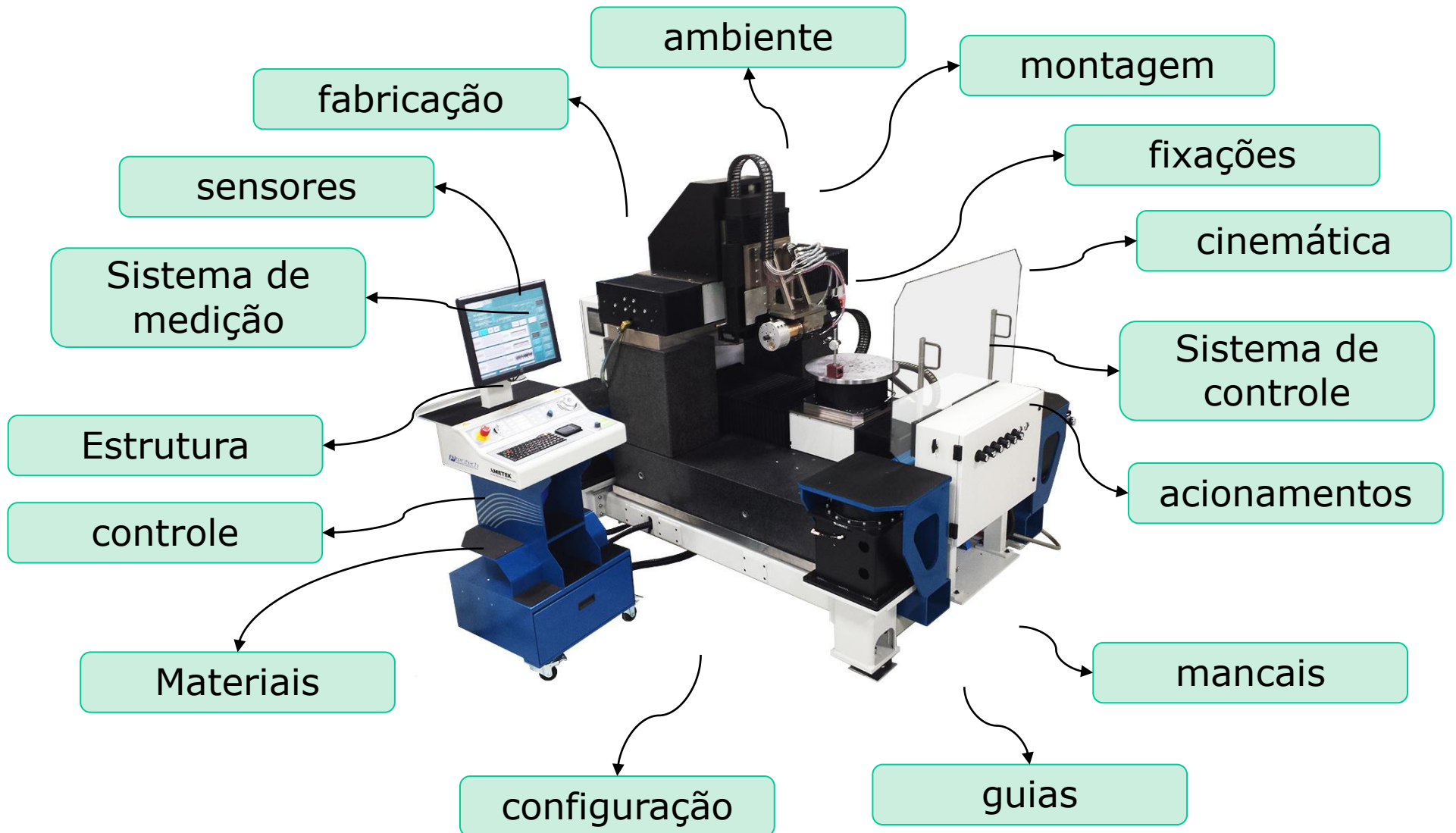


M-F ultra precisão



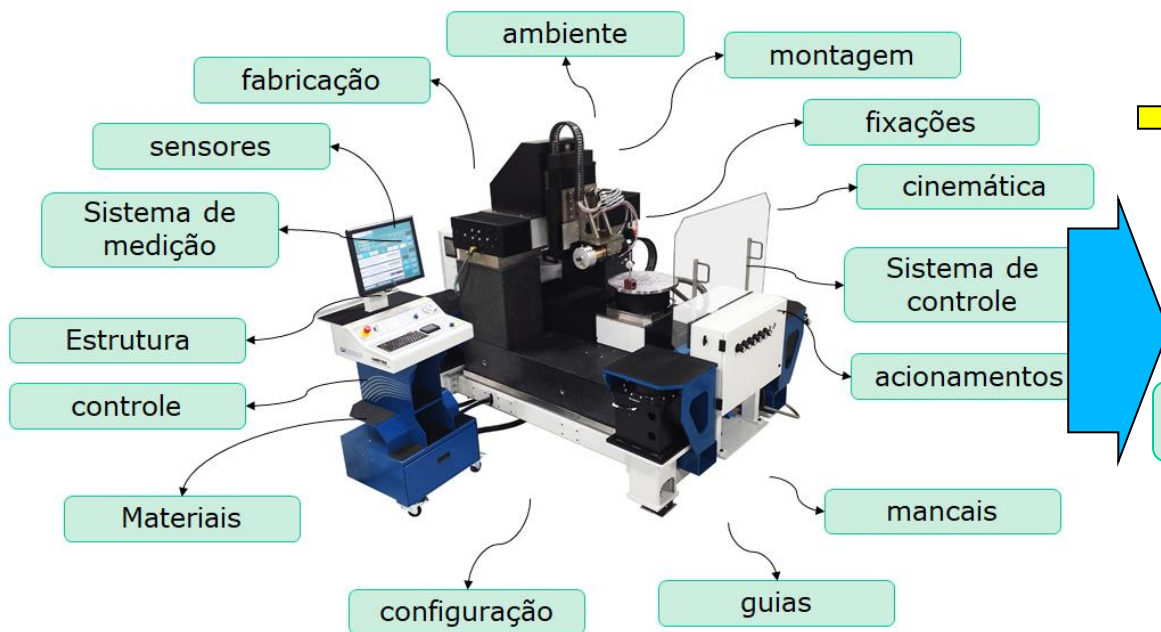


Máquinas de ultra precisão

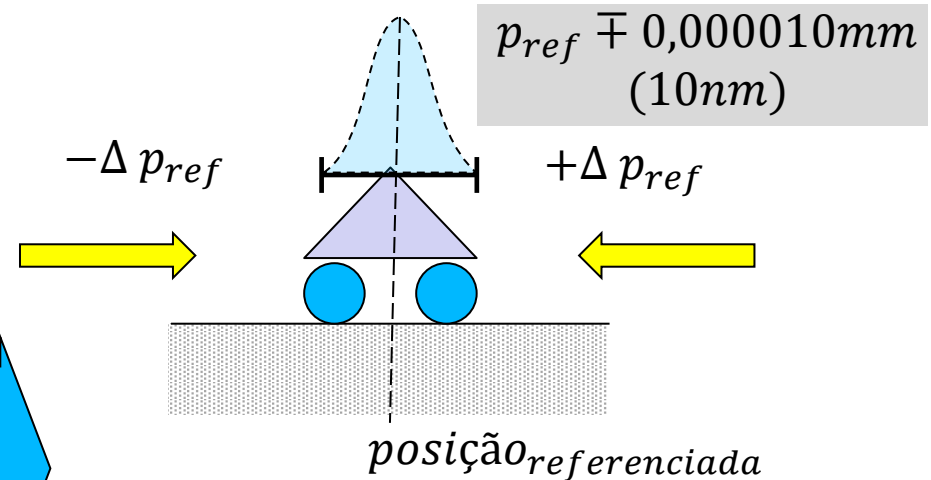




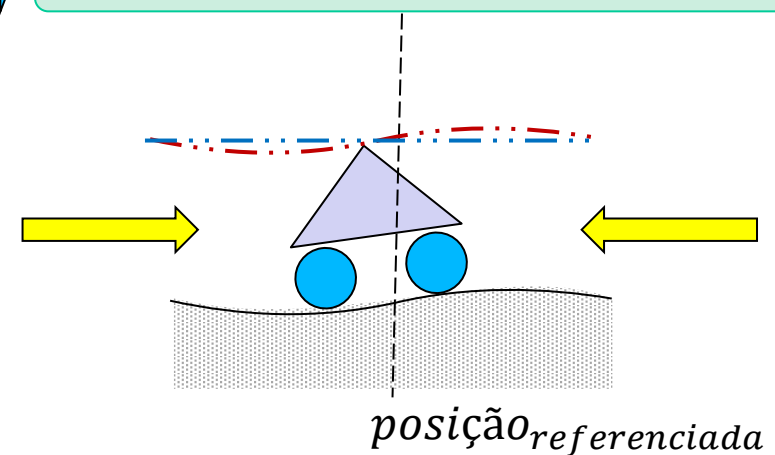
Máquinas de ultra precisão



Posicionamento preciso e exato

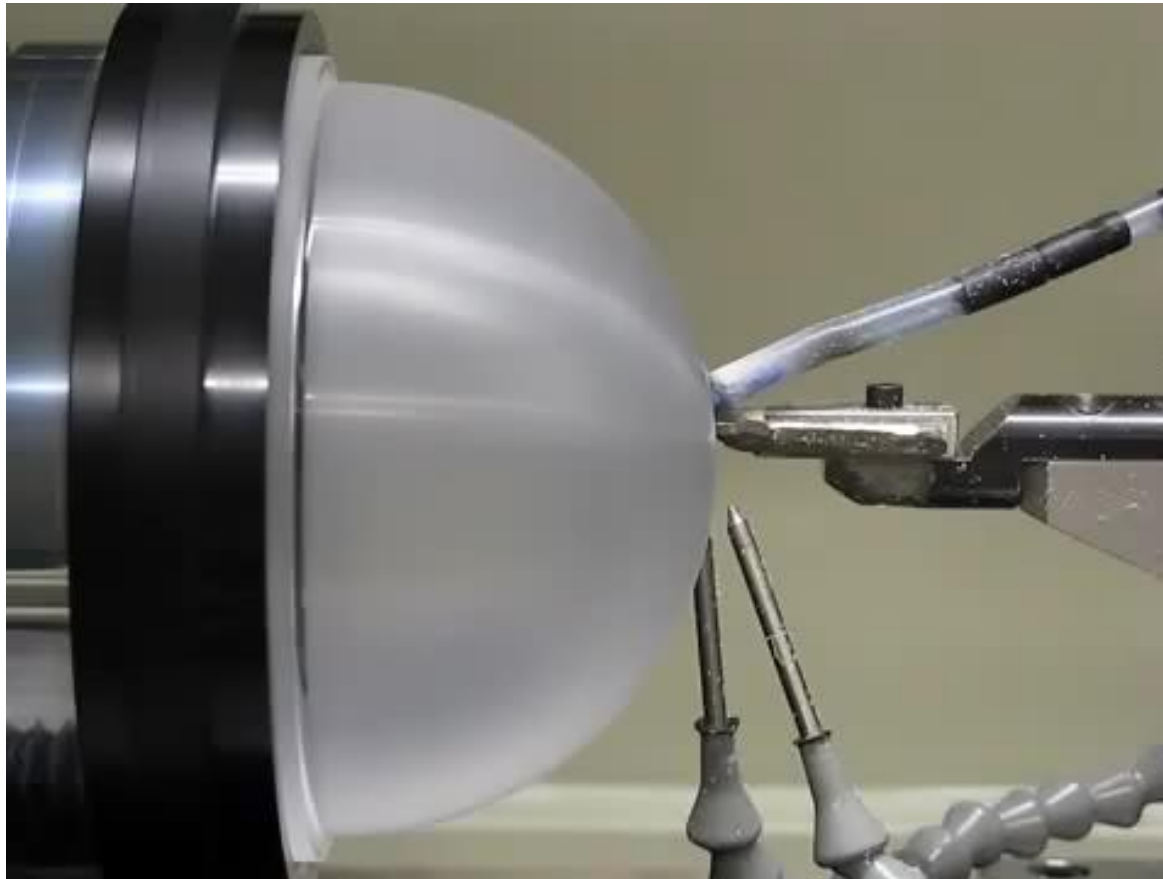


movimento preciso e suave





Usinagem de ultra precisão





Usinagem UP

<https://www.youtube.com/watch?v=Y6RQwjk5pDQ>



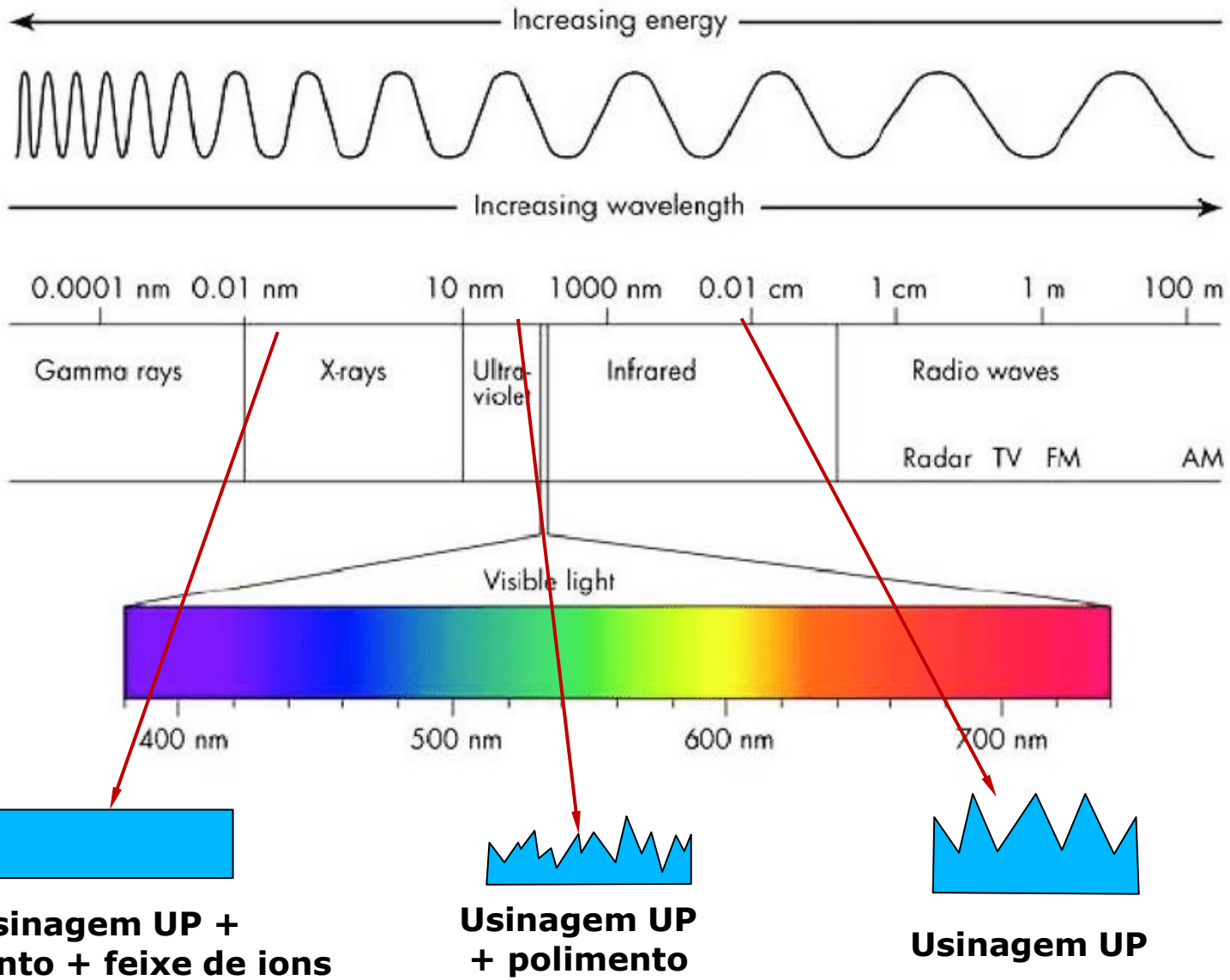
ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Usinagem UP

