



ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

PMR 3501
Engenharia de Precisão

A25

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	Exercícios -4	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	Exercícios -5	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		Encerramento do semestre 2020-2	
06.12			Mecedor tridimensional de coordenadas	





Estruturas

<https://www.youtube.com/watch?v=y5xpMXbG8pU&t=59s>



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



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.

4 – Evite a ação de momentos

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



Considerações orientadas ao projeto de precisão

5 - Loopings

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

6 – 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.

7 – Compensação

Erros de todas as origens podem ser compensados dentro de limites



Considerações orientadas ao projeto de precisão

8 – Controle nulo

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

9 – Separação de erros / desacoplamento

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.

10 – Auto correção / auto calibração

Erros de todas as origens podem ser compensados dentro de limites



Considerações orientadas ao projeto de precisão

11 – Projeto cinemático

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

12 – Pseudoprojeto cinemático

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.

13 – Projeto orientado a deformação

Erros de todas as origens podem ser compensados dentro de limites



Considerações orientadas ao projeto de precisão

14 – Projeto orientado a plasticidade

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

15 – Princípio da simplicidade

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.

16 – Erros de Abbe e erros de seno

Erros de todas as origens podem ser compensados dentro de limites



Considerações orientadas ao projeto de precisão

17 – Projeto invertido

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

18 – dissipação de energia

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.

19 – Teste e verificação

Erros de todas as origens podem ser compensados dentro de limites

20 – Princípio de Ockhan



Estruturas

Considerações térmicas

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.)



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

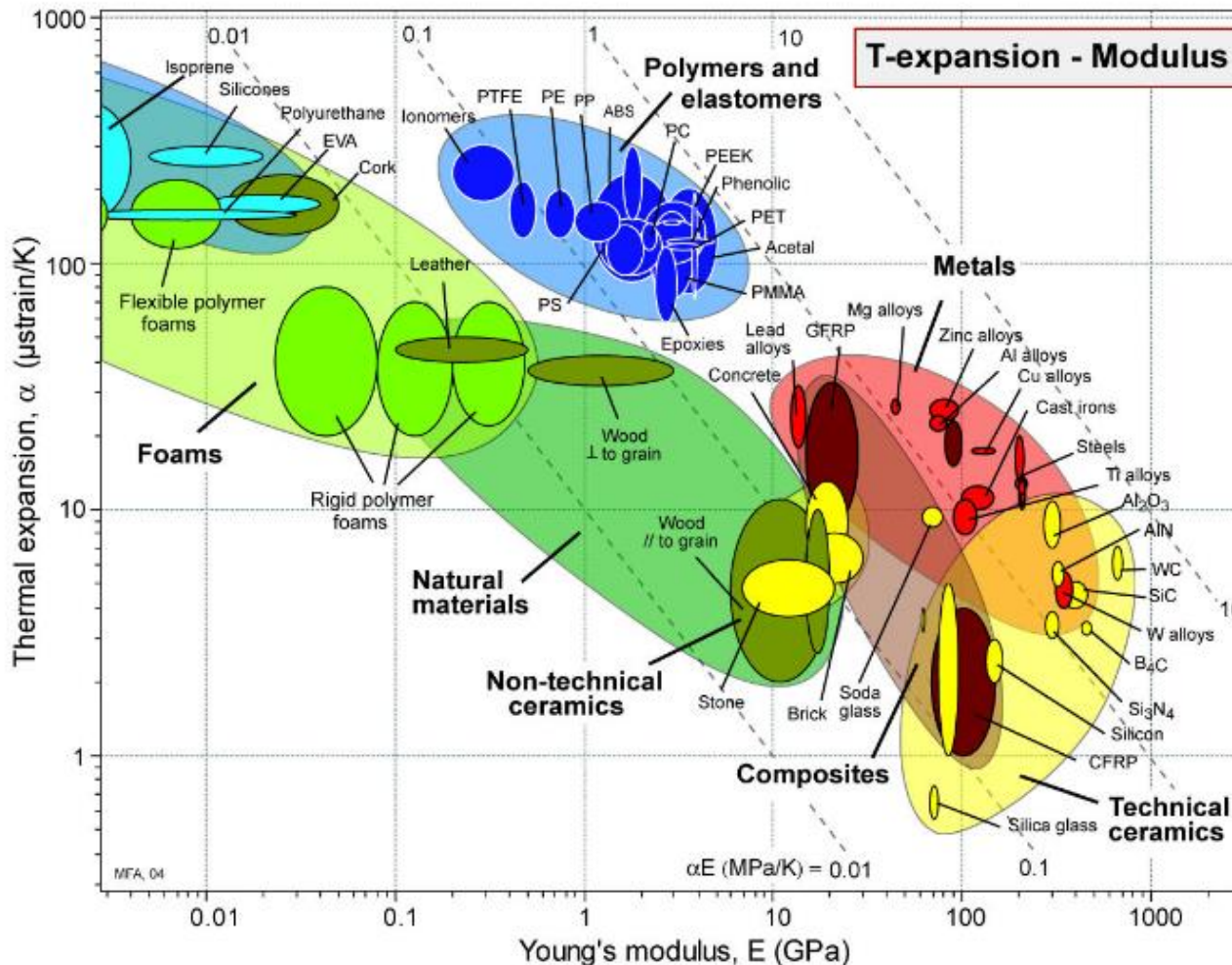
Requisitos

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



Estruturas

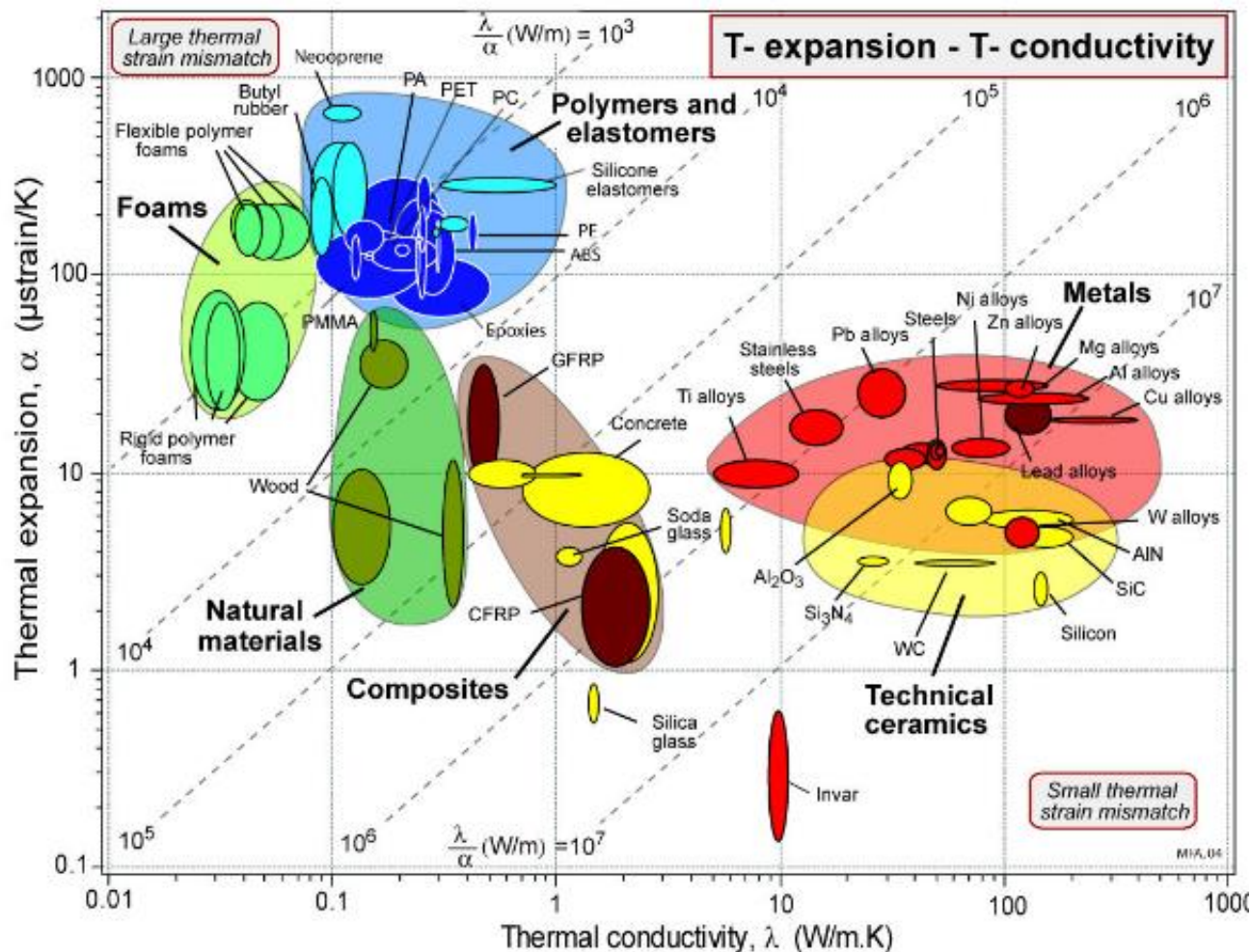
Considerações térmicas





Estruturas

Considerações térmicas

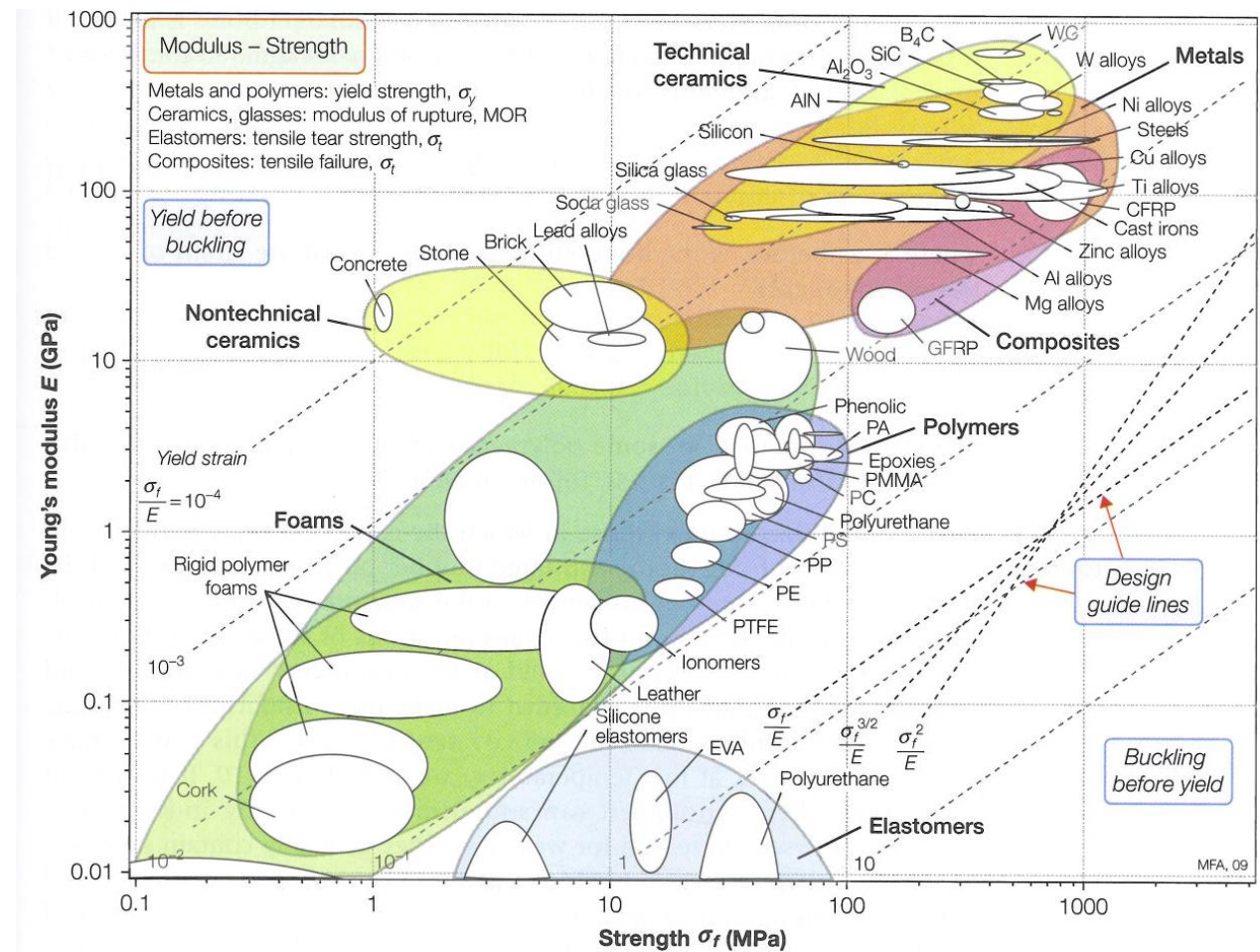
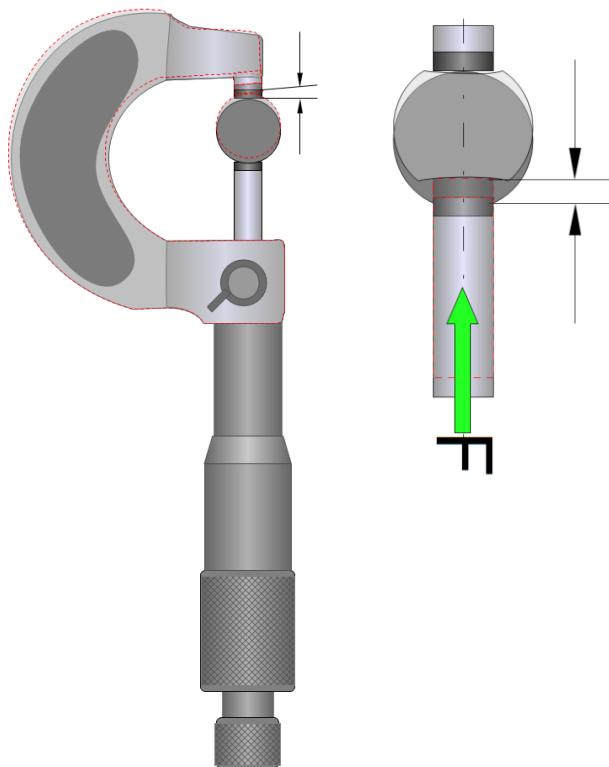