<https://www.youtube.com/watch?v=MUGL9vnATF8>



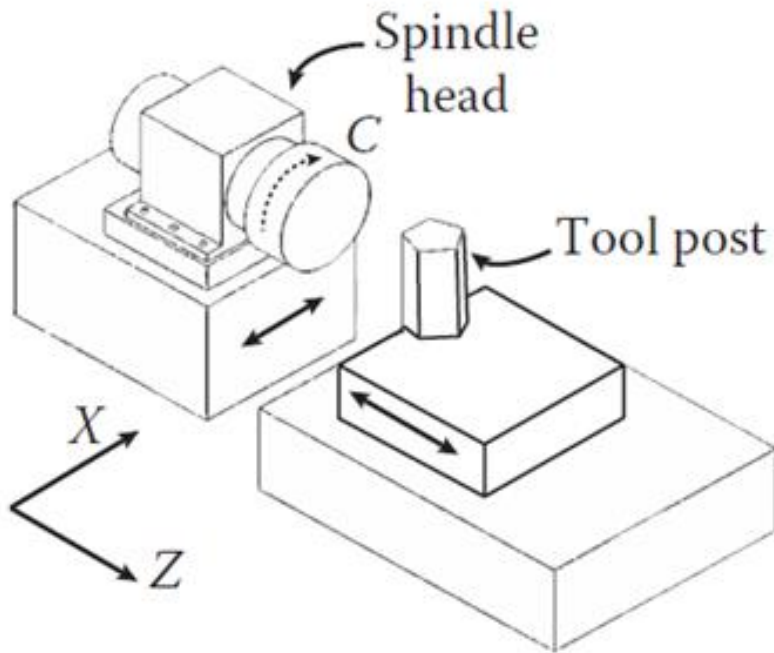
Usinagem UP



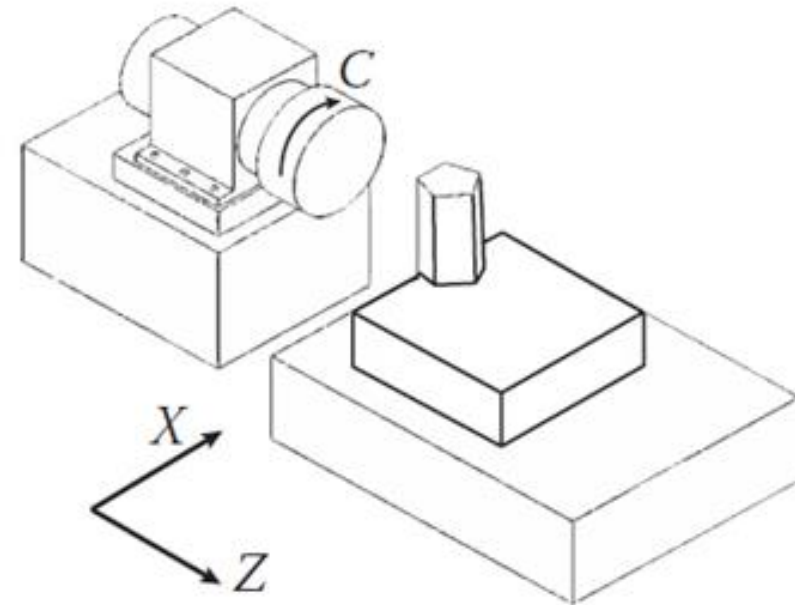


Usinagem UP

Configurações básicas



$X - Z$

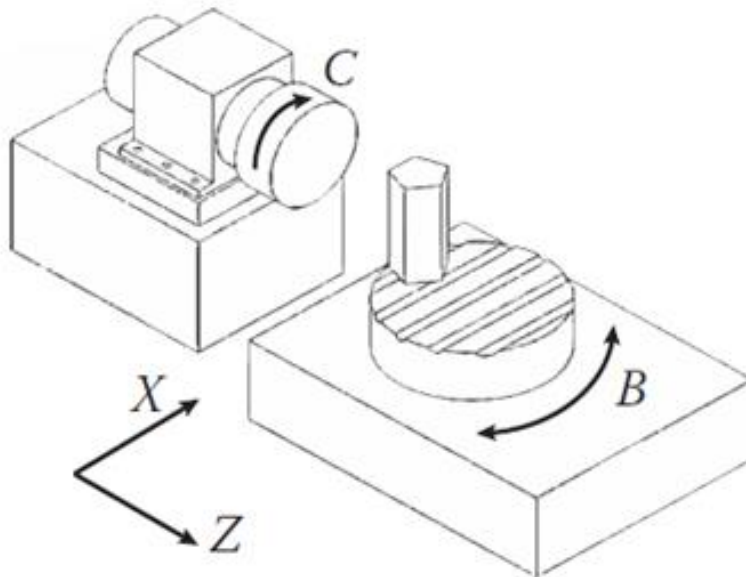


$X - Z - C$

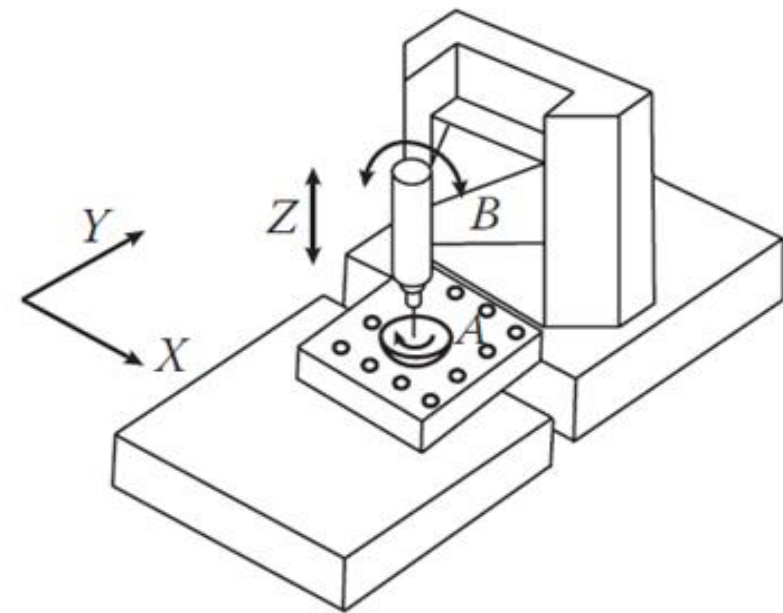


Usinagem UP

Configurações básicas



X - Z - C - B

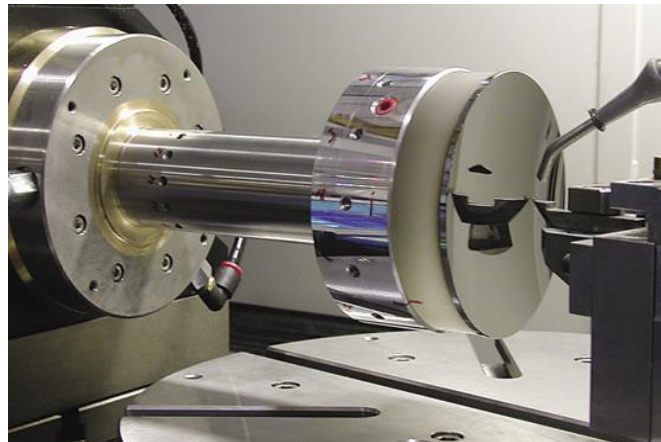


X - Y - Z - A - B



Usinagem UP

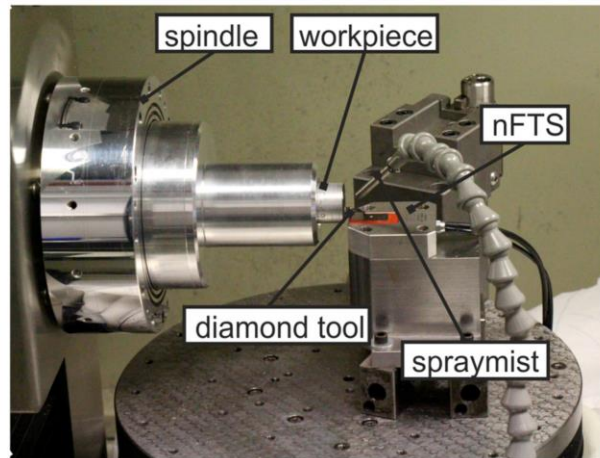
Exatidão da máquinas UP





Usinagem UP

Fontes de erros em máquinas UP



ERROS DEVIDOS AO MÉTODO DE OPERAÇÃO

EXATIDÃO

ERROS DA MÁQUINA

ERROS DO MEIO

REPETIBILIDADE DE POSICIONAMENTO
SISTEMA DE MEDIÇÃO DE POSICIONAMENTO
ERROS NUMÉRICOS DE INTERPOLAÇÃO

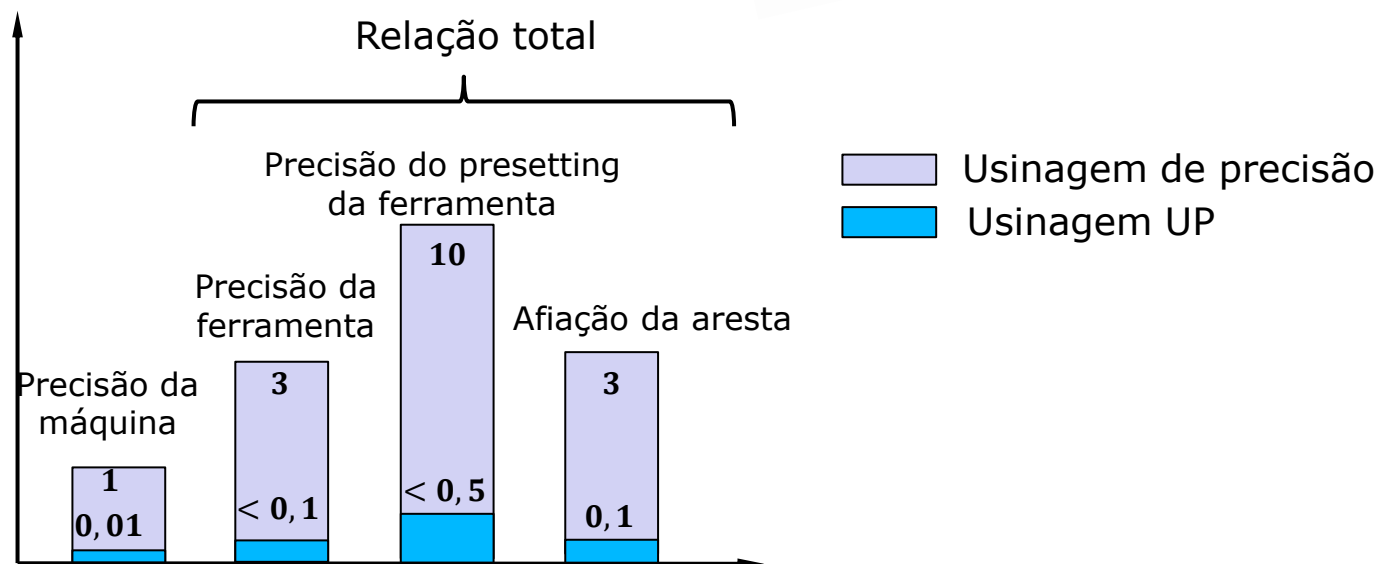
RIGIDEZ E ESTRUTURAL E DOS ACIONAMENTOS

ESTABILIDADE
→ . ESTÁTICA
→ . DINÂMICA
→ . TÉRMICA



Requisitos para máquinas UP

- Exatidão de posicionamento
- Repetibilidade de posicionamento
- Rigidez estrutural
- Loop estrutural balanceado
- Estabilidade térmica
- Estabilidade dinâmica



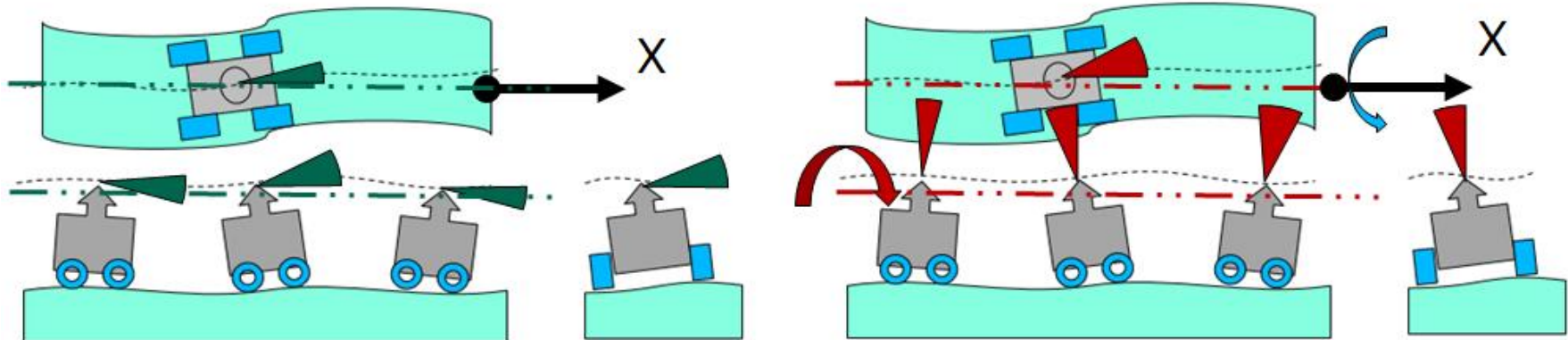
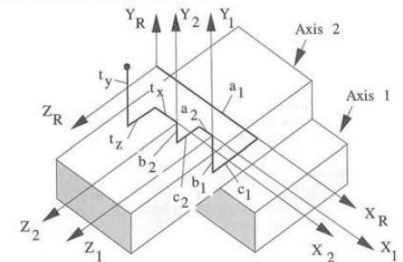


Repetibilidade e acurácia do movimento

- Graus de liberdade dos sistemas de movimentação
- Exatidão de movimento dos eixos coordenados
- Dados de precisão do movimento, matriz de erros

Erros em um eixo de translação e rotação

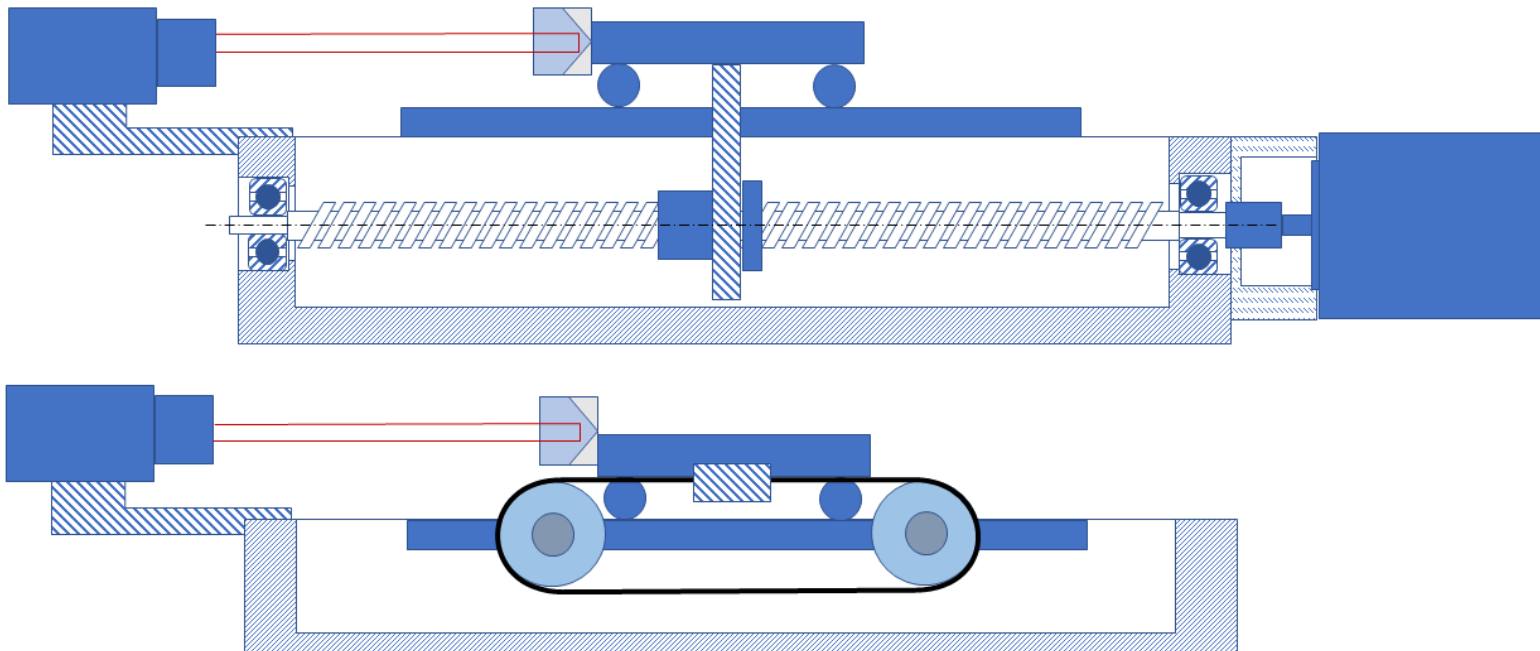
$$R_{T_N} = \prod_{m=1}^N T_m$$





Repetibilidade e acurácia do movimento

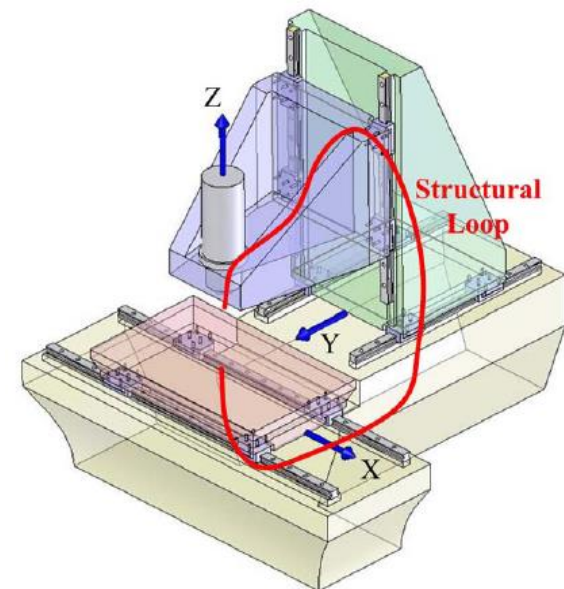
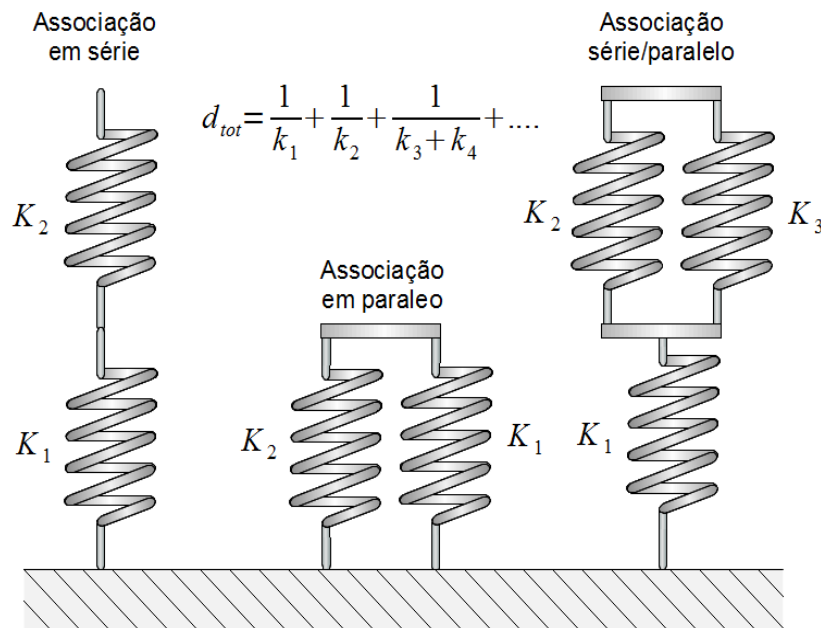
- Erros dos sistemas de medição
- Erros dos sistemas de controle
- Erros dos sistemas de movimentação





Rigidez do looping estrutural

A rigidez do loop em uma máquina UP indica a rigidez equivalente a valores de diferentes elementos da máquina durante a usinagem. Formação de elementos a rigidez do loop em máquinas Tipo A pode ser representada da seguinte forma:

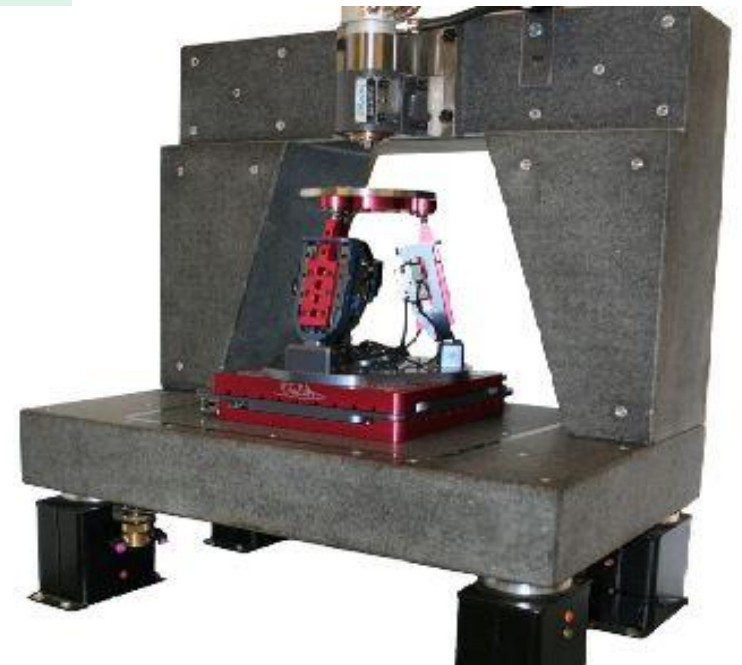
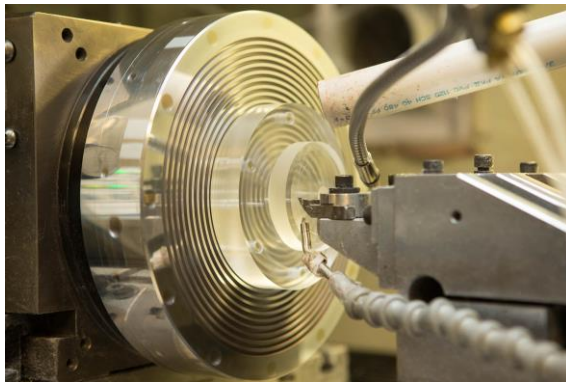




Rigidez do looping estrutural

A força de corte F_c atuando na interface peça/ferramenta equivale a um sistema de excitação de segunda ordem.

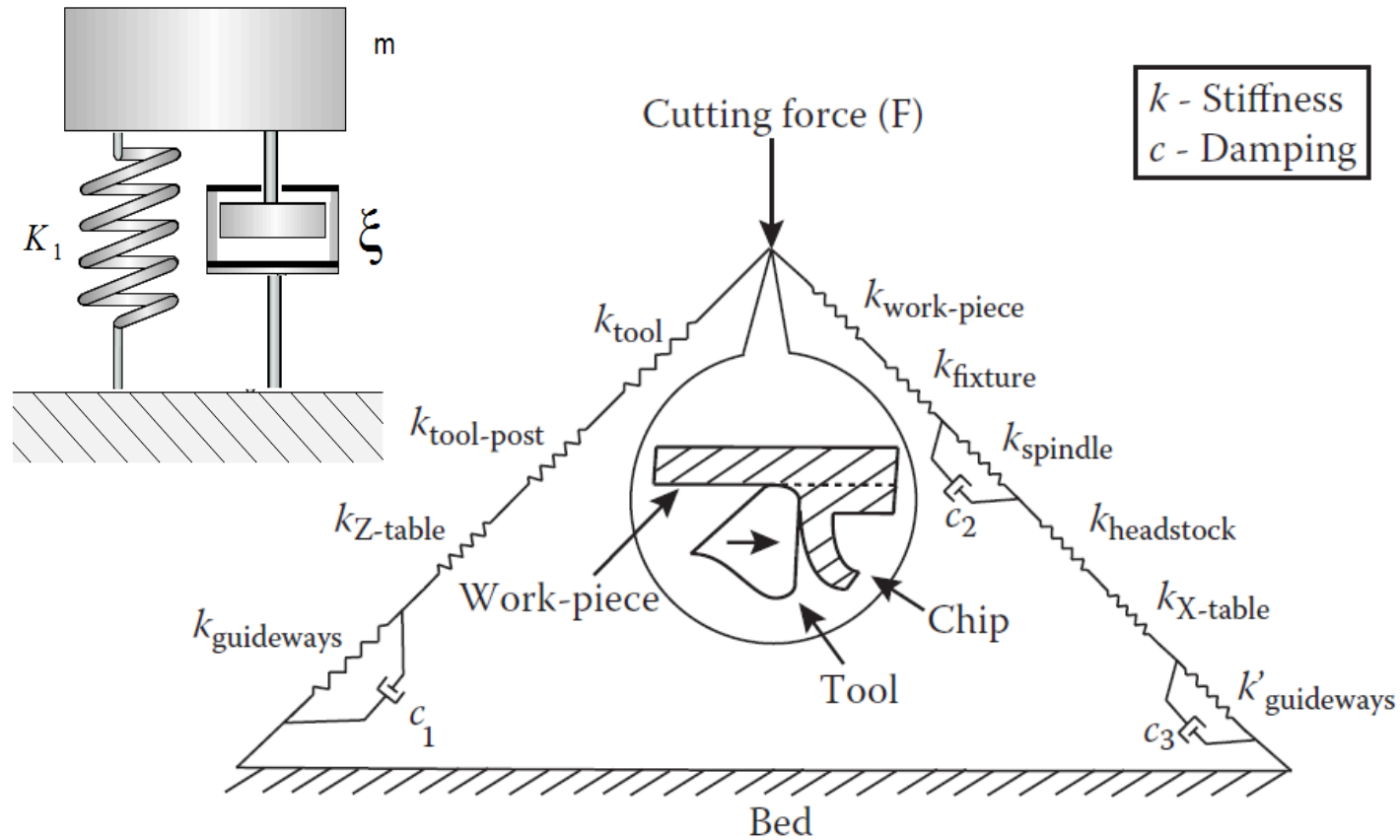
$$F_c(x) = m \ddot{x} + c \dot{x} + k x$$