Estruturas

Considerações de deformação

Efeito macro

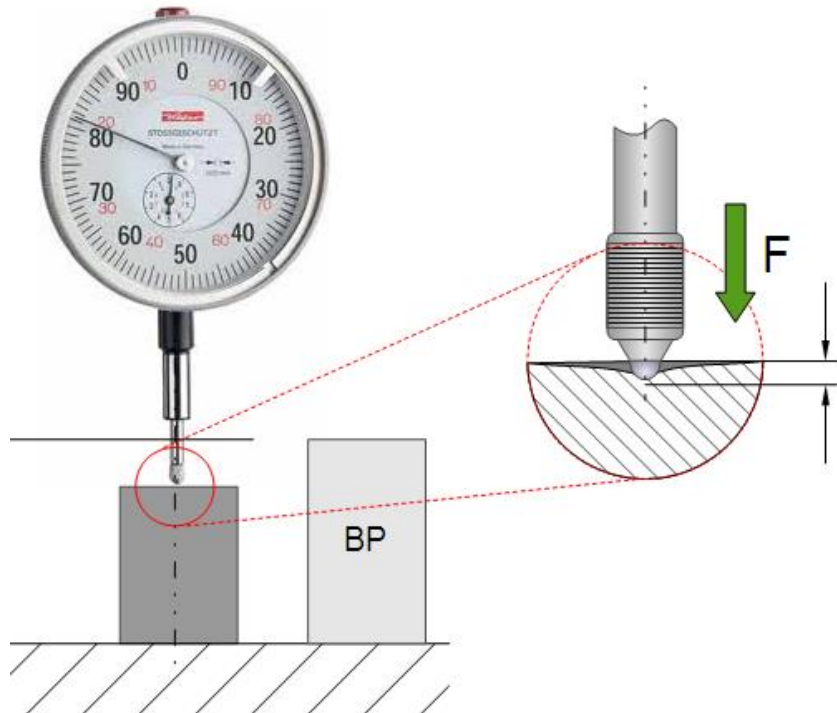




Estruturas

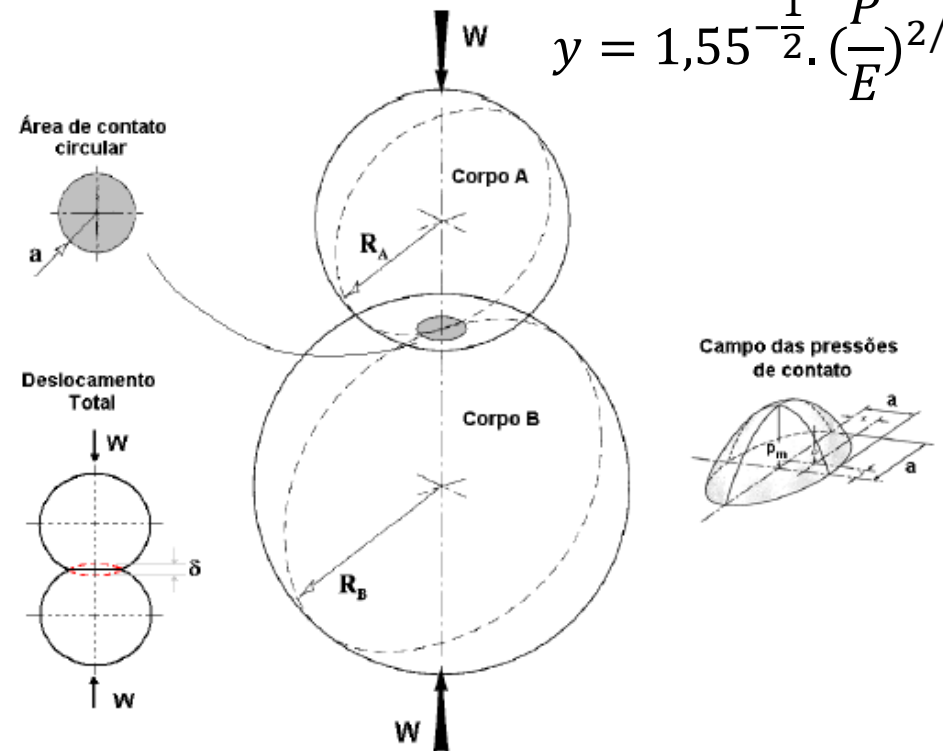
Considerações de deformação

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:

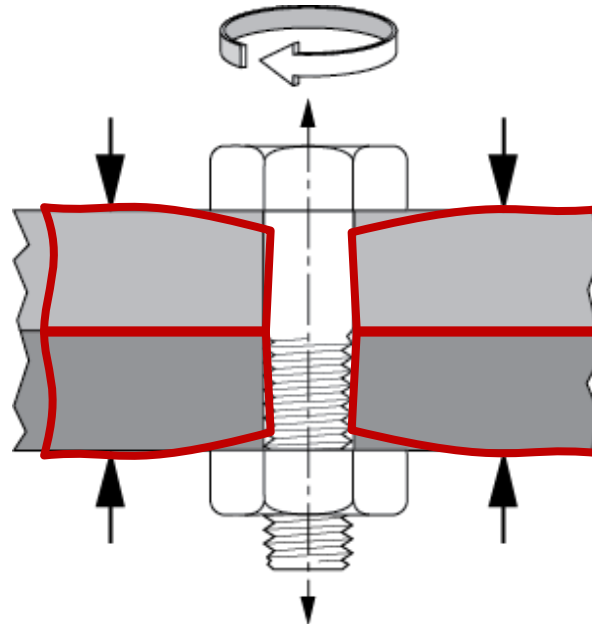
- peso das partes móveis
- peso das peças de trabalho
- forças de processo
- gradientes térmicos
- campos magnéticos



Estruturas

Considerações de deformação

→ 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.

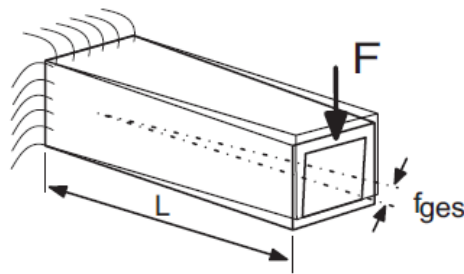
Os esforços de processos, como por exemplo: forças de medição e forças de usinagem (em usinagem UP em geral são inferiores a 5N), insuficientes para produzirem deformações estruturais significativas



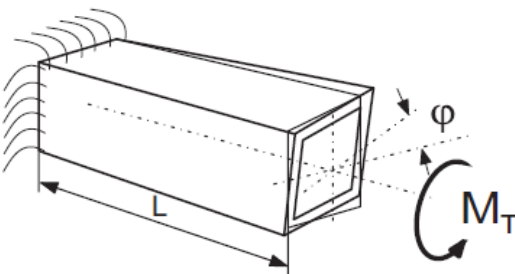
Estruturas

Considerações de rigidez

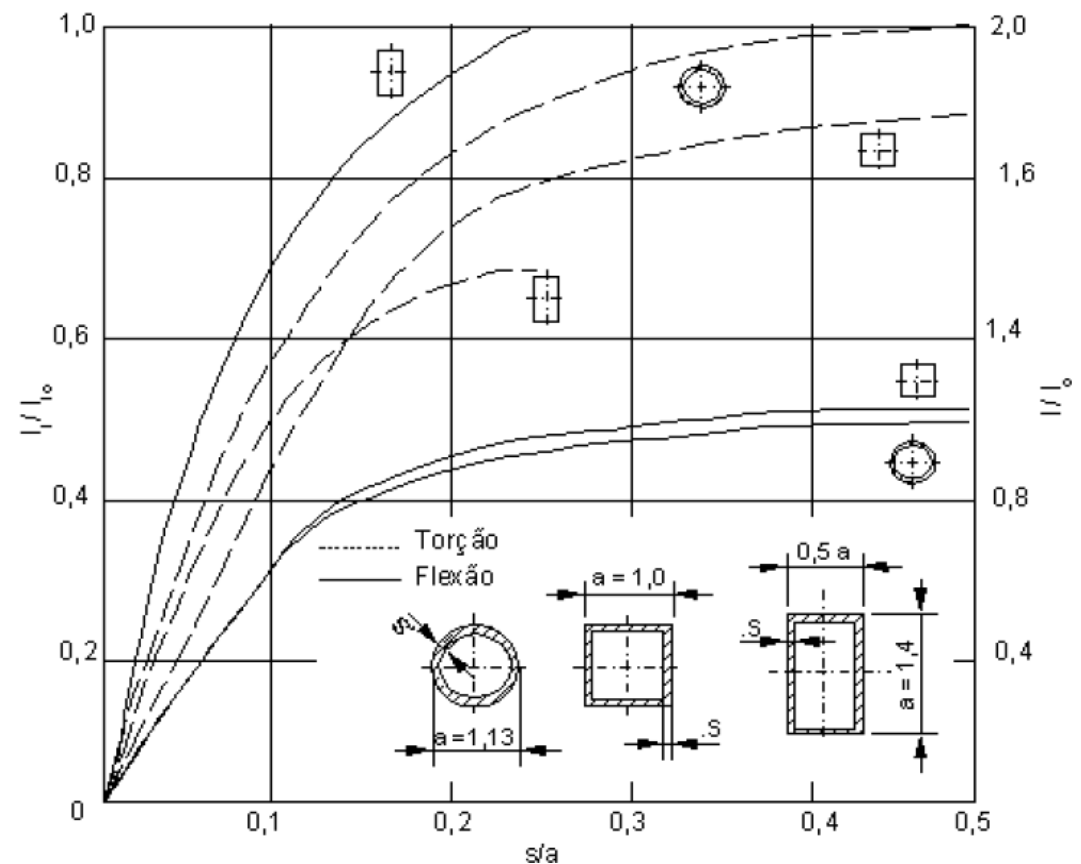
Momento de inercia estrutural de Torção e Flexão para perfiz



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



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

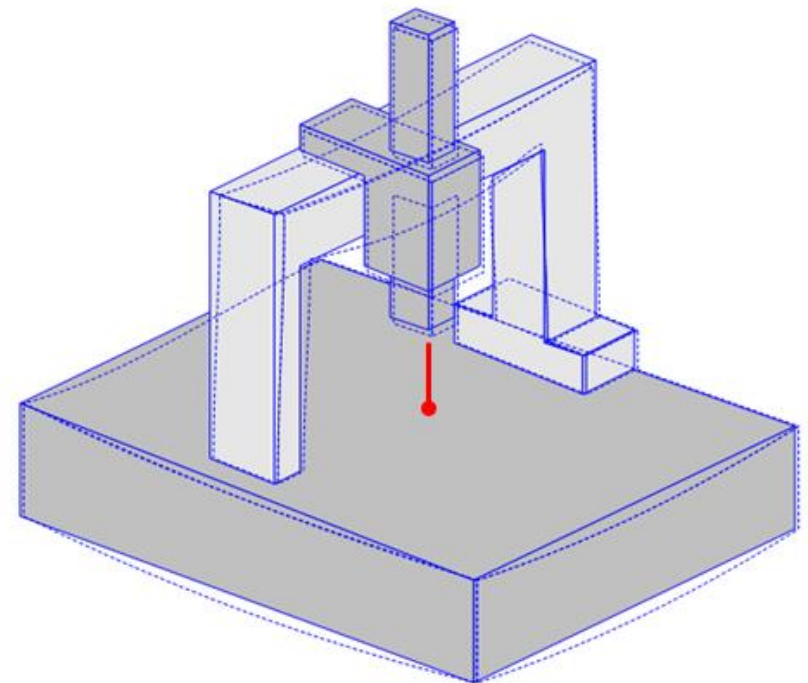
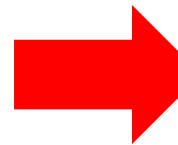
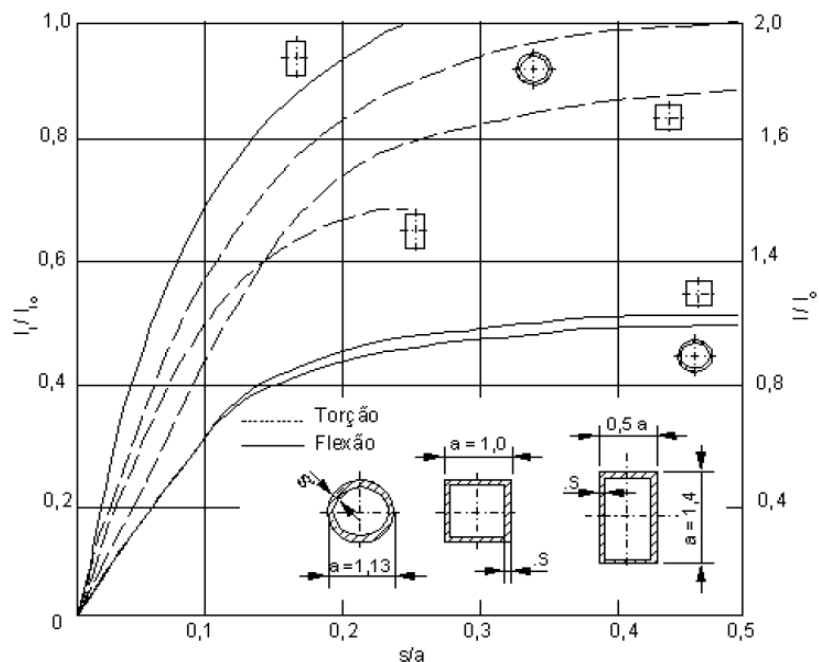




Estruturas

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

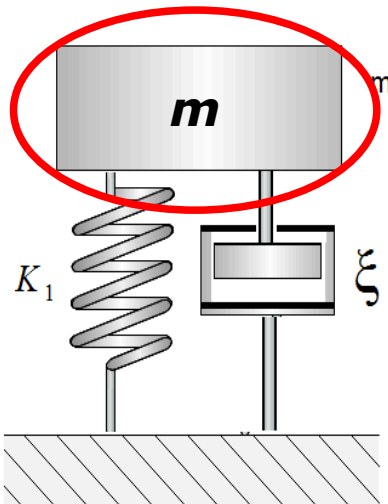
- Se peso for adicionado aos requisitos então uma solução de compromisso deve ser alcançada.
- Diferentes aplicações e diferentes requisitos tem custos diferentes