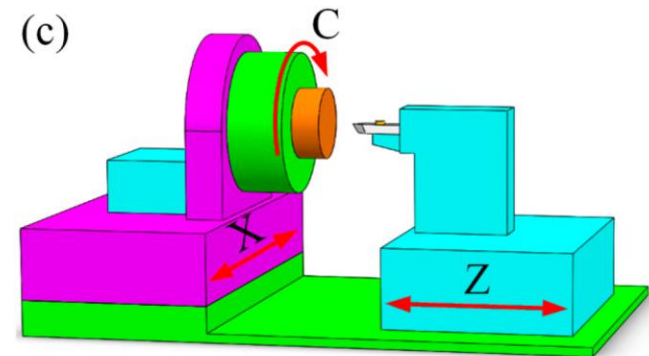
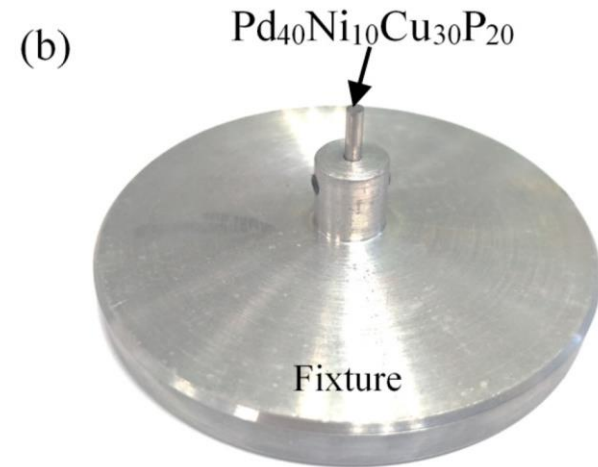
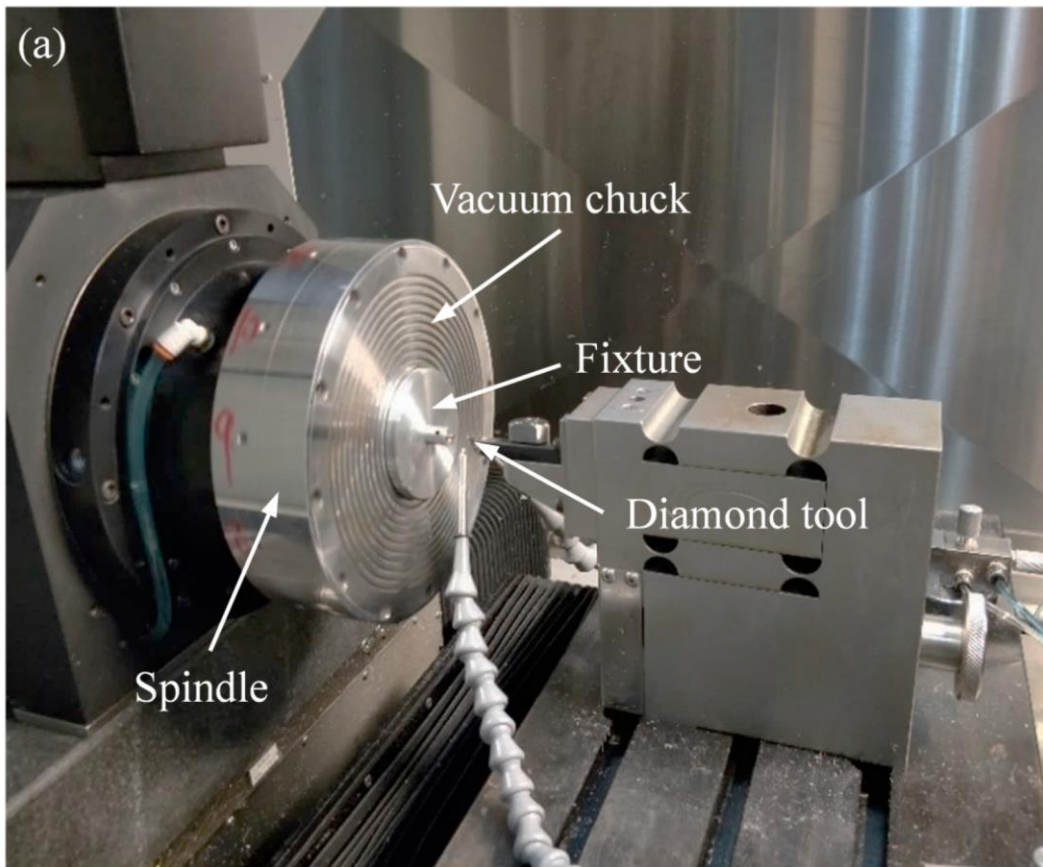




Rigidez do looping estrutural

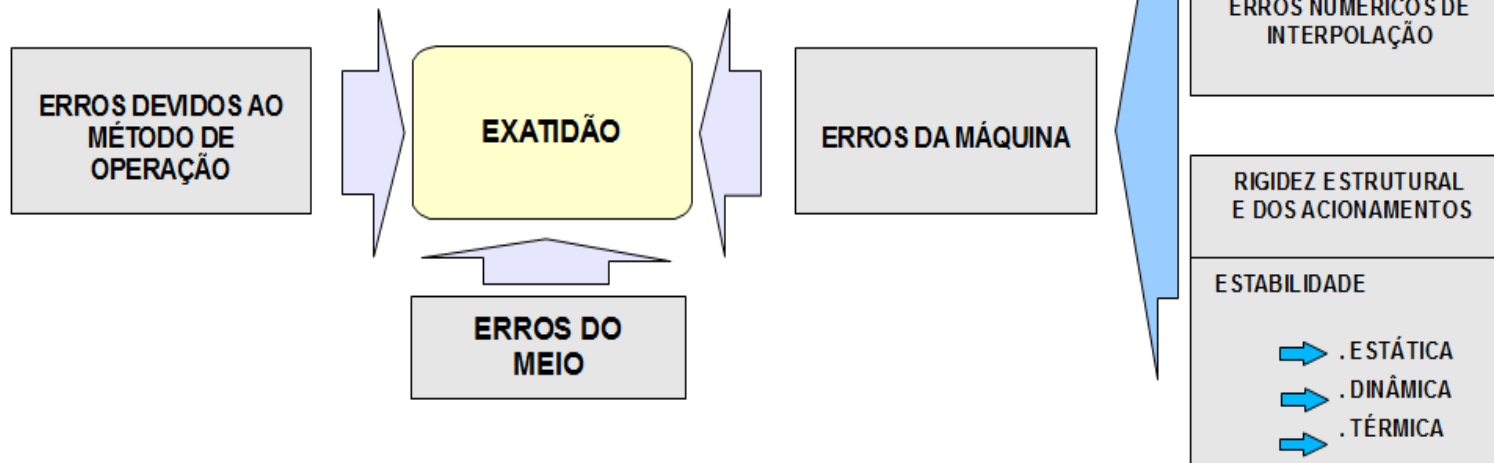
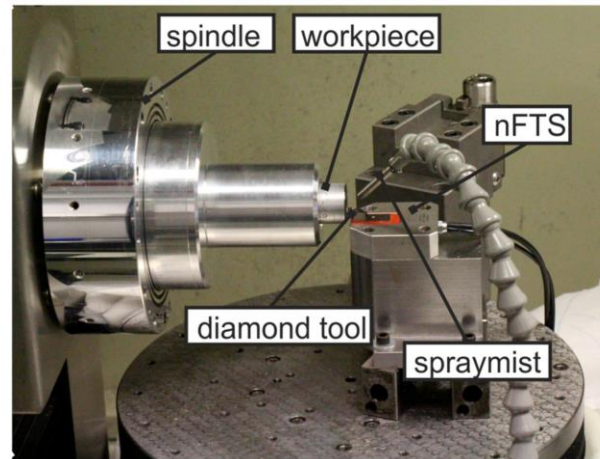
$$F_c(x) = m \ddot{x} + c \dot{x} + k x$$








Estabilidade térmica





Estabilidade térmica

Invar 36

Thermal Properties	Metric
CTE, linear 	1.30 $\mu\text{m}/\text{m}\cdot^\circ\text{C}$ @Temperature 93.0 $^\circ\text{C}$
	4.18 $\mu\text{m}/\text{m}\cdot^\circ\text{C}$ @Temperature 260 $^\circ\text{C}$
	7.60 $\mu\text{m}/\text{m}\cdot^\circ\text{C}$ @Temperature 371 $^\circ\text{C}$
Specific Heat Capacity	0.515 J/g- $^\circ\text{C}$
Thermal Conductivity	10.15 W/m-K
Melting Point	1427 $^\circ\text{C}$
Solidus	1427 $^\circ\text{C}$
Liquidus	1427 $^\circ\text{C}$

Component Elements Properties	Metric
Carbon, C	0.020 %
Iron, Fe	63.0 %
Manganese, Mn	0.35 %
Nickel, Ni	36.0 %
Silicon, Si	0.20 %

Ferro Fundido

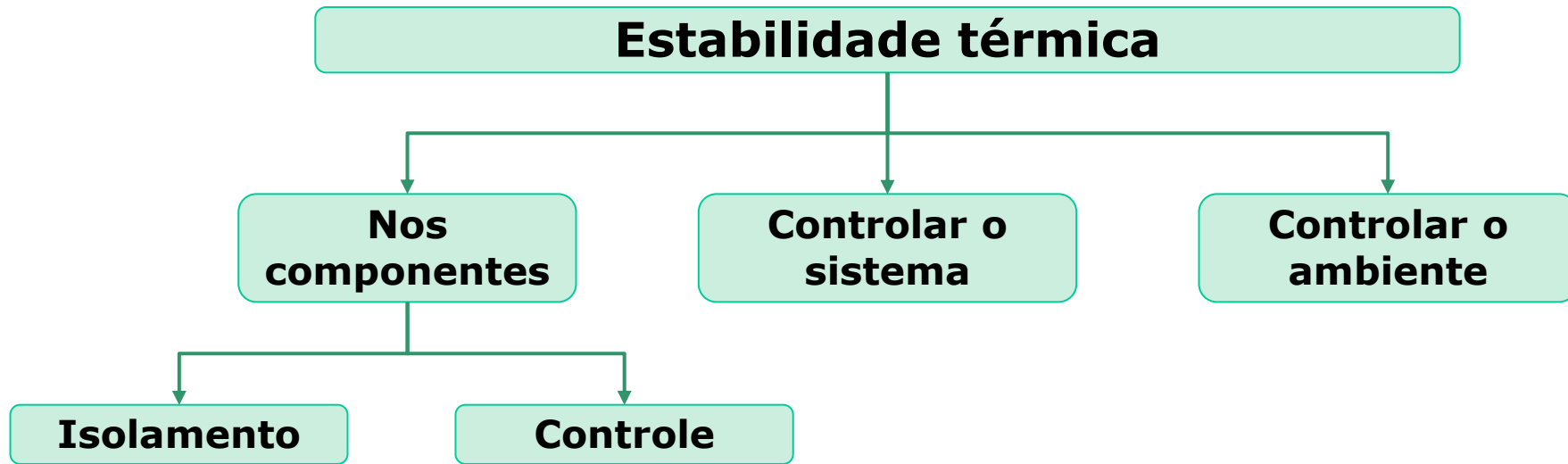
Thermal Properties	Metric
CTE, linear	7.75 - 19.3 $\mu\text{m}/\text{m}\cdot^\circ\text{C}$
Specific Heat Capacity	0.506 J/g- $^\circ\text{C}$
Thermal Conductivity	11.3 - 53.3 W/m-K
Melting Point	1120 - 2220 $^\circ\text{C}$
Maximum Service Temperature, Air	649 - 982 $^\circ\text{C}$
Minimum Service Temperature, Air	-59.4 - -30.0 $^\circ\text{C}$
Shrinkage	0.800 - 1.50 %

Granitos

Thermal Properties	Metric
CTE, linear	3.70 - 11.0 $\mu\text{m}/\text{m}\cdot^\circ\text{C}$ @Temperature 20.0 $^\circ\text{C}$
Specific Heat Capacity	0.210 - 0.350 J/g- $^\circ\text{C}$
Thermal Conductivity	1.20 - 4.20 W/m-K

Physical Properties	Metric
Density	2.54 - 2.66 g/cc
Moisture Expansion	0.00500 %
Porosity	0.100 - 4.00 %
Permeability	1.00e-9 - 1.00e-6

Mechanical Properties	Metric
Hardness, Shore H	85.0 - 100
Hardness, Mohs	5.00 - 7.00
Abrasive Hardness	37.0 - 88.0
Tensile Strength, Ultimate	7.00 - 25.0 MPa
Modulus of Elasticity	20.0 - 60.0 GPa
Modulus of Rupture	0.00900 - 0.0379 GPa
Transverse Strength	9.00 - 38.0 MPa
Compressive Strength	96.5 - 310 MPa
Impact Toughness	2.76 - 11.0 cm/cm^2





Estabilidade dinâmica

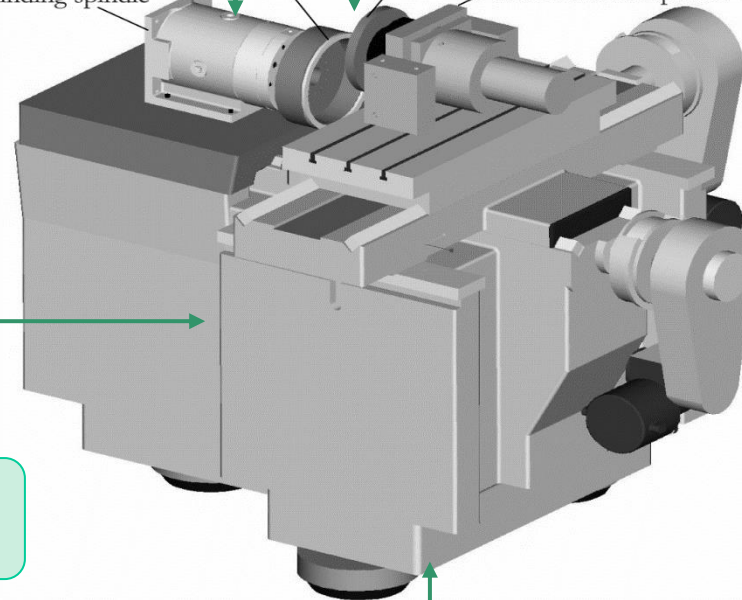
Spindle

**Interface
peça/ferramenta**

grinding spindle wheel workpiece Instrumented Spindle

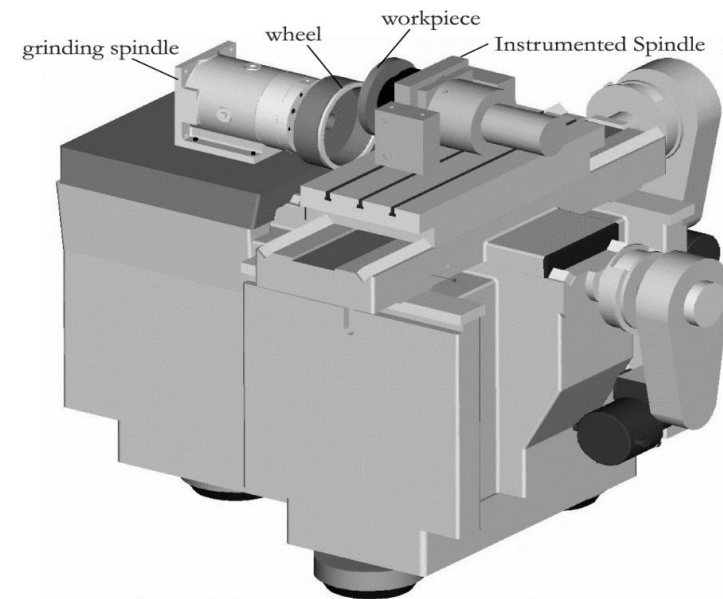
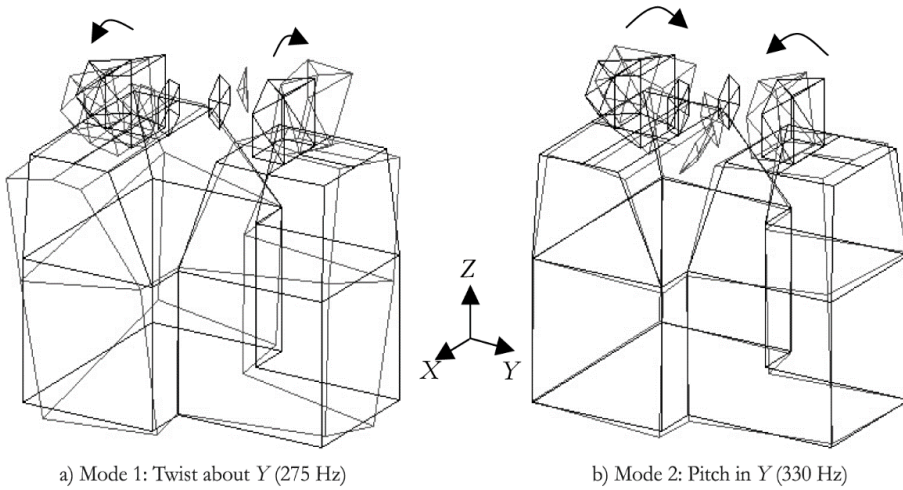
Frequências naturais

Vibrações do meio

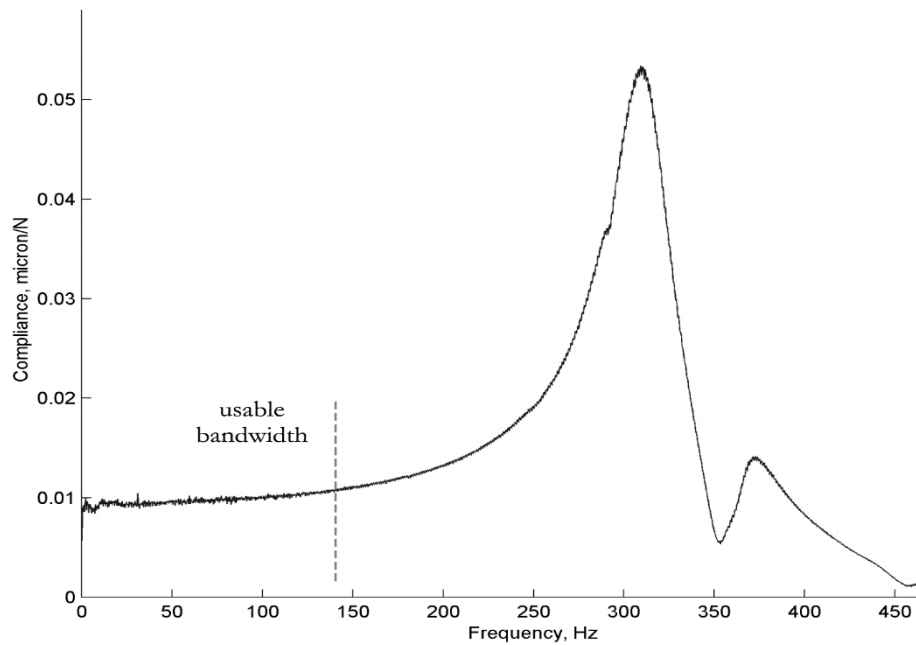




Estabilidade dinâmica

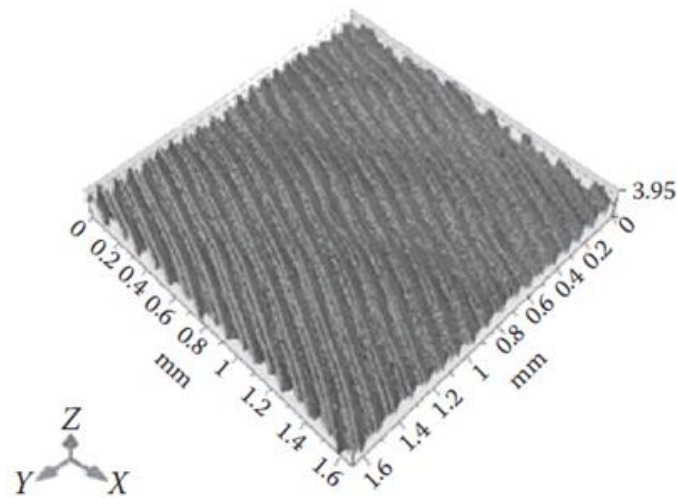


Note: Since the infeed is in the Y direction, Mode 2 is the most influential

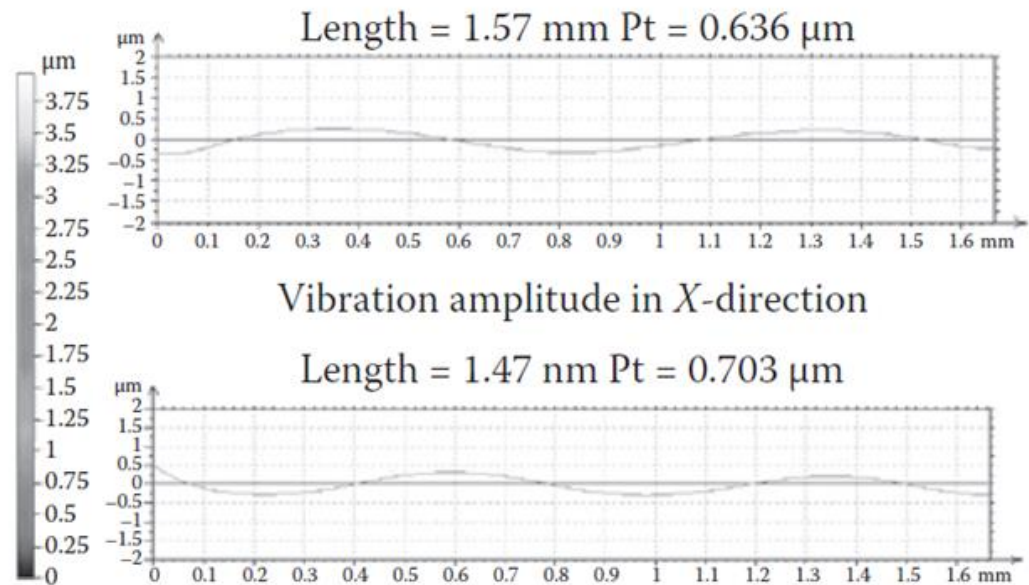




Estabilidade dinâmica



Vibration on
machined surface



Effect of vibration on the machined surface.