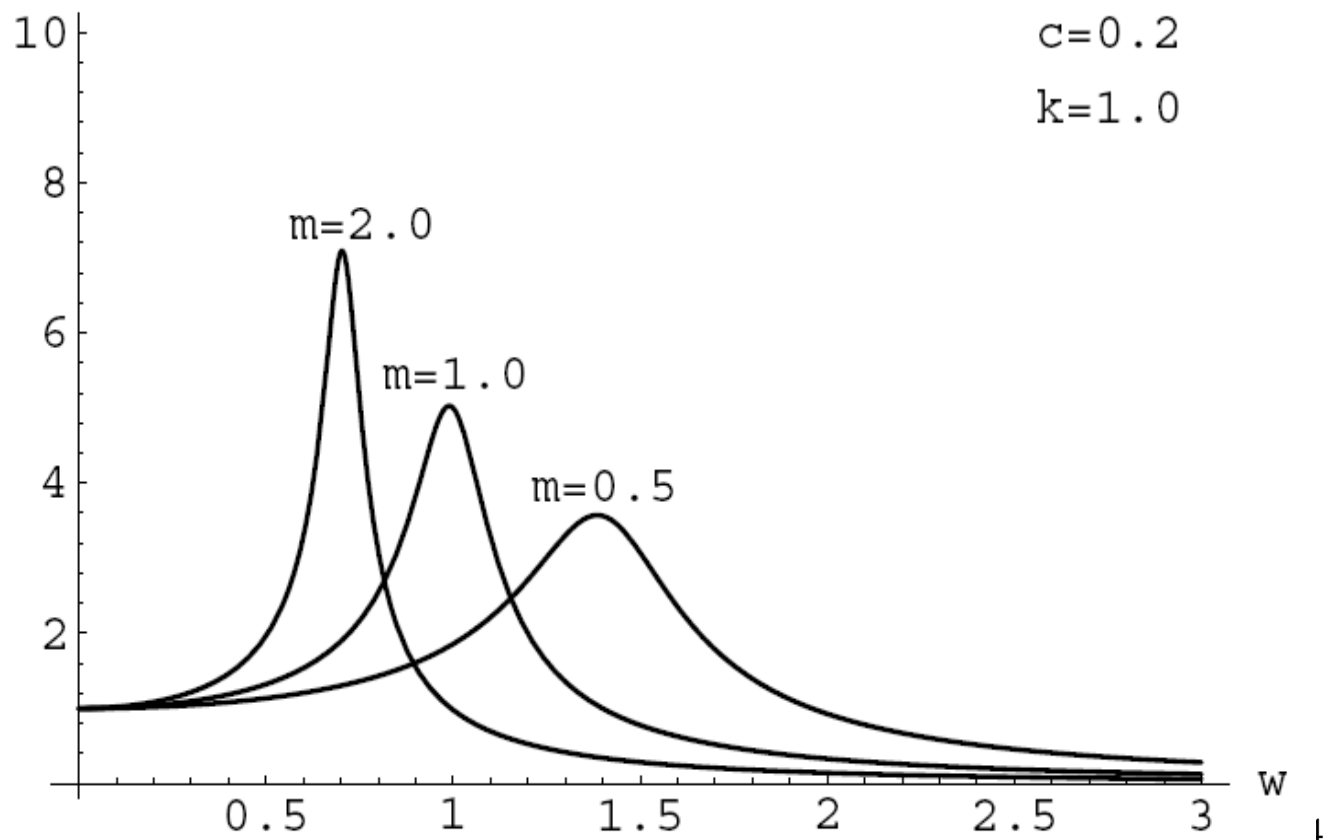
Estruturas

Considerações dinâmicas

Efeito da massa



$H(\omega)$

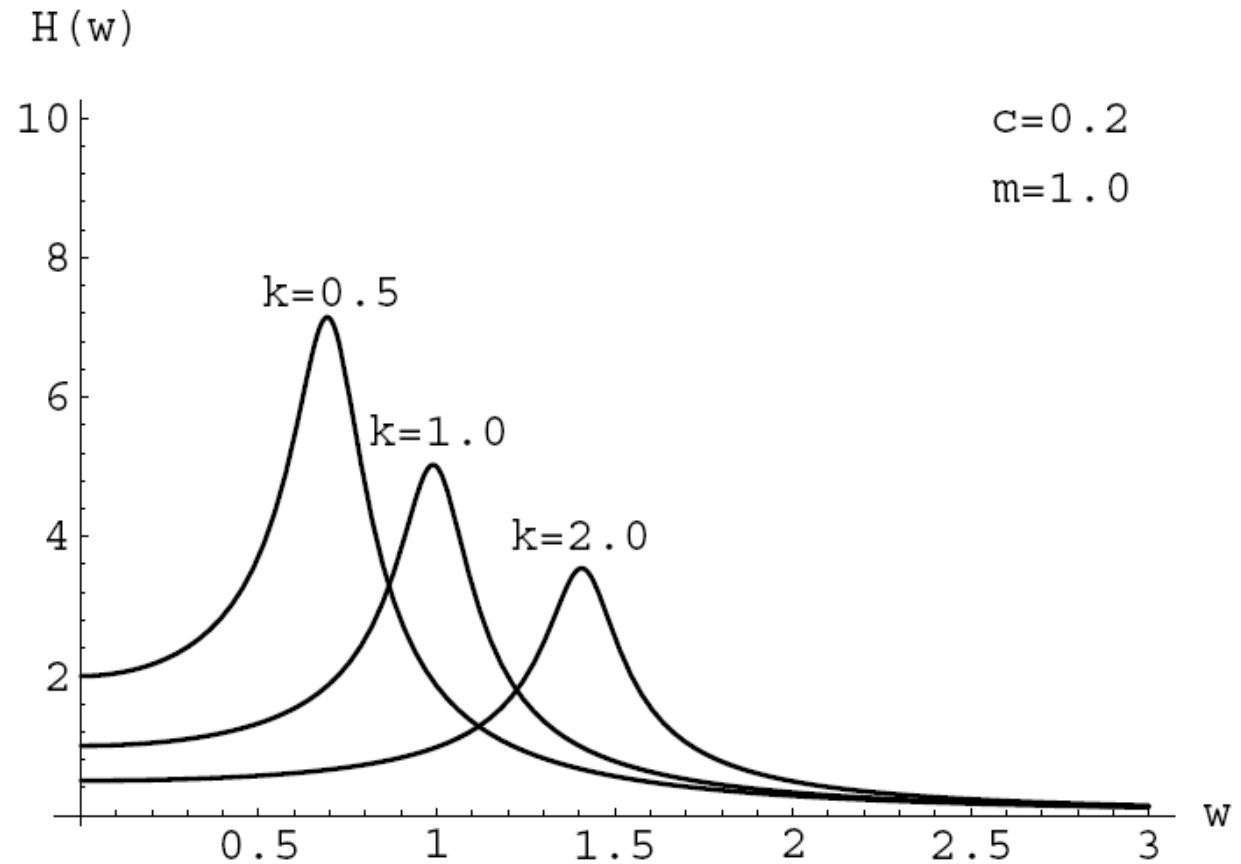
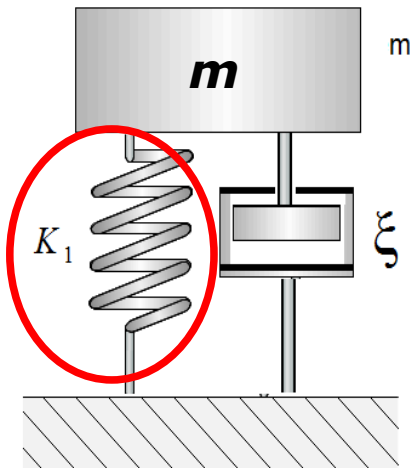




Estruturas

Considerações dinâmicas

Efeito da rigidez

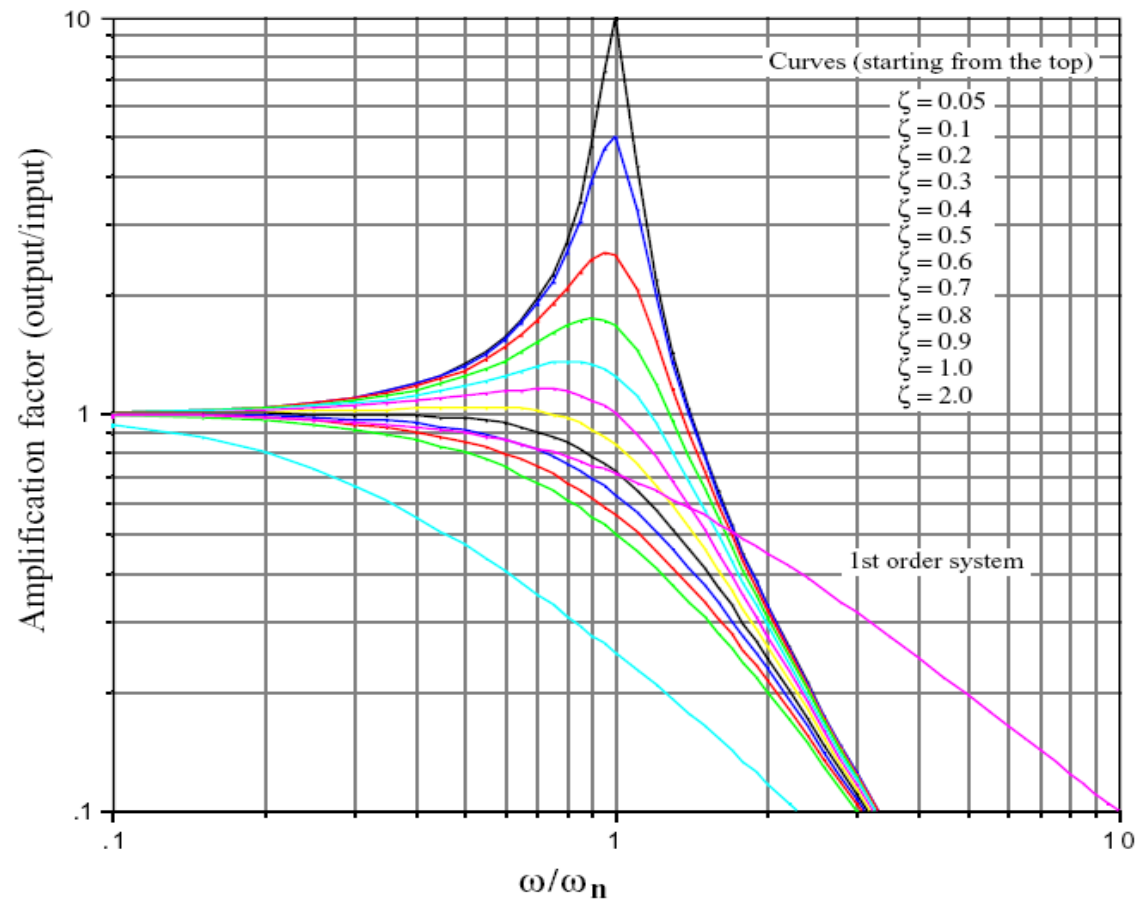
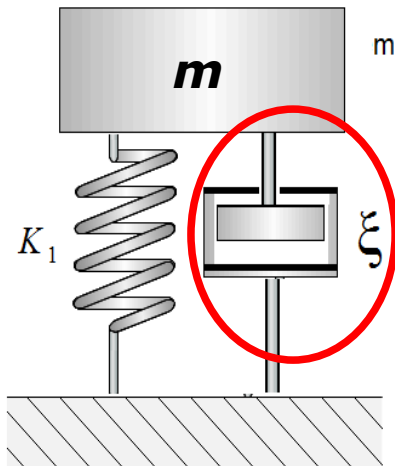