Componentes de uma máquina UP

Important Functional Elements and Components of a Diamond Turn Machine

	Functional Elements	Components
1	Structure and bed	Machine frame Enclosure
2	Positioning	Table and guide-ways Headstock and spindle Motor and drive elements Tool post and tool In-situ tool measurement
3	Control unit	Controller
4	Sensing	Linear scales and rotary encoder Hall sensor Velocity and acceleration sensors Closed loop feed back
5	Cooling	Spindle cooling Coolant for machining
6	Peripheral	Pneumatic, hydraulic and electrical devices
7	Special devices	Slow tool servo system Fast tool servo system



Tecnologias empregadas em uma máquina UP

	Component/Subassembly	Technology
1	Ground-machine interface	Vibration isolator
2	Bed	Synthetic granite
3	Guide-ways	Hydrostatic bearing
4	Spindle	Aerostatic bearing
5	Tool post	Flexural mechanism
6	Compensation of slide errors and non-symmetric features	Slow tool servo [16] Fast tool servo
7	Tool position measurement	Optical/LVDT
8	Fixture	Vacuum chuck
9	Coolant	Mist
10	Spindle temperature stabilisation	Water cooling
11	Scale (table positioning)	Linear scale
12	Spindle drive	Integral brushless motor
13	Table drives	AC linear motors
14	Spindle position monitoring	Halls sensor
15	Environment	Clean room with temperature and humidity control



Requisitos ambientais em uma máquina UP

As condições ambientais afetam gravemente a precisão, desempenho e vida útil da máquina. As máquinas de UP são muito sensíveis para o seguinte condições ambientais

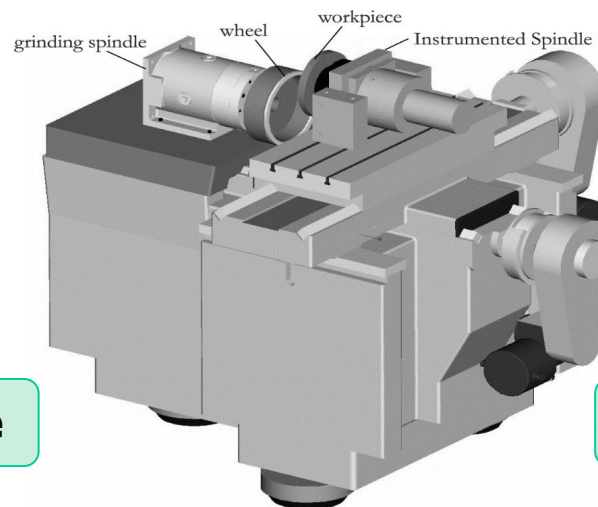
Temperatura

Umidade

Pó

Frequências de rede

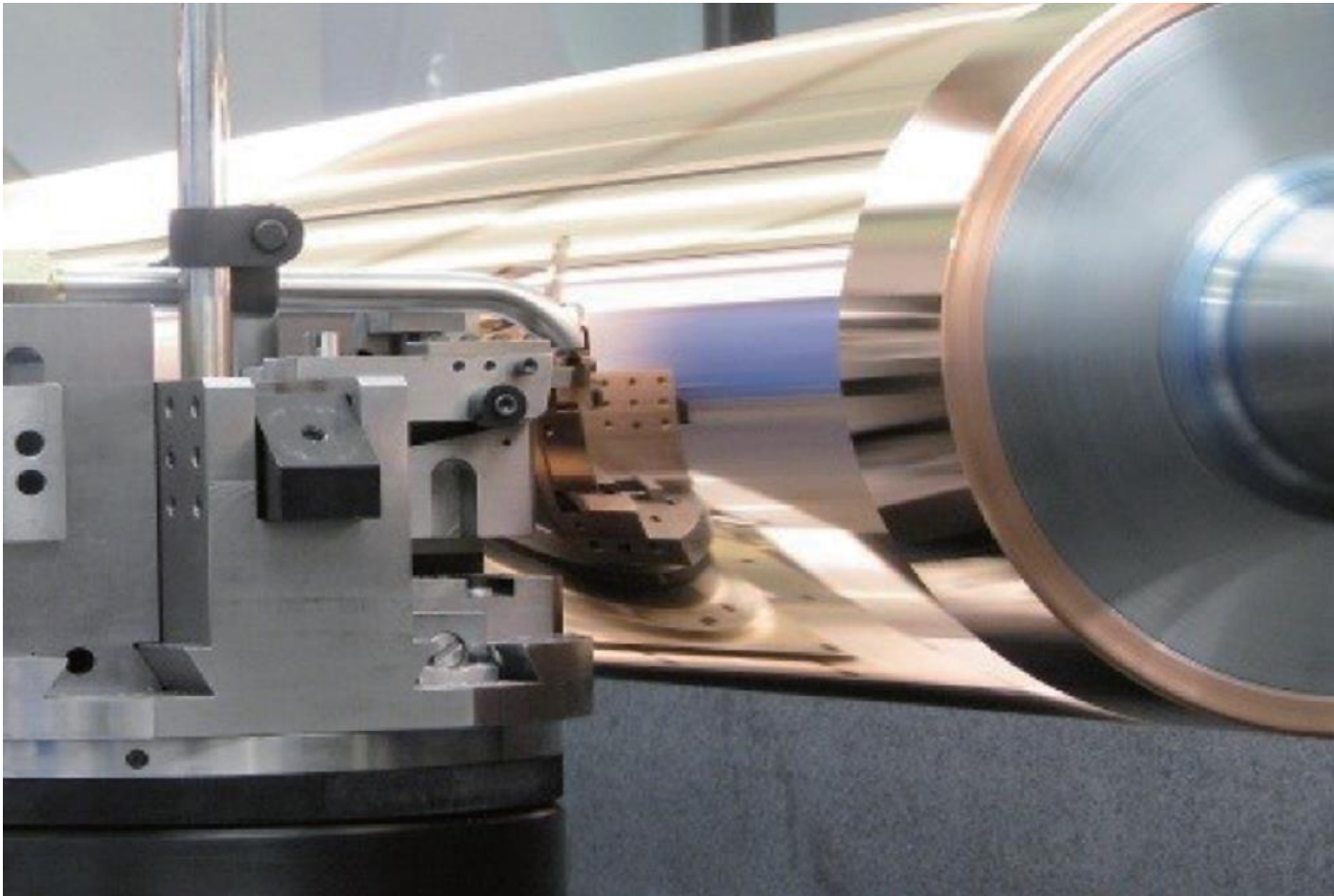
Vibrações do ar



Vibrações do solo



ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO





<https://www.youtube.com/watch?v=YYcBKW-MMbl>

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

https://www.youtube.com/watch?v=6iRohl_jaYg

https://www.youtube.com/watch?v=fML6VN88U_M



ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO





Estruturas

Introdução

As estruturas de sistemas de precisão, também denominadas erroneamente de bases, tem por função servir de referência de montagem para todos os demais sistemas constituintes (guias, mancais, sensores, acionamentos, sistemas de medição e controle, etc.)



Considerações orientadas ao projeto de precisão

Para atingir alta precisão quatro requisitos funcionais básicos devem ser alcançados:

1. O sistema deve possuir um referência cinemática perfeita
2. O sistema deve possuir um conjunto cinemático perfeito
3. Deve ser construído de tal forma a ser imunes aos ruídos (internos e externos)
4. Deve ser capaz de detectar o movimento com exatidão



Estruturas



Materiais Estruturais

Requisitos

- resistência mecânica
- elasticidade
- estabilidade mecânica
- estabilidade térmica
- estabilidade química
- capacidade de amortecimento de vibrações
- fabricabilidade
- acessibilidade-disponibilidade
- custo



Considerações orientadas ao projeto de precisão

1 - Análise de projeto não é síntese de projeto

Uma grande quantidade de análises não vai mudar um projeto ruim. O resultado da análise de um projeto ruim será um projeto ruim otimizado.

2 – Especificações e requisitos de projeto

Especificações e requisitos de projeto devem ser feitos, quando possível de forma quantitativa, e se manterem o mais desacoplados possível.

3 – Simetria

A simetria no projeto, principalmente estrutural, sempre é benéfica, melhora o desempenho e simplifica as análises estática, dinâmica e térmica.



Considerações orientadas ao projeto de precisão

4 – Evite a ação de momentos

Momentos são amplificadores de tensões e deformações. Momentos geralmente são as principais fontes de erros por deformações

5 - Loopings

Loops, principalmente nas estruturas, permitem um fluxo de forças melhor distribuídos e contribuem para a simetria.

6 – Compensação

Erros de todas as origens podem ser compensados dentro de limites



Considerações orientadas ao projeto de precisão

7 – Rigidez

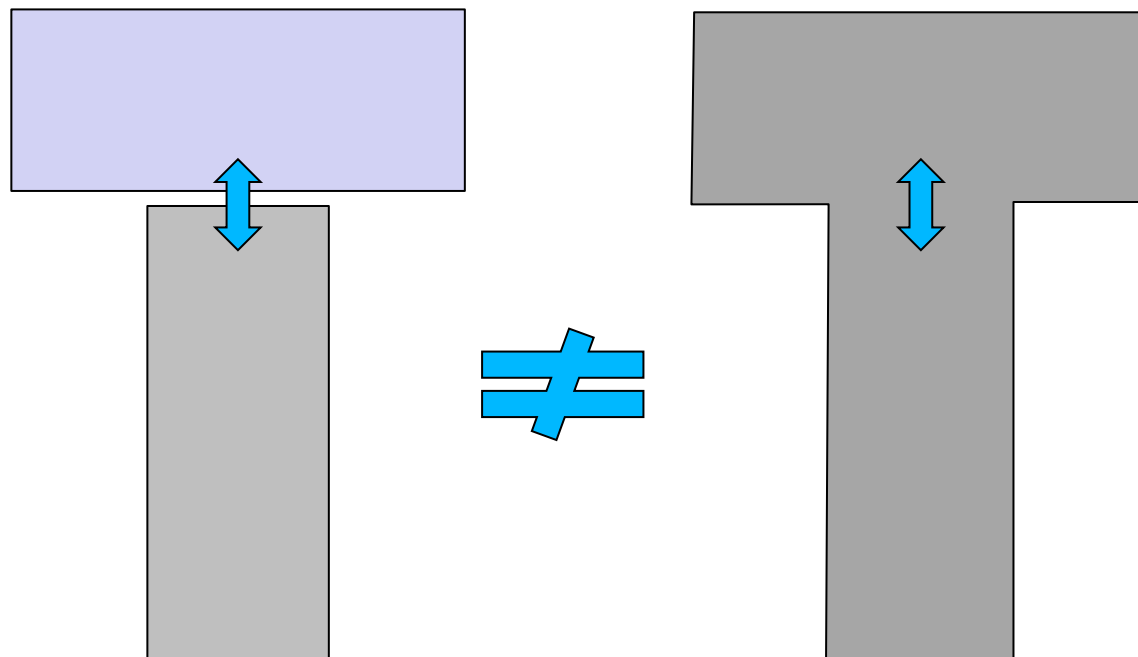
A rigidez permite medir de forma direta a capacidade de um sistema de precisão em manter sua precisão enquanto realiza um movimento (aceleração/desaceleração) ou trabalho mecânico. A rigidez é importante quando o loop estrutural e metrológico coincidem. O requisito de rigidez estrutural resulta na diminuição das tensões nos componentes do loop, o que permite muitas vezes desprezar as tensões.



Considerações orientadas ao projeto de precisão

8 – Controle nulo

9 – Separação de erros / desacoplamento





Considerações orientadas ao projeto de precisão

9 – Separação de erros / desacoplamento

Exemplo do LODTM

- Radial
 - 28 nm (280Å)
- Surface finish
 - 4.3 nm (42Å)
- Analogy

280Å is ~ 3500 times smaller than diameter of human hair



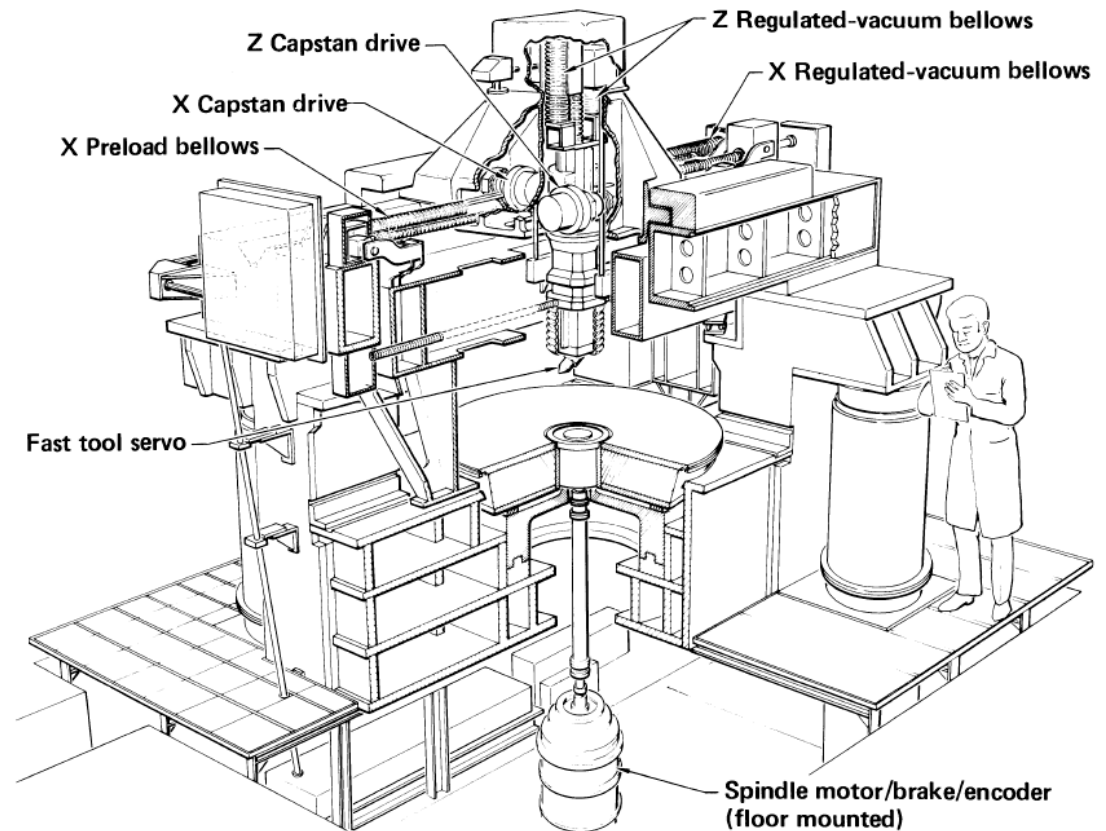


Considerações orientadas ao projeto de precisão

9 – Separação de erros / desacoplamento

Exemplo do LODTM

- Estrutura cinemática
- Estrutura metrológica
- Mesa rotativa
- *Fast tool servo* – porta ferramentas, com seu próprio sistema de medição

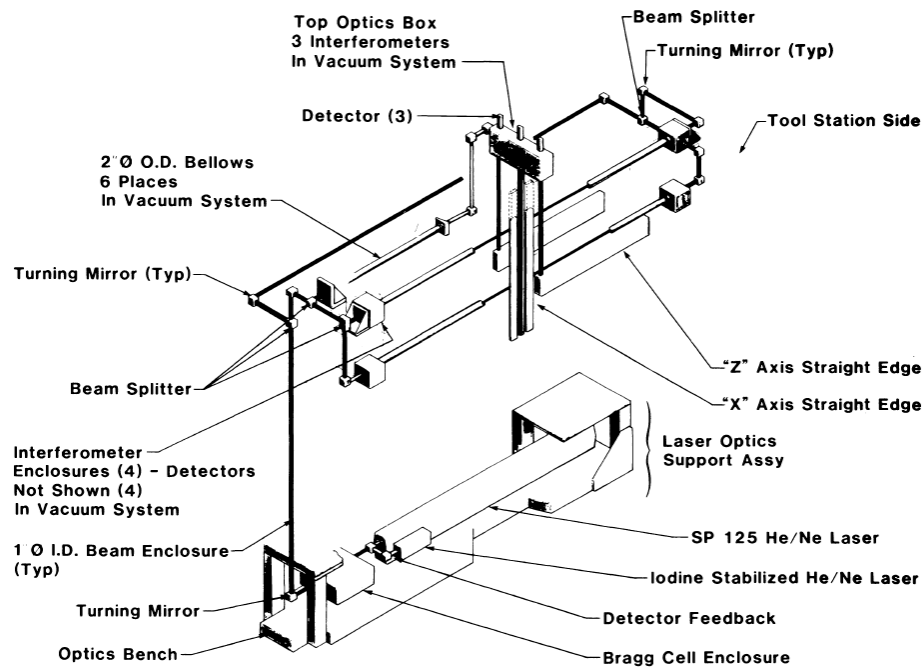




Considerações orientadas ao projeto de precisão

9 – Separação de erros / desacoplamento

Exemplo do LODTM



- Estrutura metrológica



Considerações orientadas ao projeto de precisão

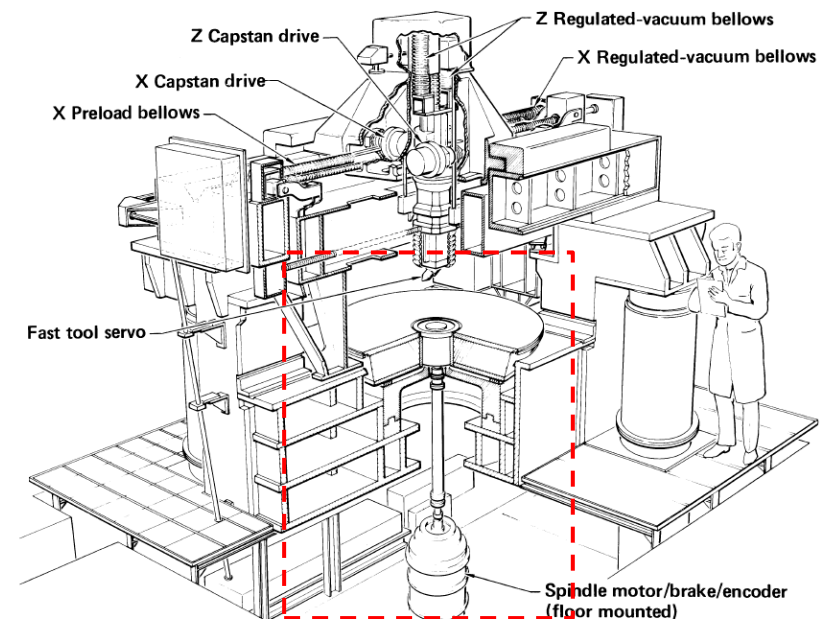
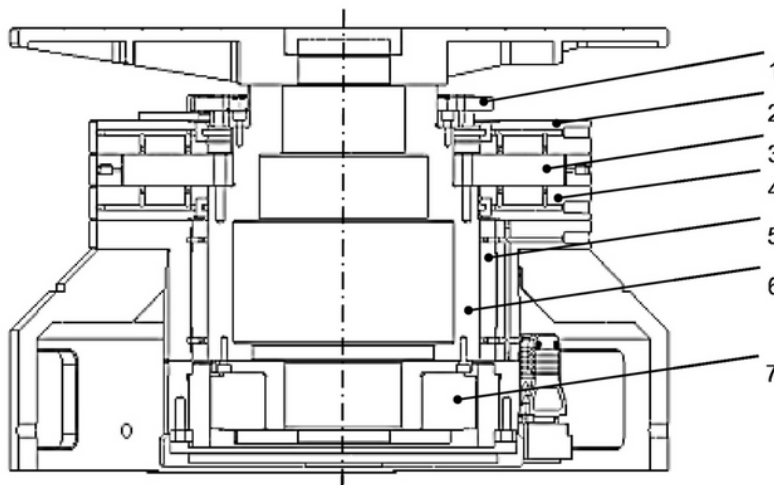
9 – Separação de erros / desacoplamento

Exemplo do LODTM

1. High rigidity and ultra-precision air hydrostatic bearing spindle;
2. Integrated frictionless direct drive motor drive;
3. Integrated high-precision circular grating corner position detection;
4. High-speed response servo control.