Estruturas

Considerações dinâmicas

Efeito do amortecimento

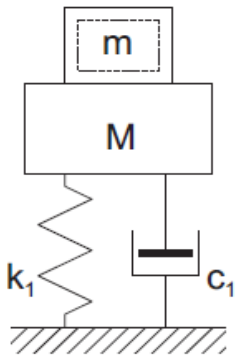




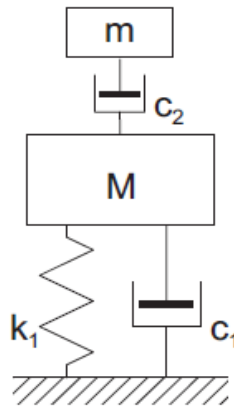
Estruturas

Considerações dinâmicas

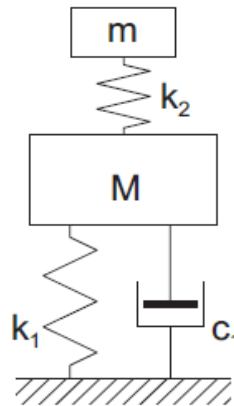
Impact-Dämpfer



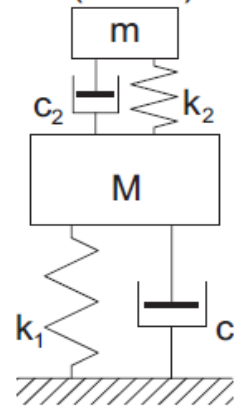
Lanchester-Dämpfer



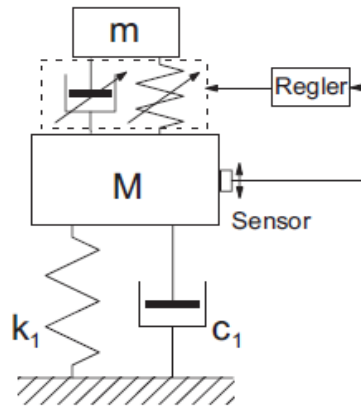
Tilger



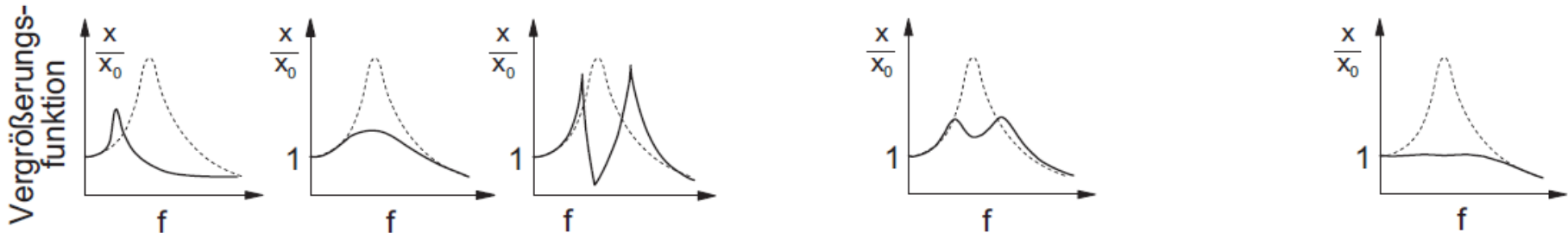
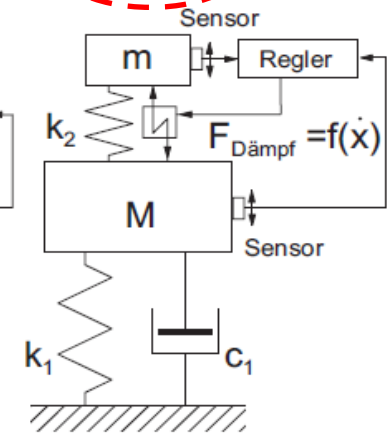
Hilfsmassen-Dämpfer (HMD)



Adaptiver HMD



Aktiver Dämpfer

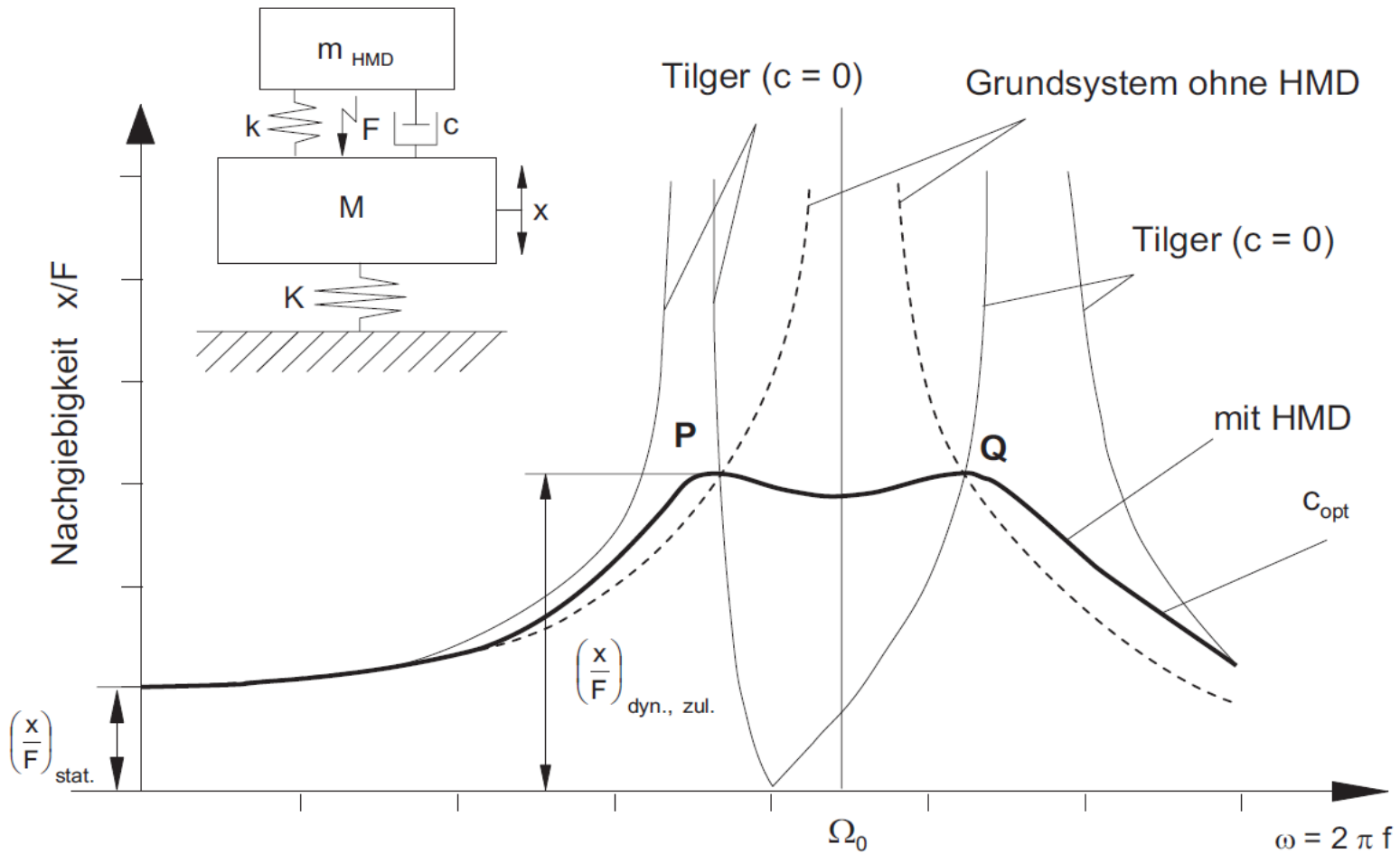




Estruturas

Considerações dinâmicas

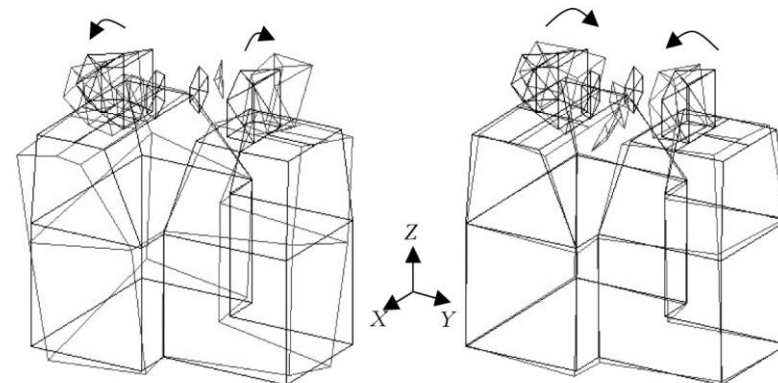
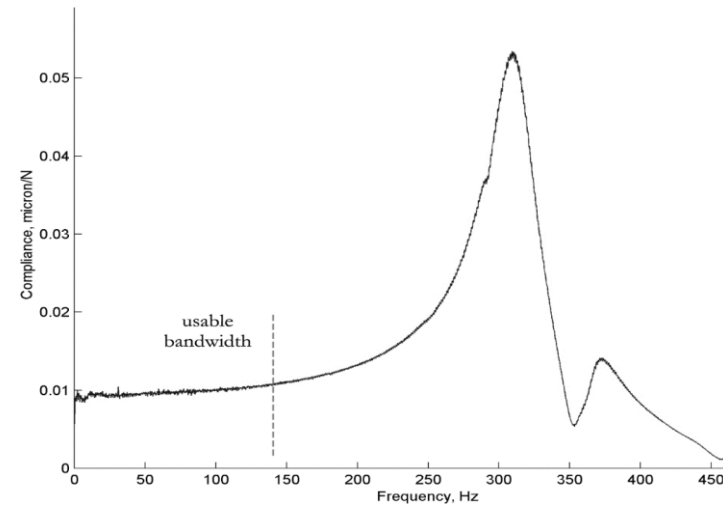
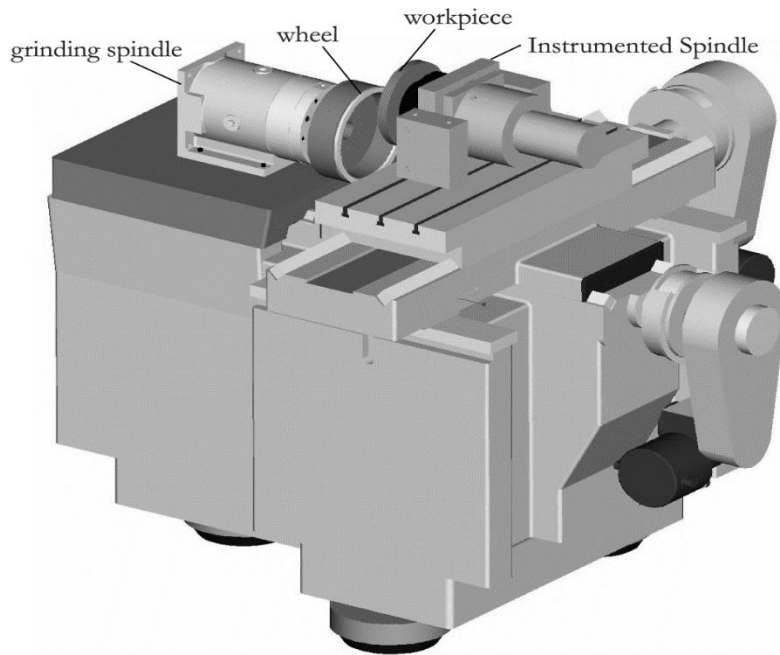
Controle dinâmico