The structure of aerostatic rotary table





Considerações orientadas ao projeto de precisão

10 – Auto correção / auto calibração

11 – Projeto cinemático

12 – Projeto orientado a deformação

13 – Pseudoprojeto cinemático

14 – Projeto orientado a plasticidade

15 – Princípio da simplicidade

16 – Erros de Abbe e erros de seno

17 – Projeto invertido

18 – Teste e verificação

19 – Princípio de Ockhan

20 – dissipação de energia



Estruturas

MiQA System

MICROSCOPY, TOMOGRAPHY, LAMINOGRAPHY



Estruturas

As estruturas

→ devem proporcionar uma referência cinemática perfeita

→ devem proporcionar um conjunto cinemático perfeito

→ devem proporcionar uma construção imune aos ruídos

→ devem ser capazes de detectar o movimento com exatidão

São o primeiro passo para a obtenção de alta precisão

Devem ser projetadas orientadas a cinemática e a precisão

Variações térmicas devem ser consideradas

Deformações devem ser consideradas



Estruturas

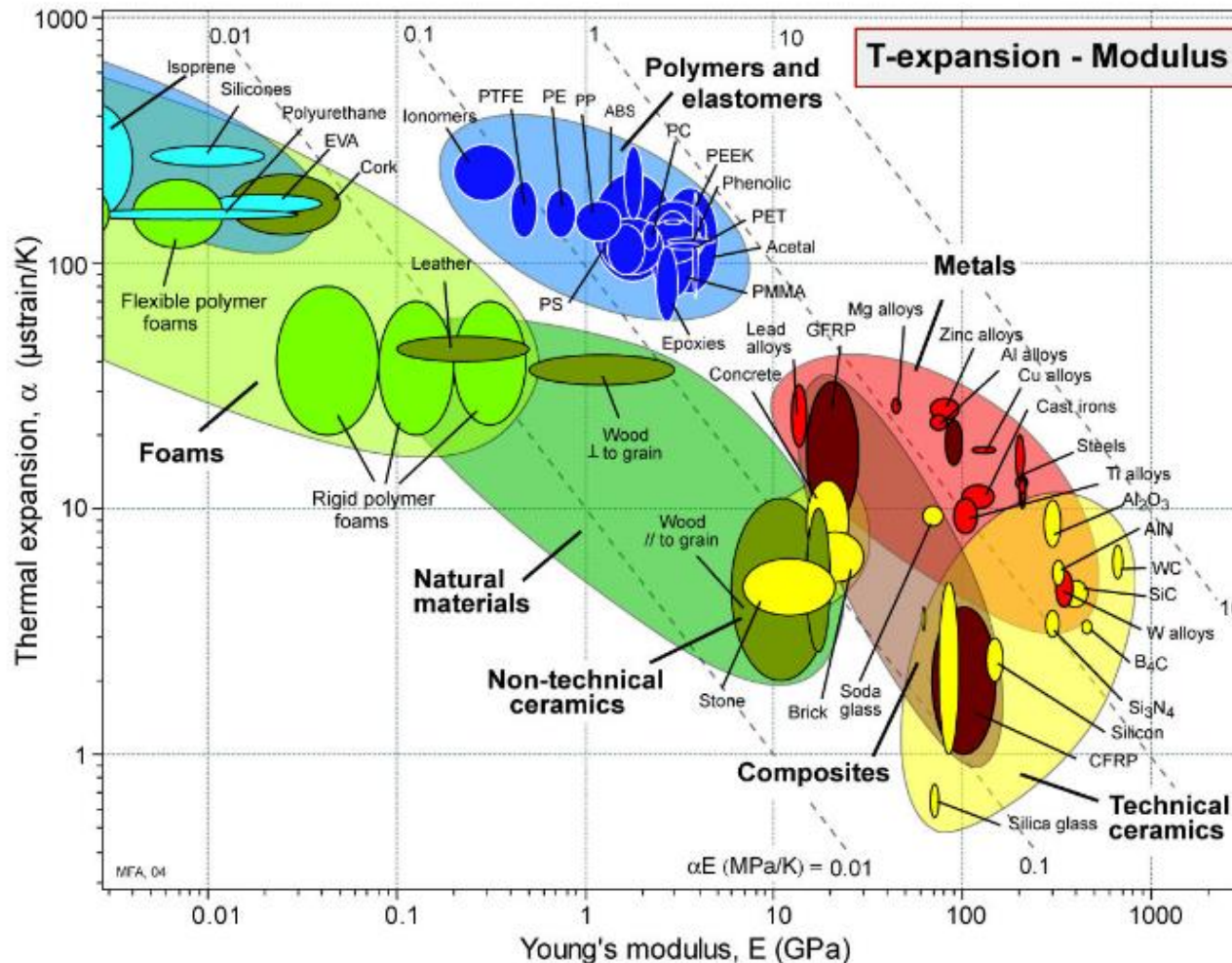
Requisitos

- rigidez estática
- rigidez dinâmica
- estabilidade térmica
- estabilidade química
- facilidade de manipulação
- estabilidade dimensional
- tolerâncias dimensionais
- tolerâncias geométricas



Estruturas

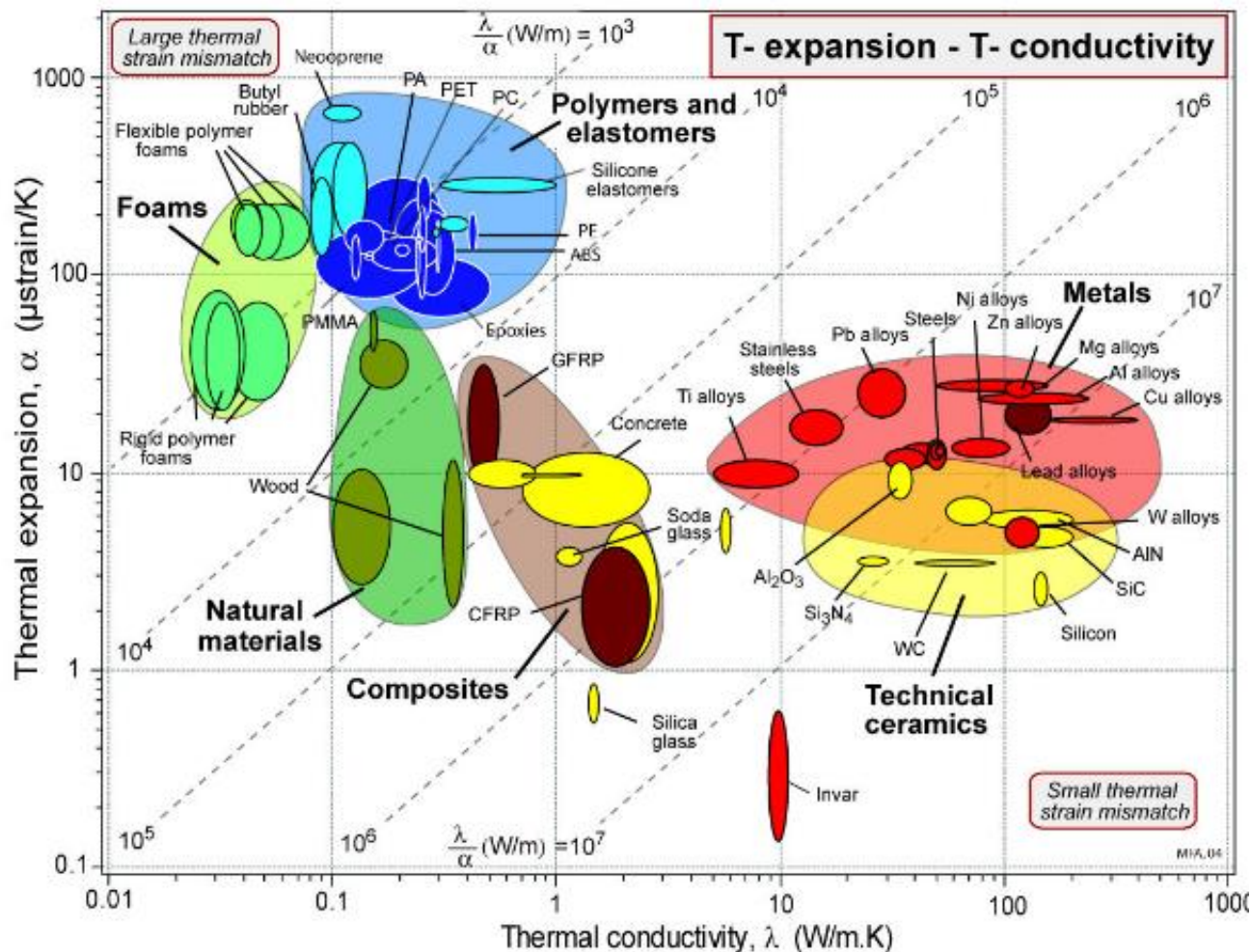
Considerações térmicas





Estruturas

Considerações térmicas

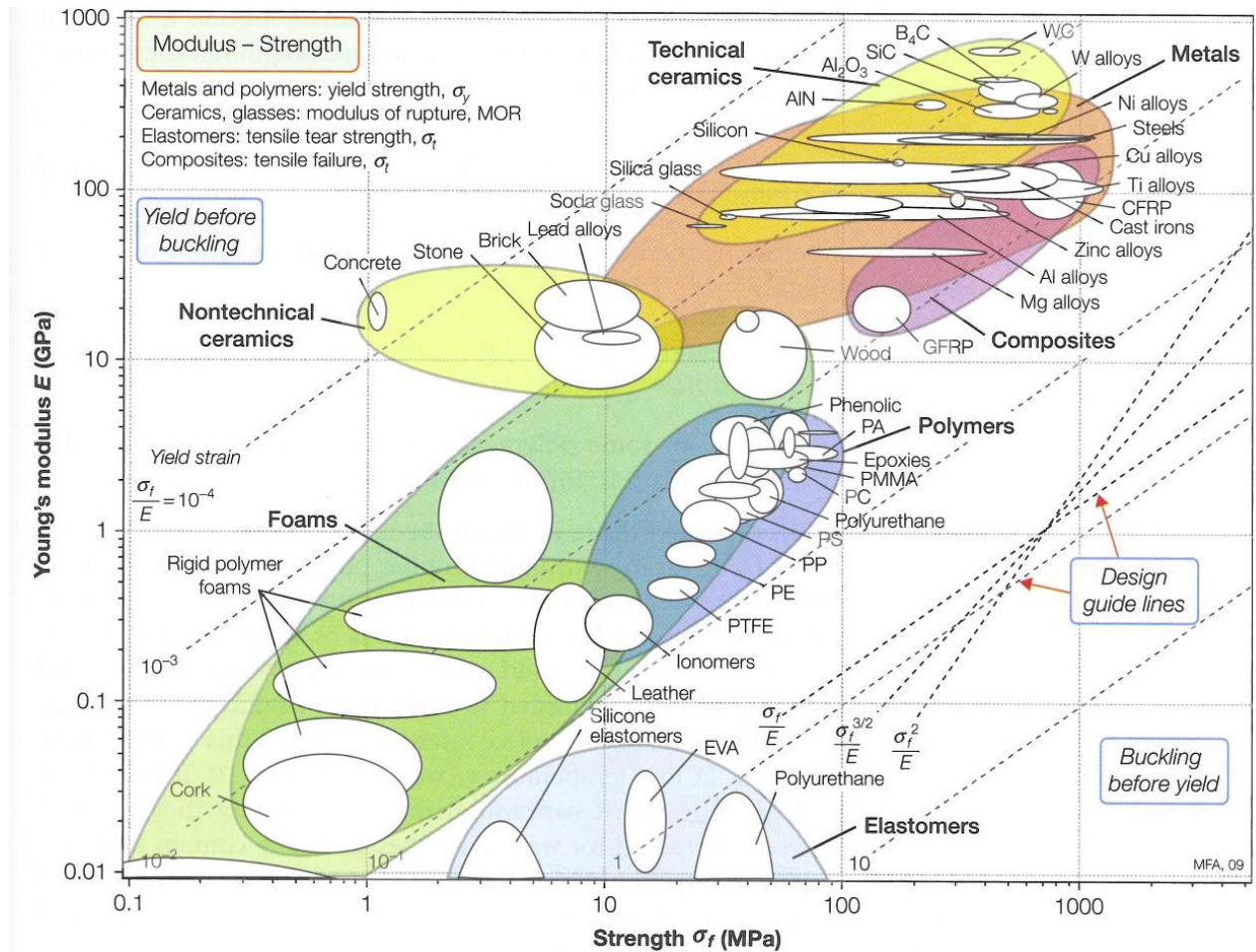
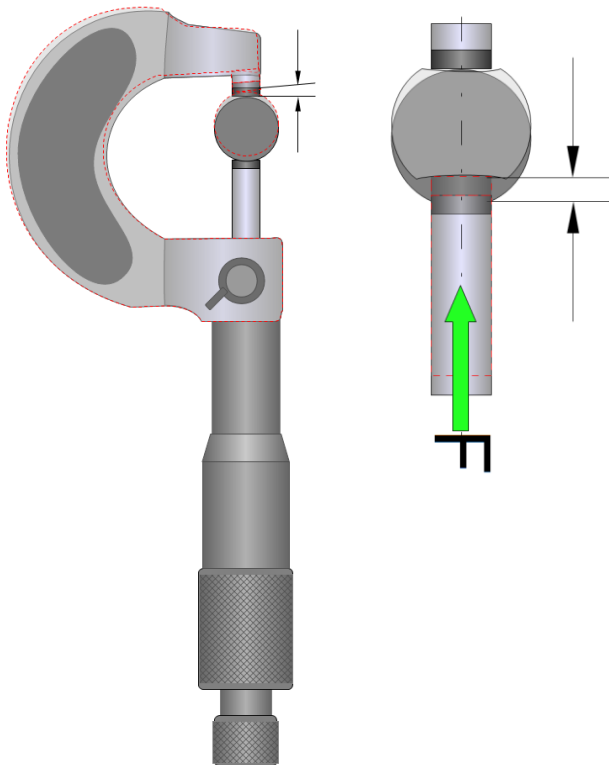




Estruturas

Considerações de deformação

Efeito macro

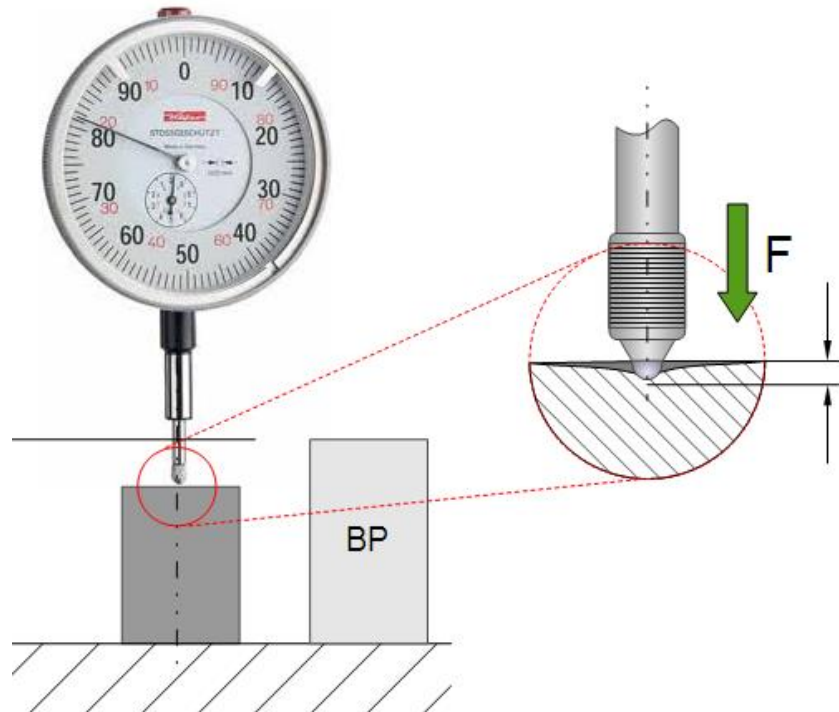




Estruturas

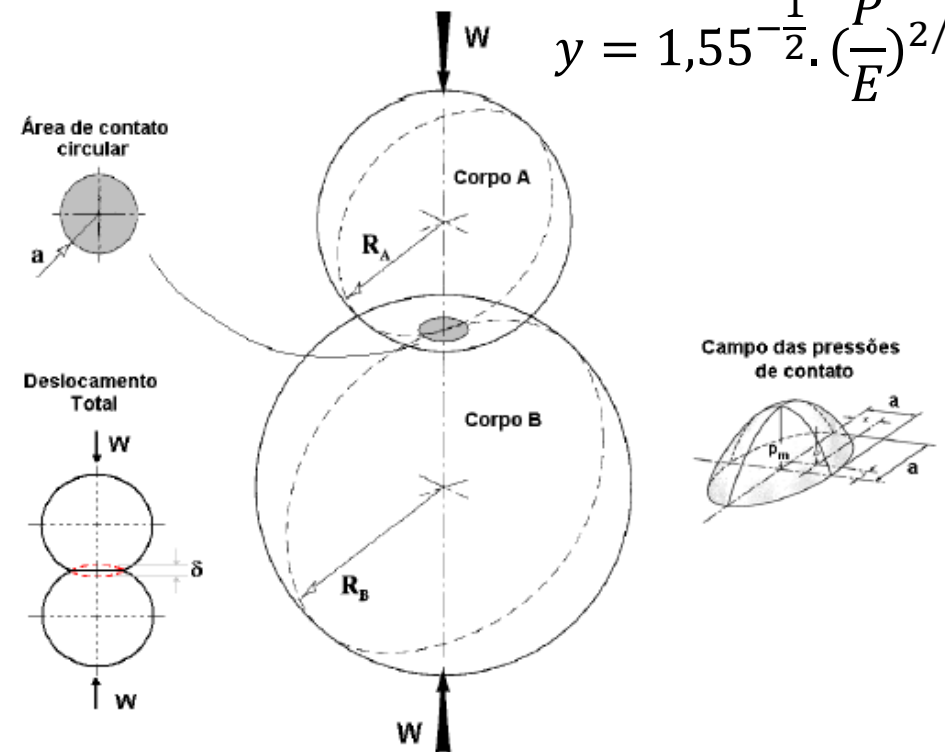
Considerações de deformação

Efeito micro



Contatos hertzinaos

$$y = 1,55^{-\frac{1}{2}} \cdot \left(\frac{P}{E}\right)^{2/3}$$



Geometria genérica do contato entre dois sólidos esféricos. Fonte: adaptado de (STACHOWIAK; BATCHELOR, 2005).

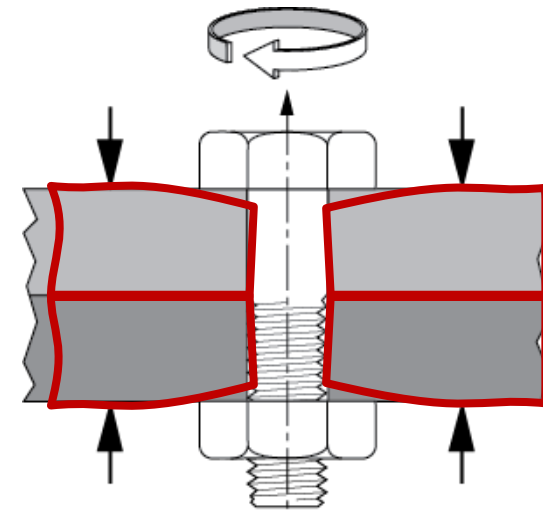


Estruturas

Considerações de deformação

A origem dessas deformações são principalmente decorrentes do:

- peso das partes móveis
 - peso das peças de trabalho
 - forças de processo
 - gradientes térmicos
 - campos magnéticos
- Secundariamente ainda podemos encontrar deformações oriundas de montagens errôneas, torques excessivos em parafusos, nivelamento incorreto, entre outras.





Estruturas

Considerações de rigidez

No projeto da estrutura em sistemas de precisão o requisito rigidez é muito mais importante do que os requisitos de capacidade de carga e de esforços a serem absorvidos.