Estruturas

Considerações dinâmicas



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

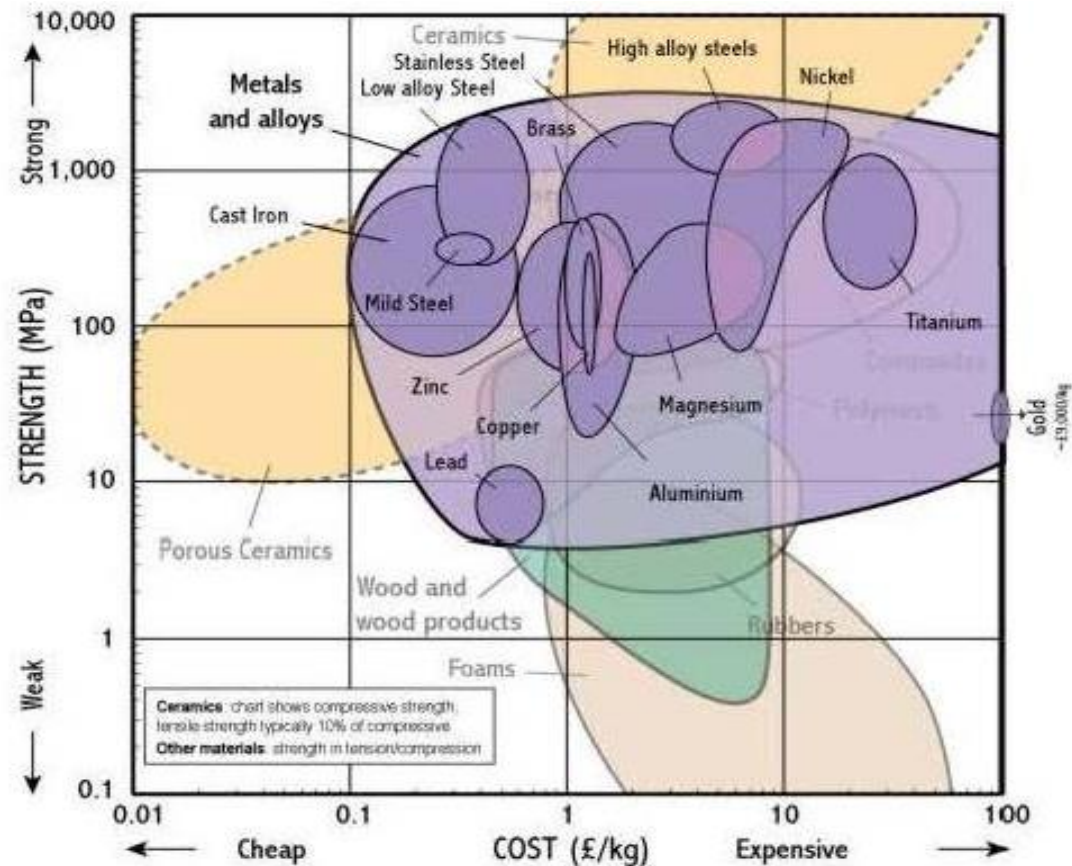
b) Mode 2: Pitch in Y (330 Hz)

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



Estruturas

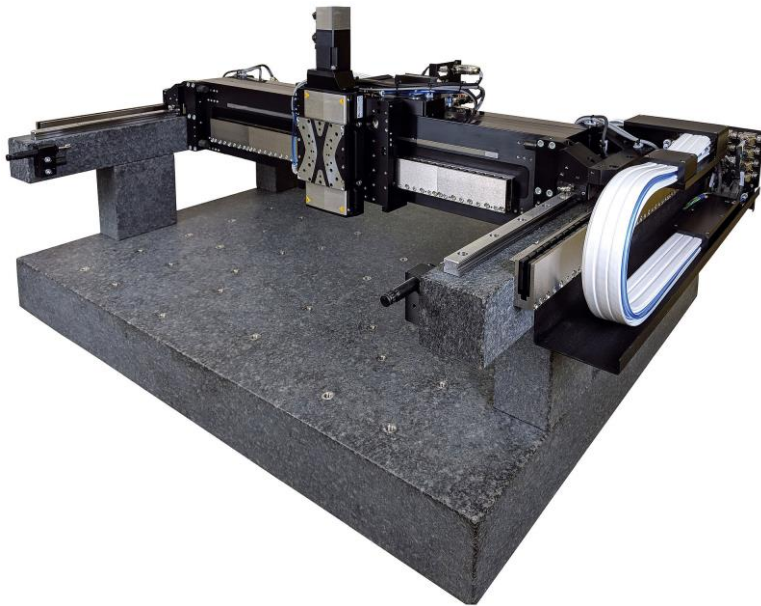
Considerações de custo





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.



Materiais Estruturais

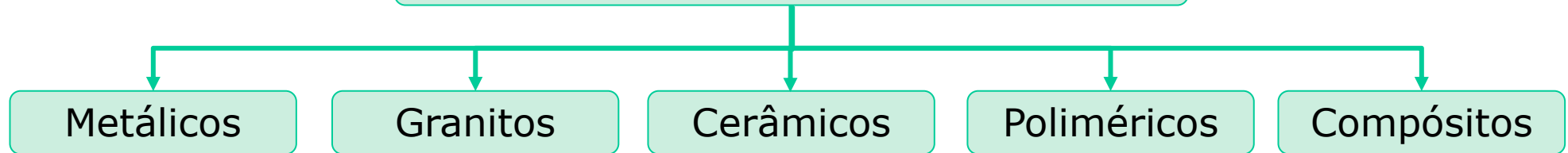
Requisitos

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



Materiais Estruturais

Classificação



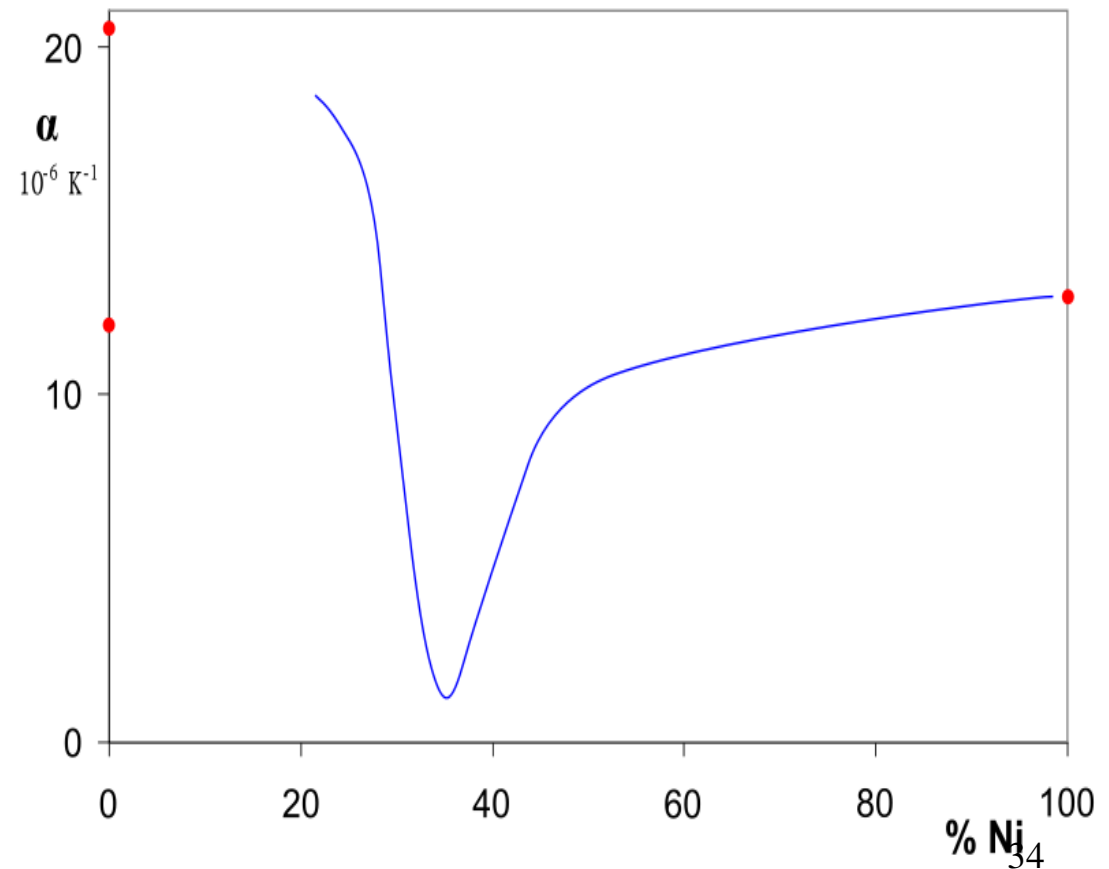
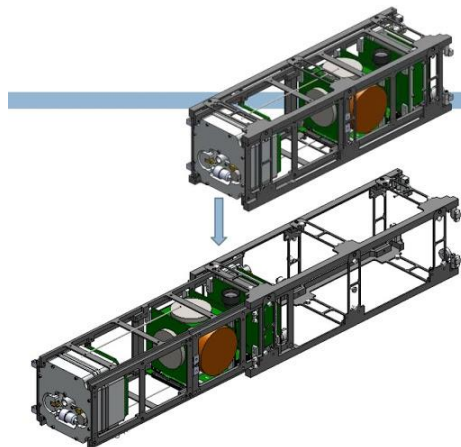