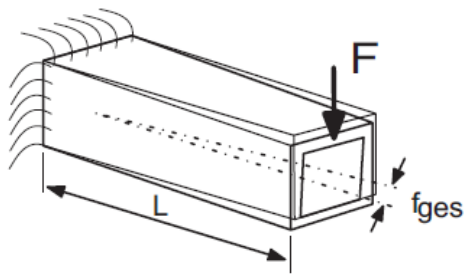
Os esforços de processos, como por exemplo: forças de medição e forças de usinagem (em usinagem UP em geral são inferiores a 5N), insuficientes para produzirem deformações estruturais significativas



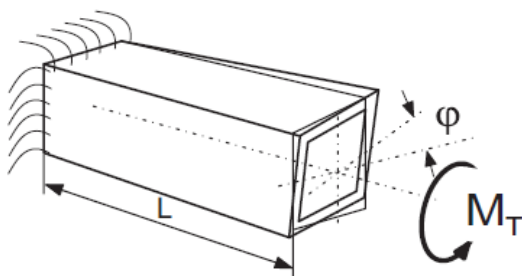
Estruturas

Considerações de rigidez

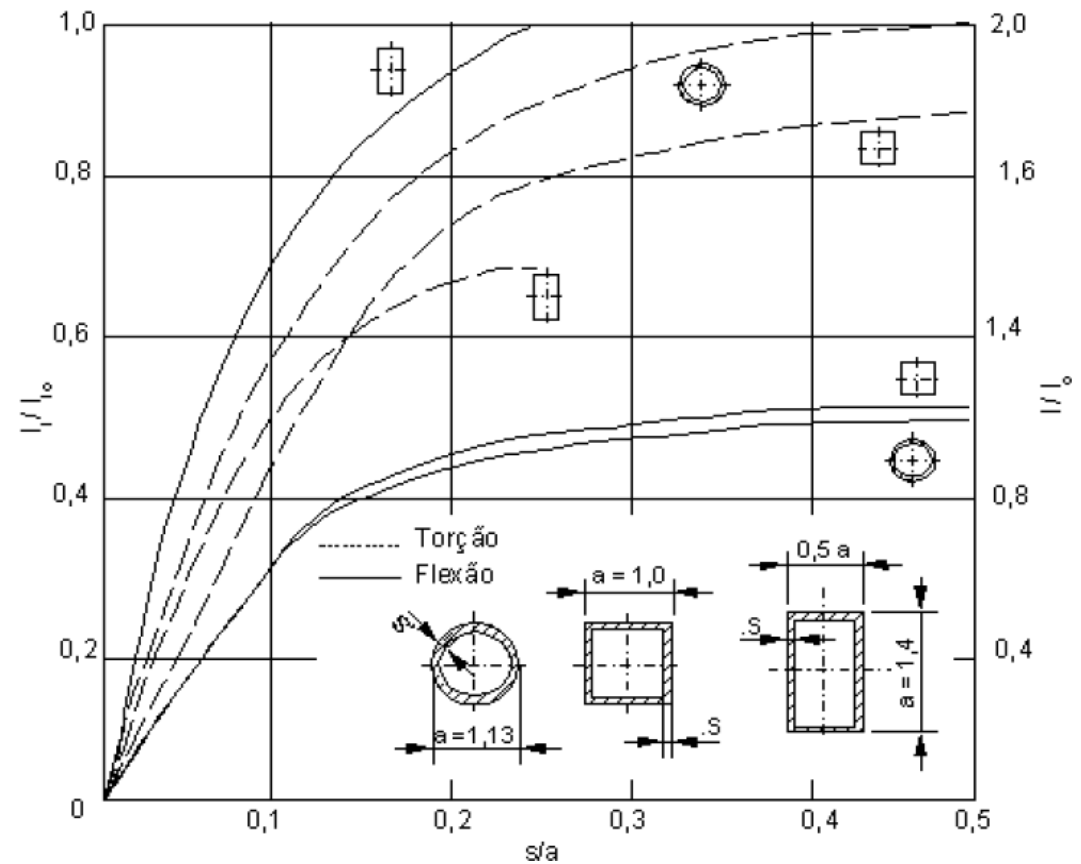
Momento de inercia estrutural de Torção e Flexão para perfiz



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



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

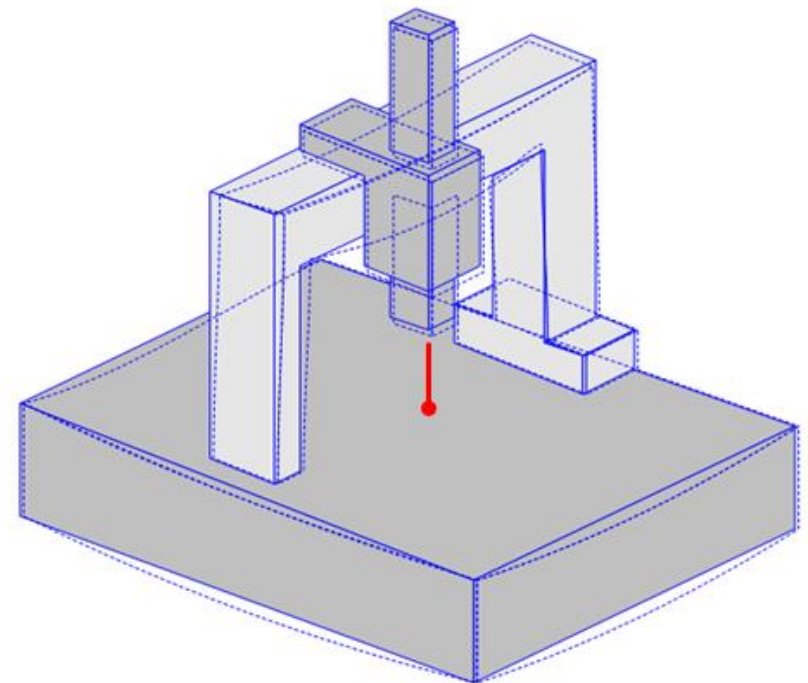
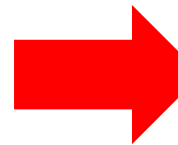
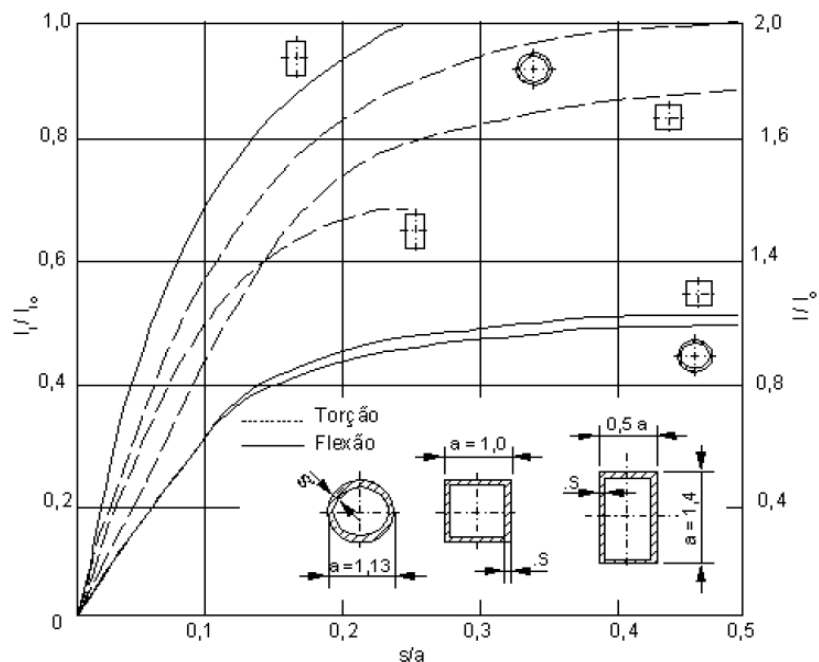




Estruturas

Considerações de rigidez

A combinação entre um material com alto módulo de elasticidade e uma grande seção transversal, com elevado momento de inércia deve ser perfeita

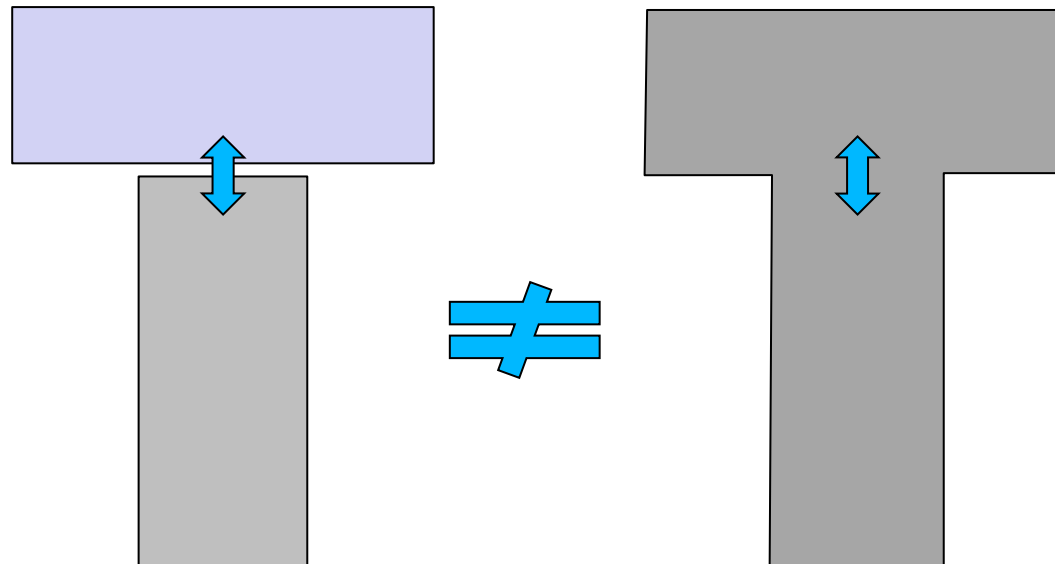




Estruturas

Considerações de rigidez

- Se peso for adicionado aos requisitos então uma solução de compromisso deve ser alcançada.
- Diferentes aplicações e diferentes requisitos tem custos diferentes

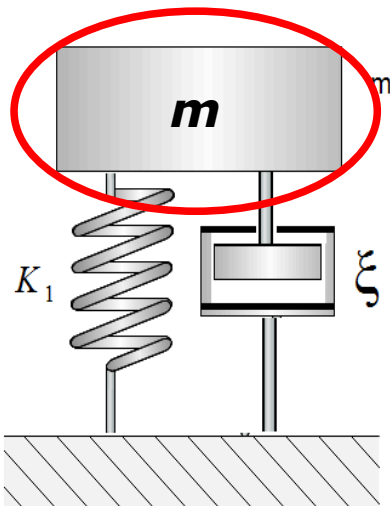




Estruturas

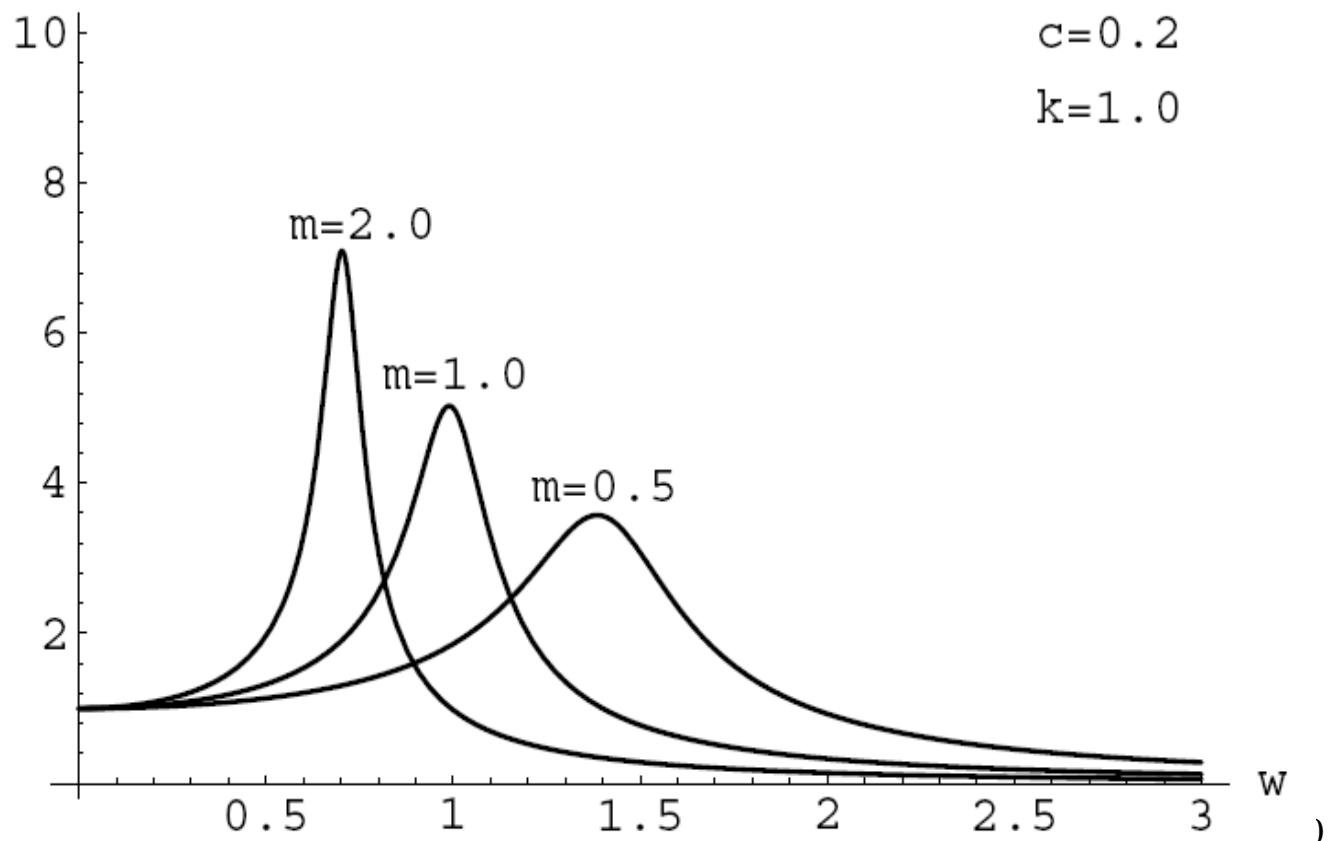
Considerações dinâmicas

Efeito da massa



$$\omega_c = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

$H(\omega)$

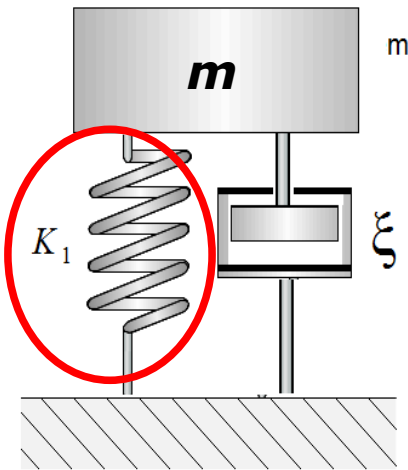




Estruturas

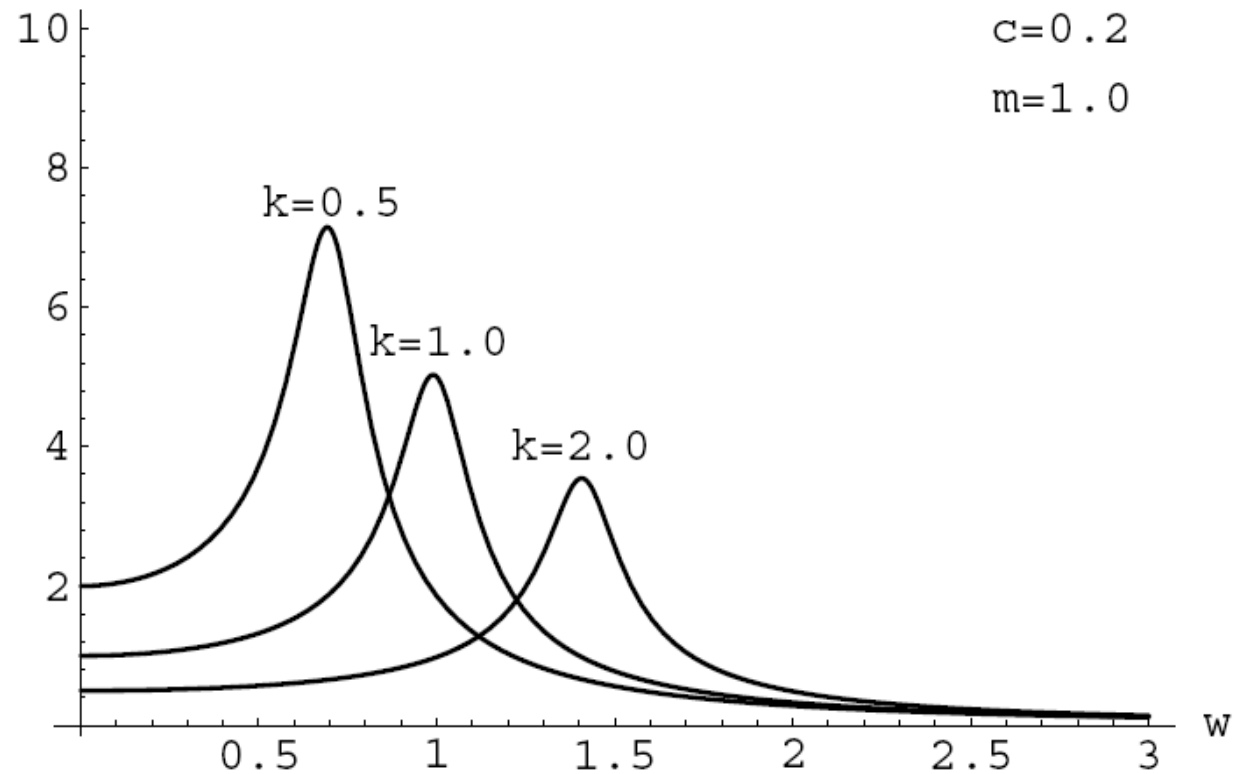
Considerações dinâmicas

Efeito da rigidez



$$\omega_c = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

$H(\omega)$

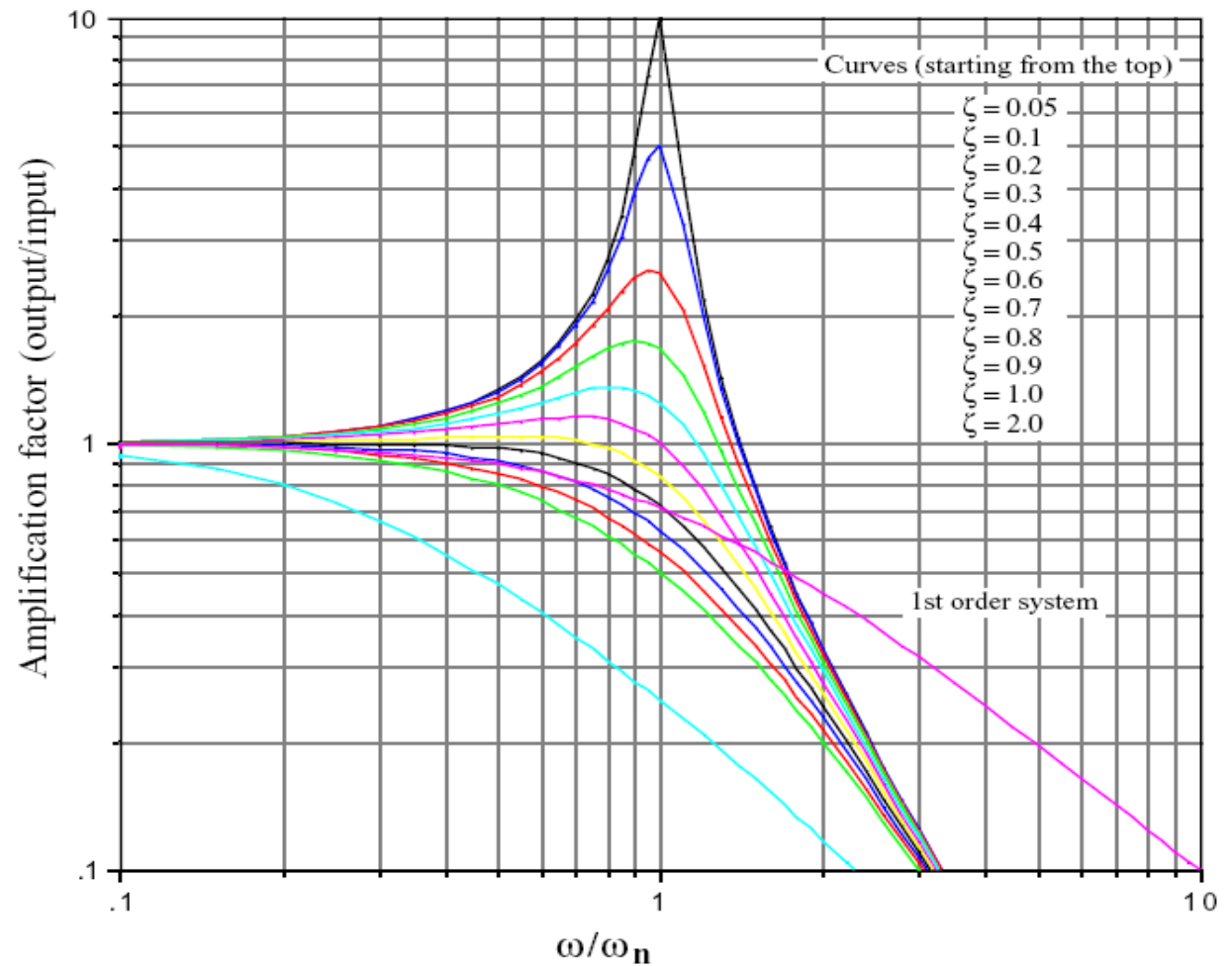
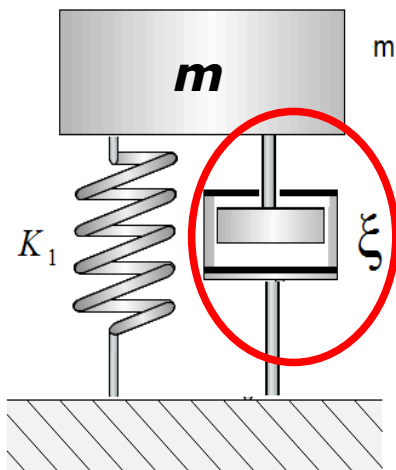




Estruturas

Considerações dinâmicas

Efeito do amortecimento

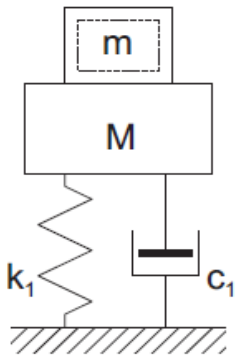




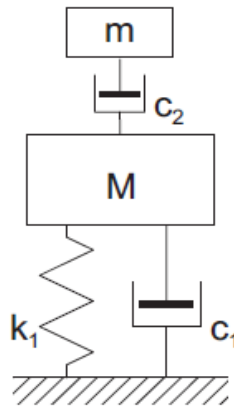
Estruturas

Considerações dinâmicas

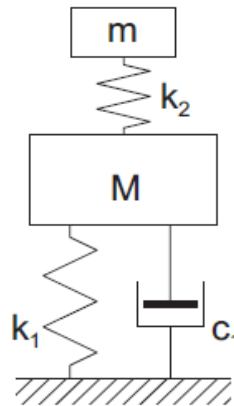
Impact-Dämpfer



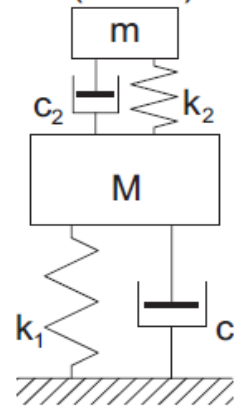
Lanchester-Dämpfer



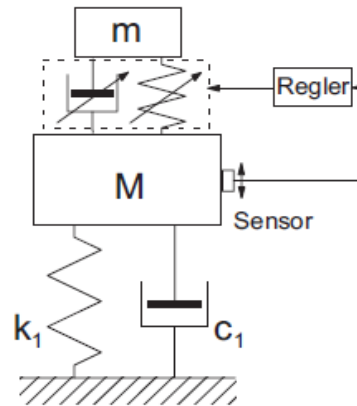
Tilger



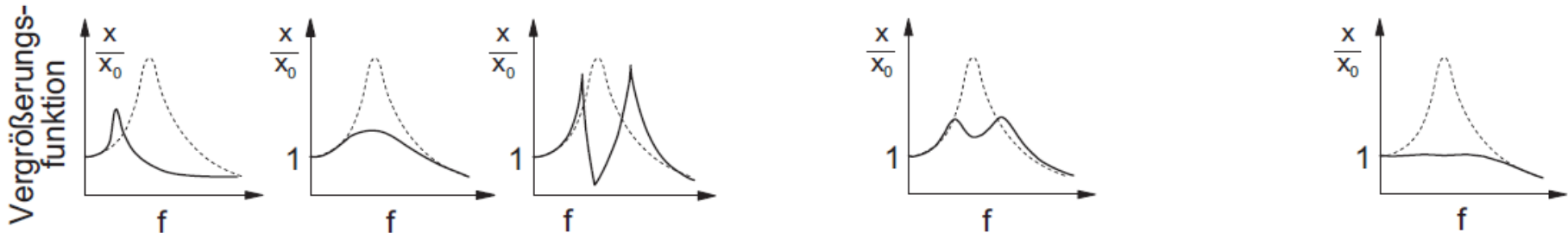
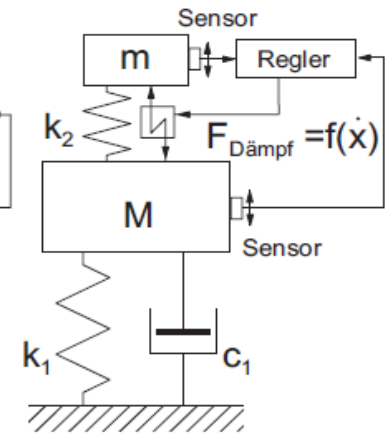
Hilfsmassen-Dämpfer (HMD)



Adaptiver HMD



Aktiver Dämpfer

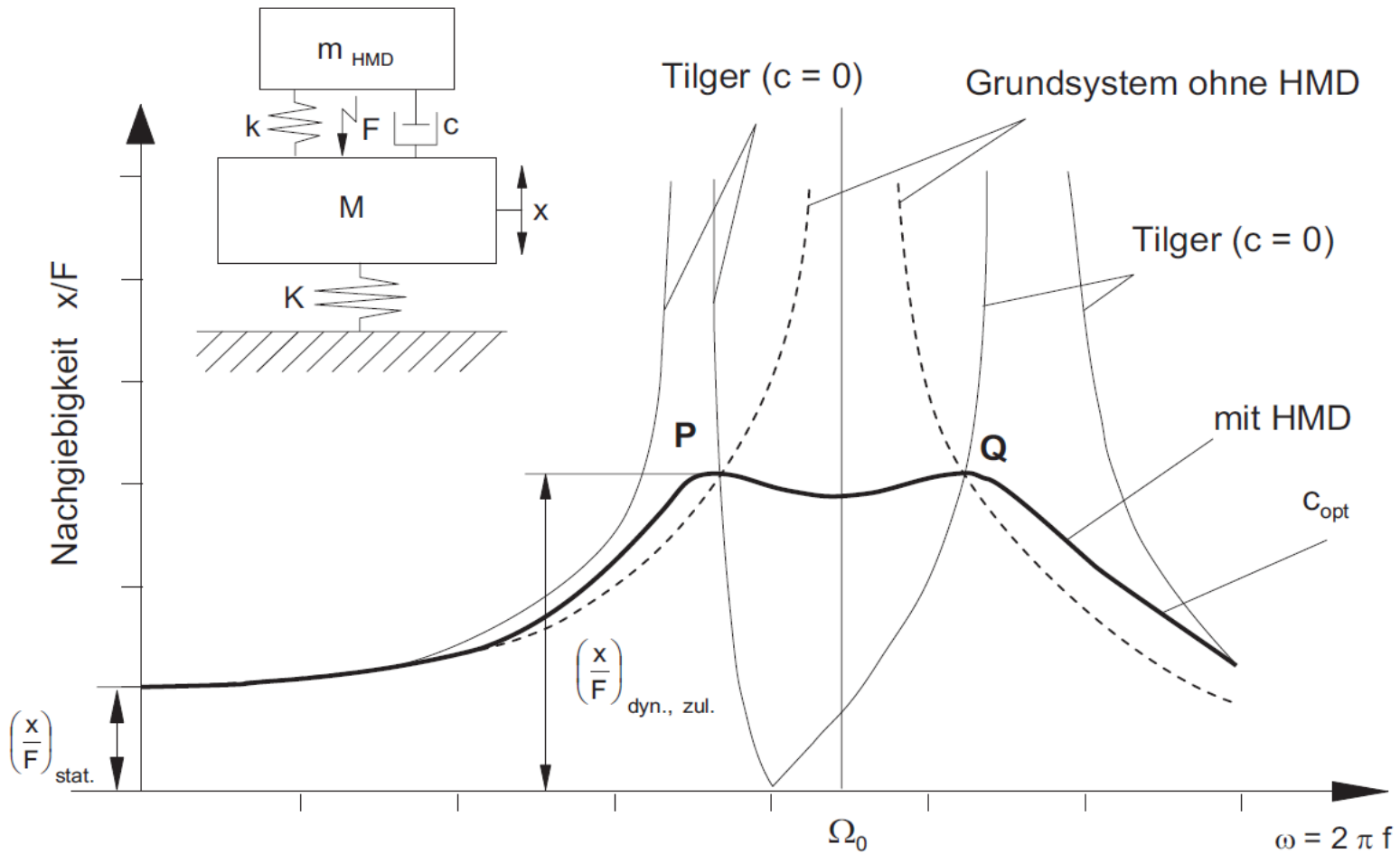




Estruturas

Considerações dinâmicas

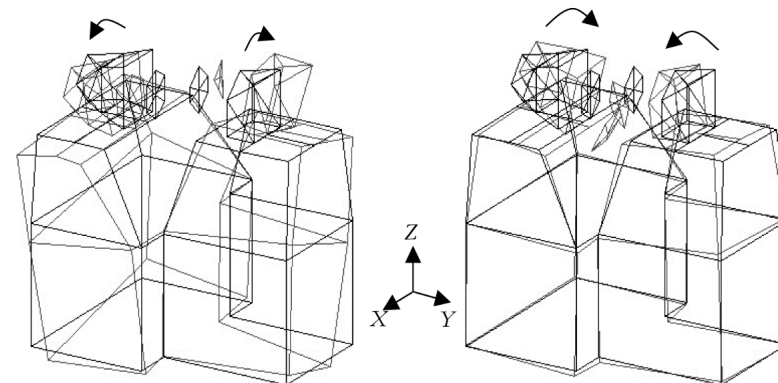
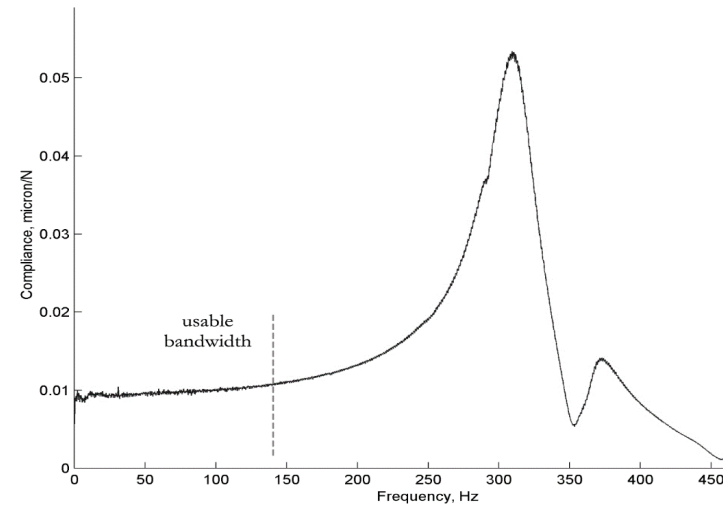
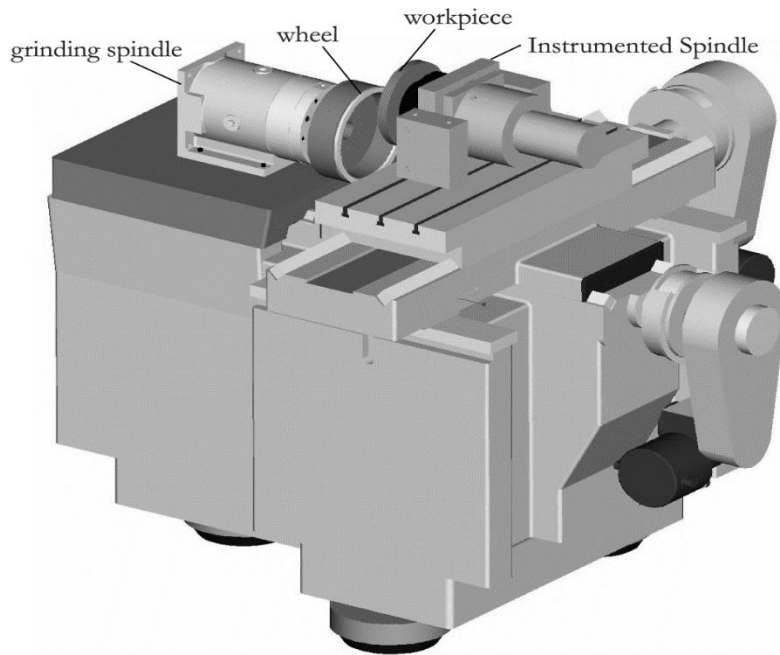
Controle dinâmico





Estruturas

Considerações dinâmicas



a) Mode 1: Twist about Y (275 Hz)

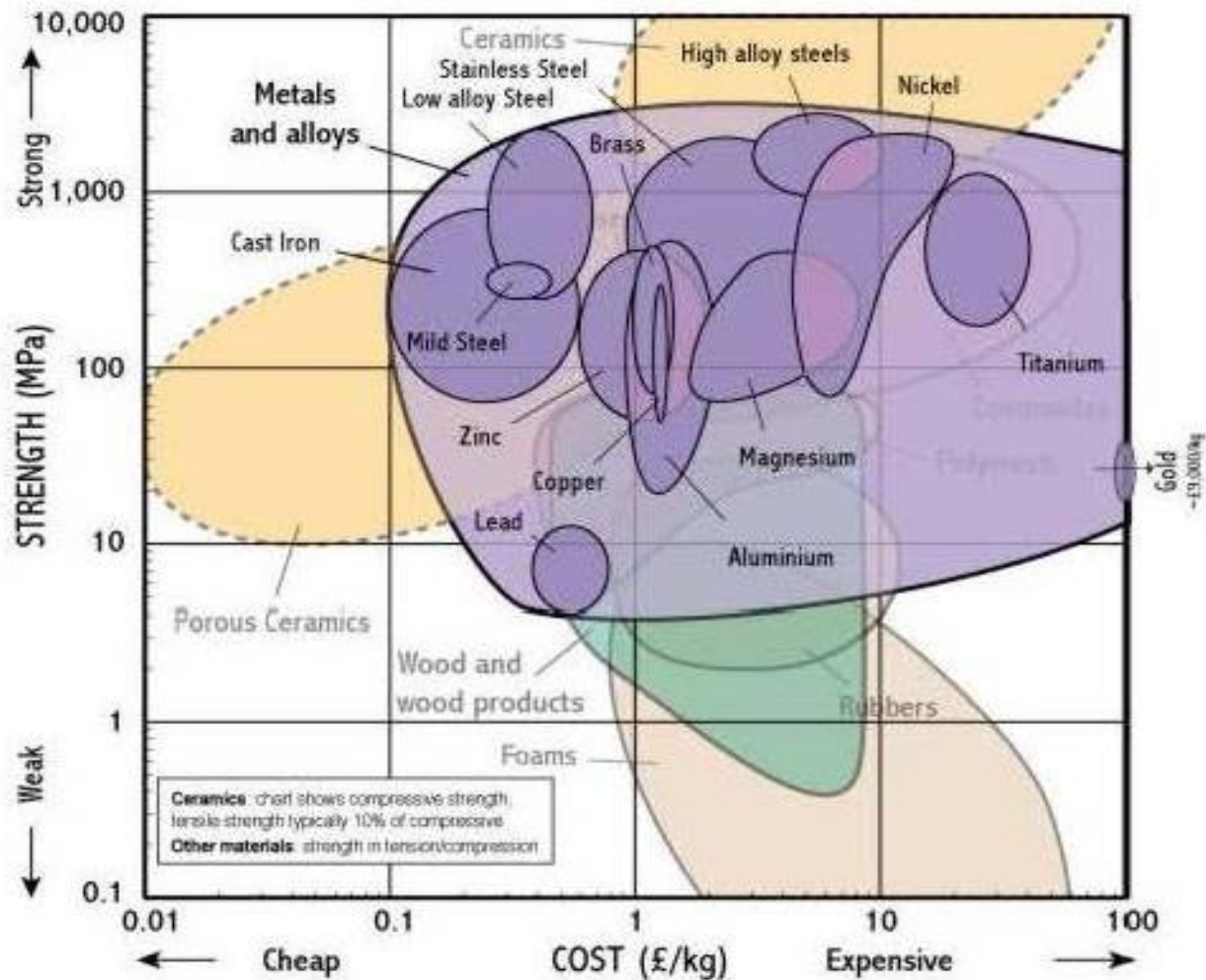
b) Mode 2: Pitch in Y (330 Hz)

Note: Since the infeed is in the Y direction, Mode 2 is the most influential



Estruturas

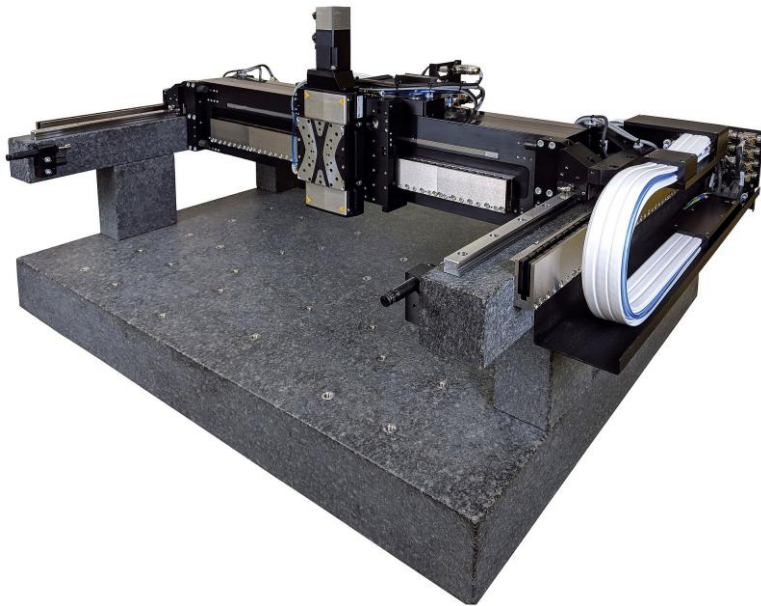
Considerações de custo



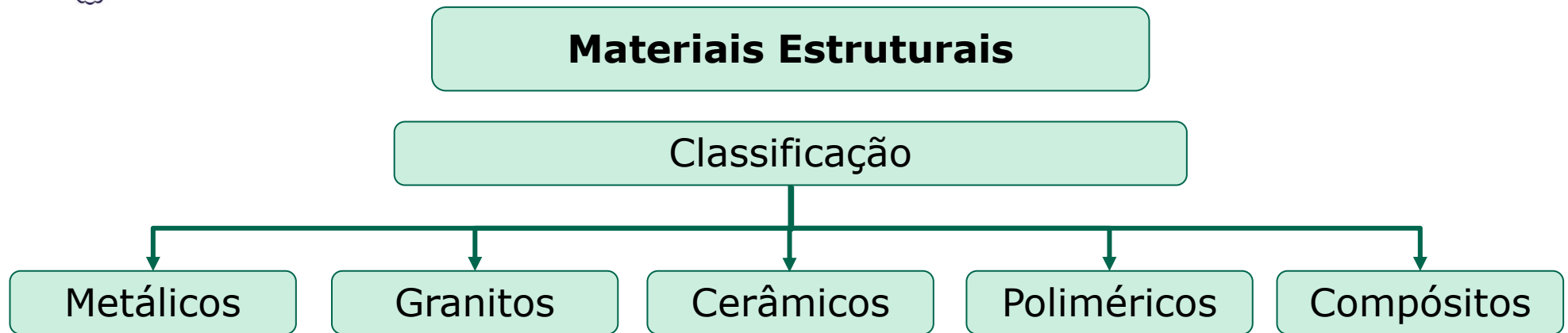


Estruturas

Materiais



- Em sistemas de precisão as principais fontes de erros tem origem nas deformações mecânicas e térmicas, tensões mecânicas e vibrações.
- Uma estrutura somente é boa se os materiais e os processos de fabricação utilizados também o forem.
- Diferentes tipos de materiais geralmente levam a diferentes tipos de processos de fabricação, que afetam a escolha da forma construtiva da estrutura.





Estruturas

As soluções serão de compromisso e envolvem a seleção de vários tipos de materiais





Arranjos estruturais

O arranjo de estruturas em sistemas de precisão independe do material ou da configuração interna da mesma.

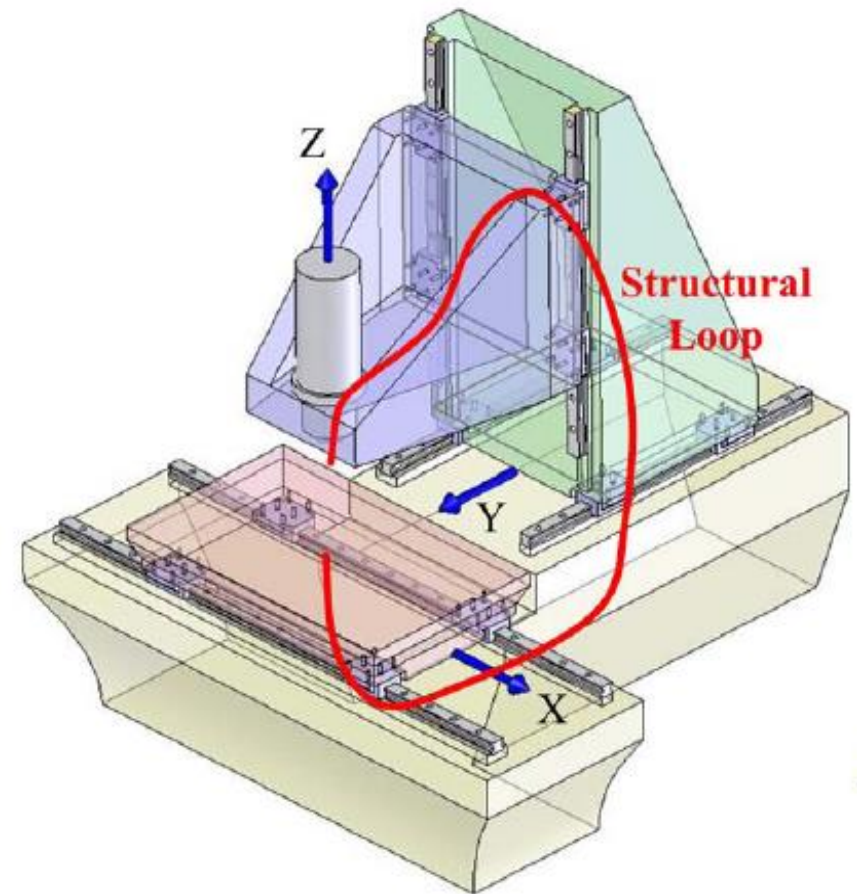
O arranjo é fortemente dependente da:

- cinemática do processo
- da opção construtiva do sistema
- dos limites da fabricabilidade do material a ser empregado
- estruturas independentes desacoplam fontes de erros



Looping estrutural

- O que é?
- Qual sua importância?
- Como caracterizar?



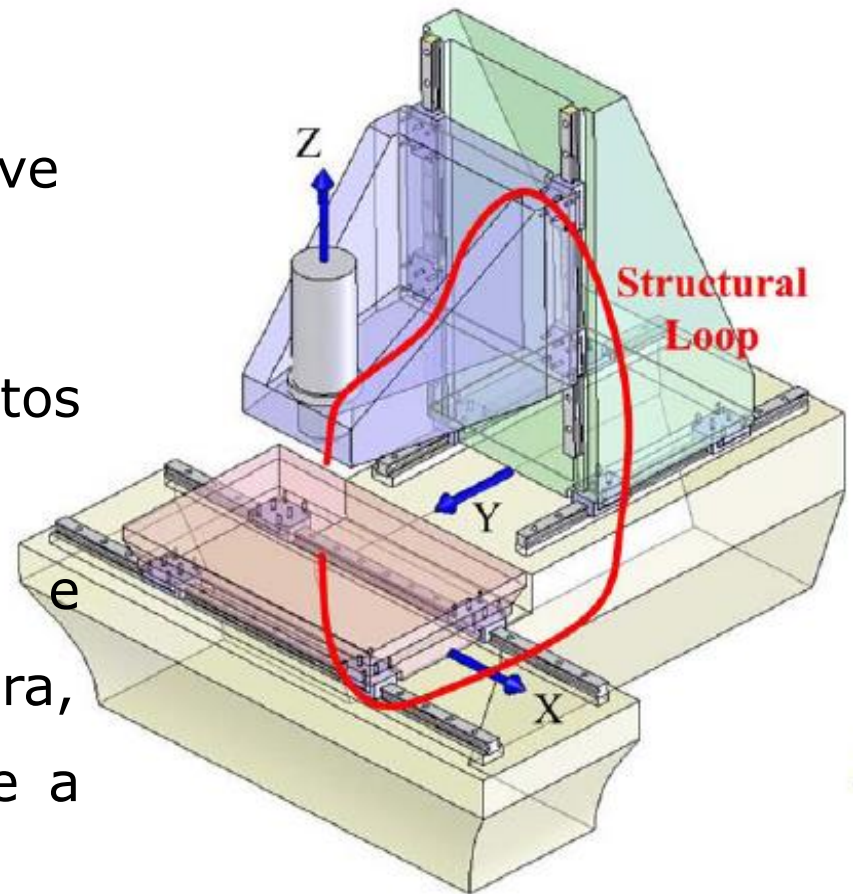


Looping estrutural

O que é?

Os primeiros rascunhos de uma estrutura em sistema de precisão deve conter:

- Indicativo das forças e momentos que atuam sobre esta,
- O caminho que estas forças e momentos *percorrem* na estrutura,
- Pontos de ação e reação sobre a estrutura.

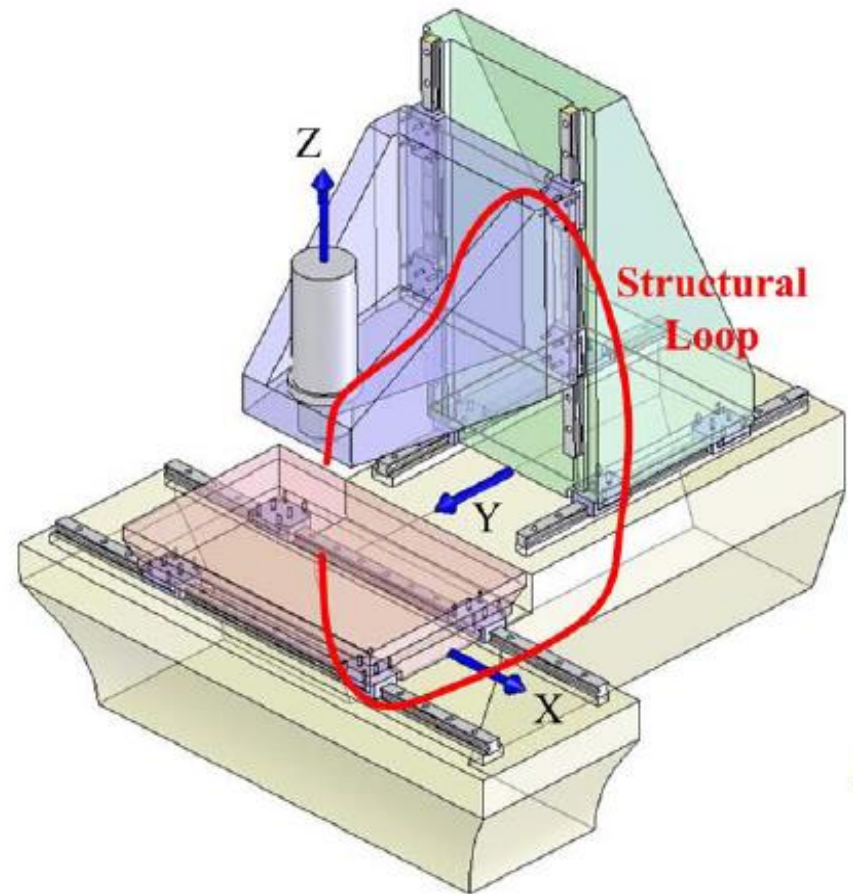




Looping estrutural

Qual sua importância?

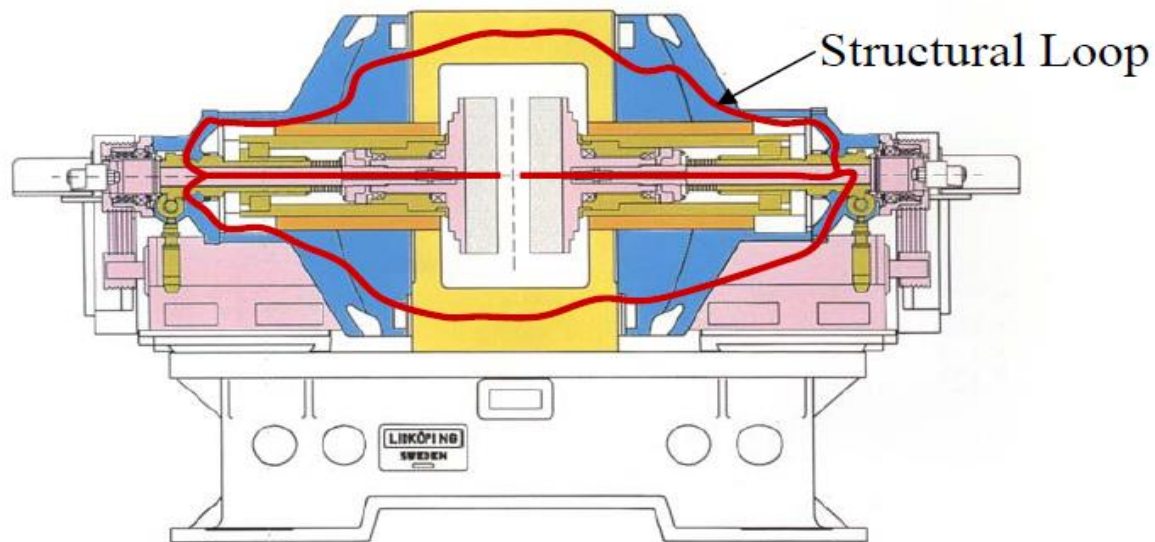
- O looping estrutural permite a visualização do 'fluxo' de forças e momentos, seus pontos de ação e reação e interfaces de propagação.
- Serve de auxílio a análise do projeto da estrutura.
- Looping fechado indica alta estabilidade estrutural,
- Uso de simetrias indicam projeto robusto.





Looping estrutural

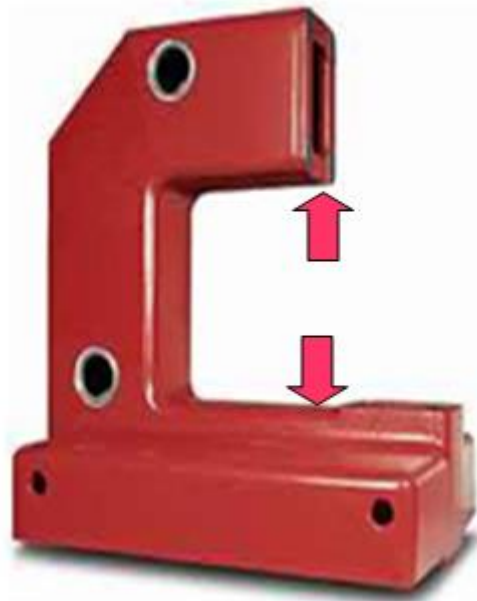
Looping aberto, lembre-se do conto “o carvalho e os juncos”. Quando da tempestade o carvalho não se curvou ao vento e quebrou, ao passo que o junco mais flexível, se curvou e sobreviveu.





Looping estrutural

Looping aberto, não indica necessariamente projeto ruim, mas indica a um cuidado extremo no projeto da estrutura





Formas de arranjos estruturais

Arranjos simples

Vantagens e desvantagens

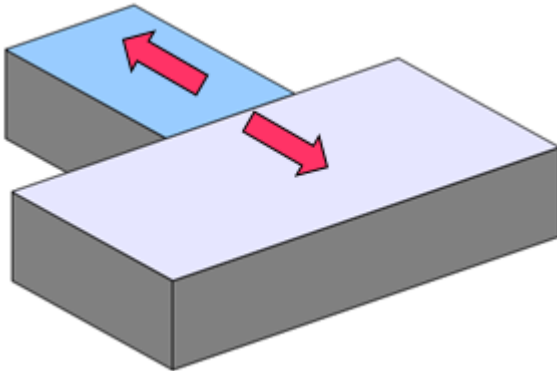




Formas de arranjos estruturais

Arranjos em T

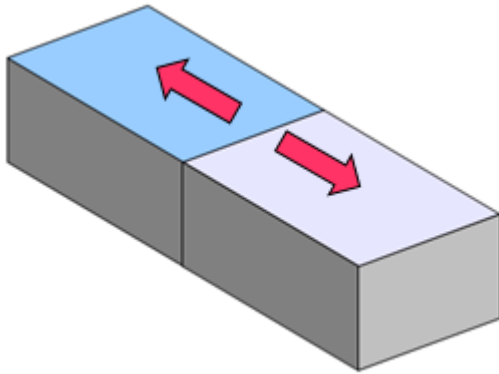
Vantagens e desvantagens





Formas de arranjos estruturais

Arranjos em I



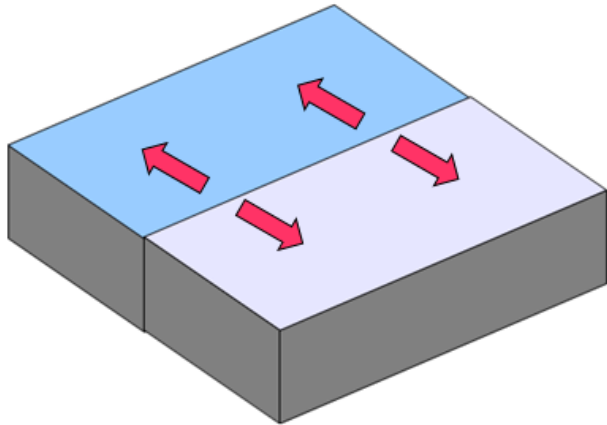
Vantagens e desvantagens



Formas de arranjos estruturais

Arranjos em H

Vantagens e desvantagens

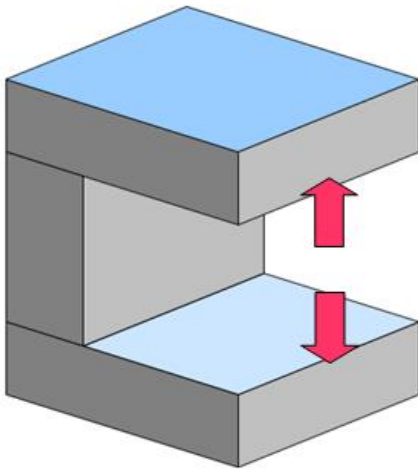




Formas de arranjos estruturais

Arranjos em C

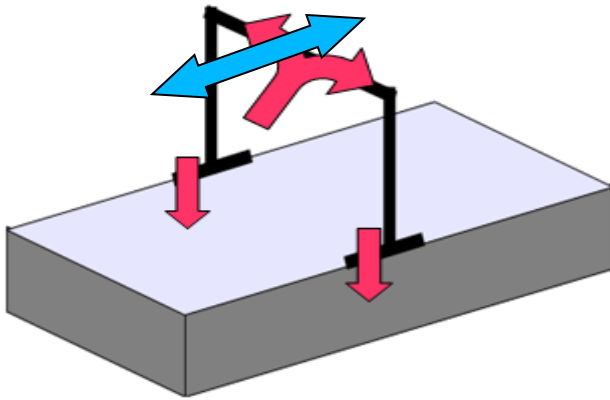
Vantagens e desvantagens





Formas de arranjos estruturais

Arranjos tipo Gantry



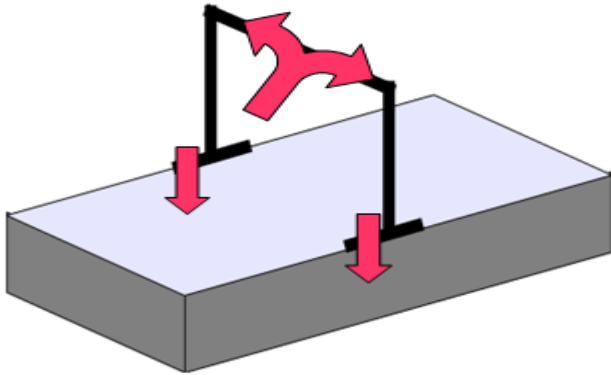
Vantagens e desvantagens





Formas de arranjos estruturais

Arranjos tipo Portal



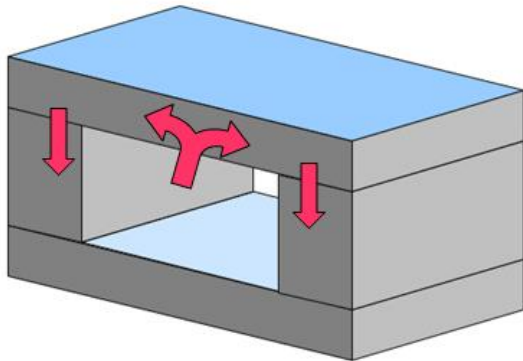
Vantagens e desvantagens





Formas de arranjos estruturais

Arranjos tipo O



Vantagens e desvantagens

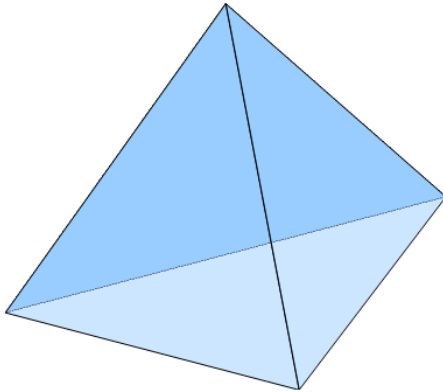




Formas de arranjos estruturais

Arranjos *Tetraform*

Vantagens e desvantagens

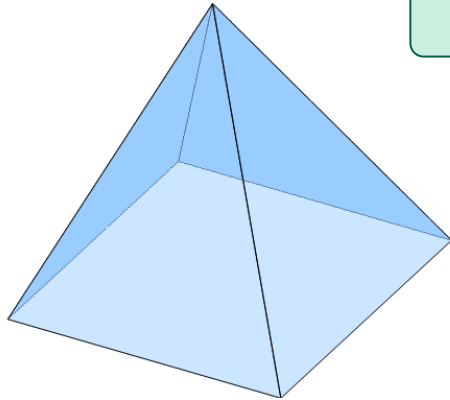




Formas de arranjos estruturais

Arranjos Piramidais

Vantagens e desvantagens

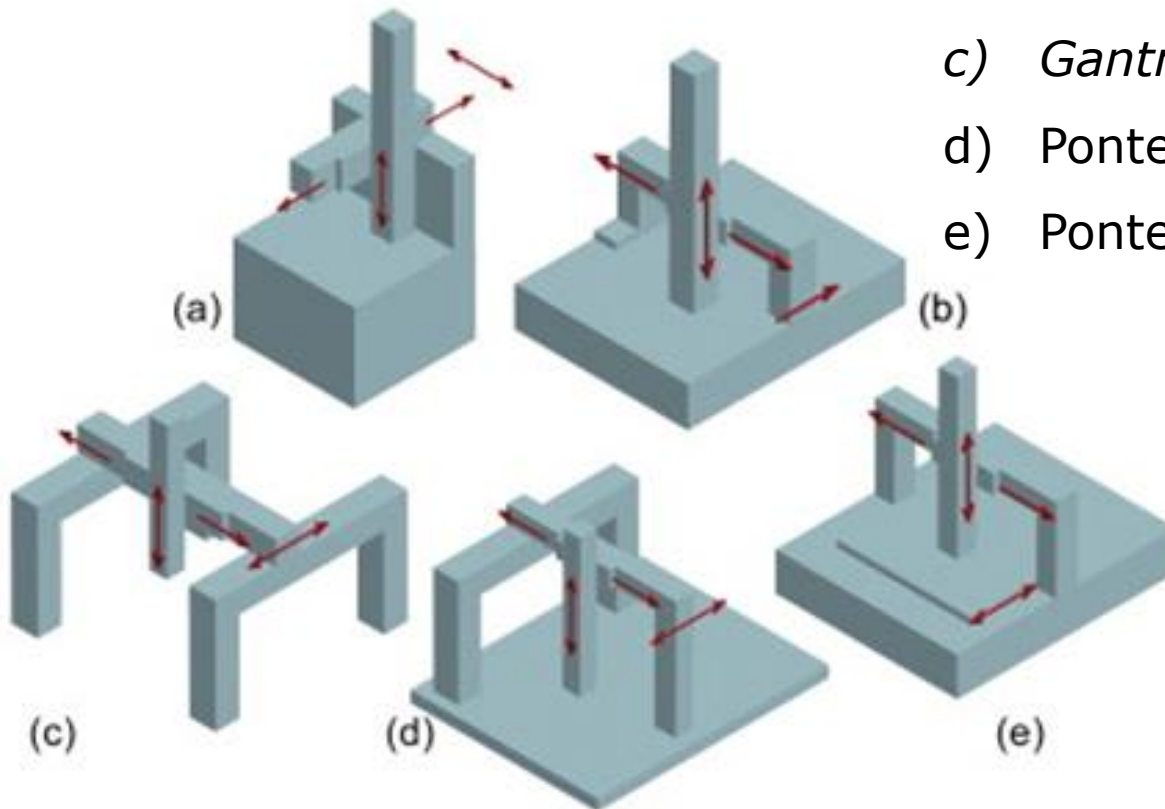




Arranjos estruturais em MMC

Norma: EN ISO 10360-1

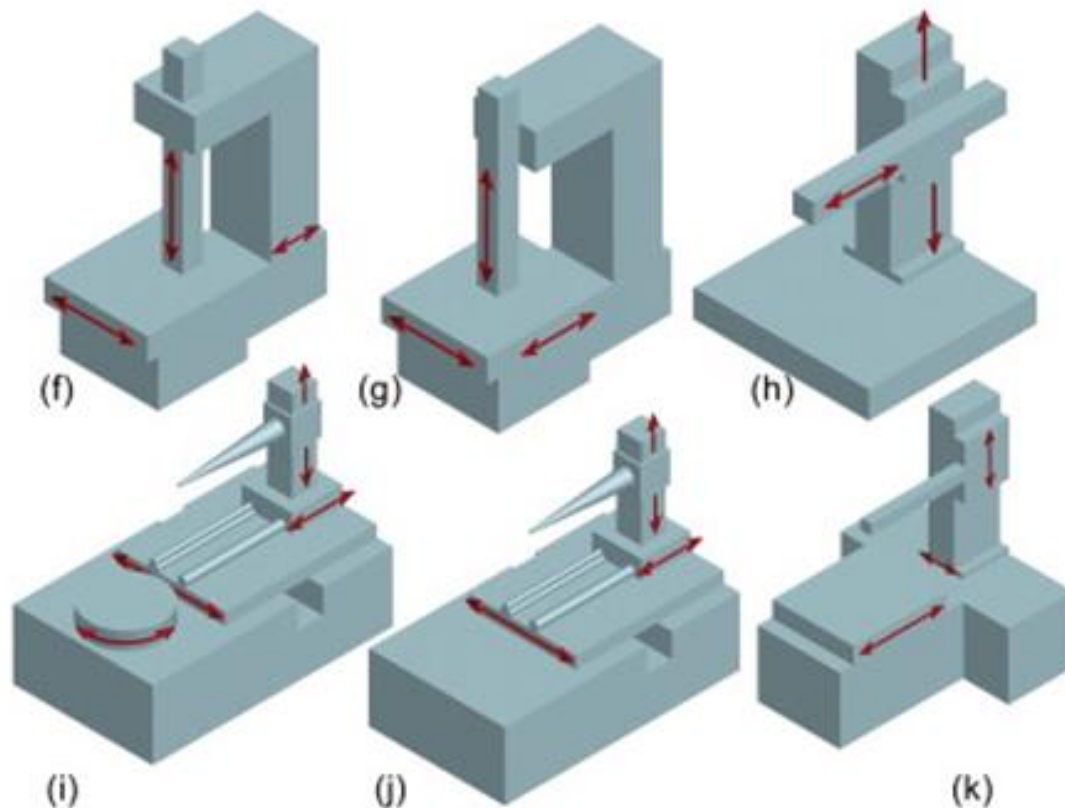
- a) Coluna (*Cantilever*) com mesa fixa
- b) Portal móvel
- c) *Gantry* ou Pórtico
- d) Ponte em L
- e) Ponte fixa (mesa móvel)





Arranjos estruturais em MMC

Norma: EN ISO 10360-1



- f) Coluna e mesa móvel
- g) Coluna fixa e mesa móvel
- h) Braço horizontal
- i) Braço horizontal com mesa rotativa
- j) Braço horizontal com mesa fixa
- k) Braço horizontal com mesa móvel



ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

FIM DA AULA