Materiais Estruturais

Metálicos

Invar 36

- Invar é uma liga de níquel-ferro (FeNi36) que apresenta como característica principal um coeficiente de expansão térmica extremamente baixo.





Materiais Estruturais

Metálicos

Invar 36

Physical Properties	Metric
Density	8.05 g/cc

Mechanical Properties	Metric
Hardness, Rockwell B	90
Tensile Strength, Ultimate	621 MPa
Tensile Strength, Yield	483 MPa @Strain 0.200 %
Elongation at Break	20.0 %
Reduction of Area	60.0 %
Modulus of Elasticity	148 GPa

Electrical Properties	Metric
Electrical Resistivity	0.0000820 ohm-cm
Curie Temperature	279 °C

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



Materiais Estruturais

Metálicos

Aços

ANSI 4340

Physical Properties	Metric
Density	7.85 g/cc

Mechanical Properties	Metric
Hardness, Brinell	363
Hardness, Knoop	392
Hardness, Rockwell B	100
Hardness, Rockwell C	40
Hardness, Vickers	384
Tensile Strength, Ultimate	1282 MPa
Tensile Strength, Yield	862 MPa
Elongation at Break	12.2 %
Reduction of Area	36.3 %
Modulus of Elasticity	200 GPa
Bulk Modulus	159 GPa
Poissons Ratio	0.29
Machinability	50 %
Shear Modulus	78.0 GPa

Thermal Properties	Metric
CTE, linear	12.3 $\mu\text{m/m}\cdot^\circ\text{C}$ @Temperature 20.0 $^\circ\text{C}$
	12.6 $\mu\text{m/m}\cdot^\circ\text{C}$ @Temperature 21.0 - 260 $^\circ\text{C}$
	12.7 $\mu\text{m/m}\cdot^\circ\text{C}$ @Temperature 20.0 $^\circ\text{C}$
	13.7 $\mu\text{m/m}\cdot^\circ\text{C}$ @Temperature 250 $^\circ\text{C}$
	13.7 $\mu\text{m/m}\cdot^\circ\text{C}$ @Temperature 21.0 - 540 $^\circ\text{C}$
	13.9 $\mu\text{m/m}\cdot^\circ\text{C}$ @Temperature 21.0 - 540 $^\circ\text{C}$
	14.5 $\mu\text{m/m}\cdot^\circ\text{C}$ @Temperature 500 $^\circ\text{C}$
Specific Heat Capacity	0.475 J/g- $^\circ\text{C}$
Thermal Conductivity	44.5 W/m-K

Component Elements Properties	Metric
Carbon, C	0.37 - 0.43 %
Chromium, Cr	0.70 - 0.90 %
Iron, Fe	95.195 - 96.33 %
Manganese, Mn	0.60 - 0.80 %
Molybdenum, Mo	0.20 - 0.30 %
Nickel, Ni	1.65 - 2.0 %
Phosphorus, P	≤ 0.035 %
Silicon, Si	0.15 - 0.30 %
Sulfur, S	≤ 0.040 %



Materiais Estruturais

Metálicos

Granitos

Naturais

Material natural com composição e tamanho de grão variados, amplamente utilizado como elemento estrutural de sistemas de precisão

Vantagens

Estabilidade dimensional

Estabilidade térmica

Amortecimento

inexistência de tensões residuais

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

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

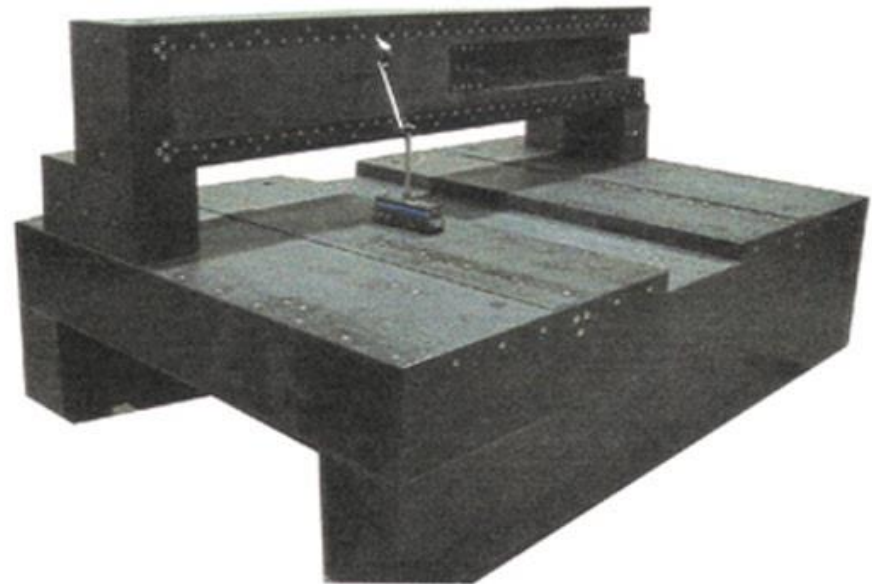


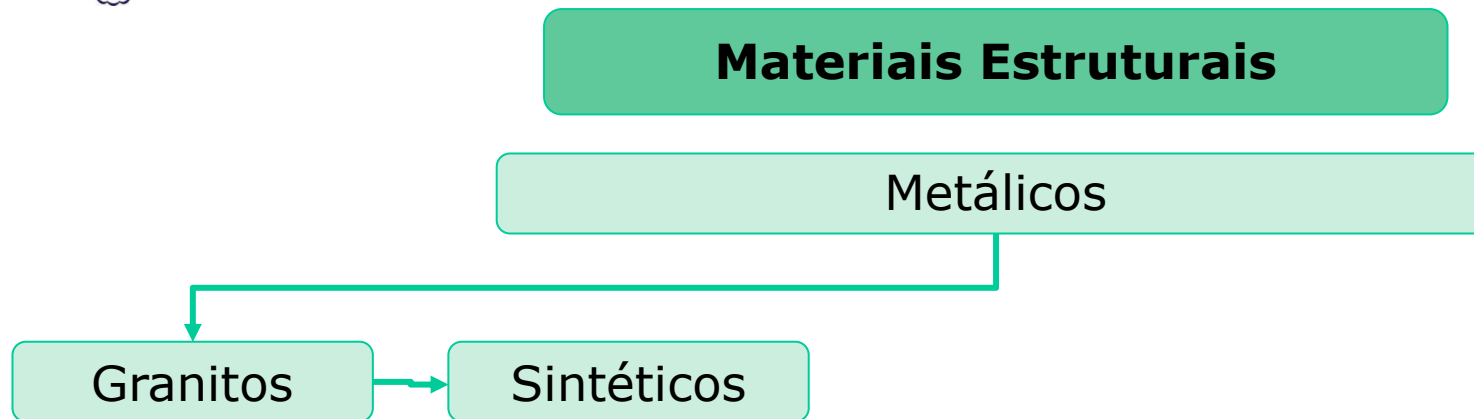
Materiais Estruturais

Metálicos

Granitos

Naturais





- Granitos sintéticos ou Granito Epoxy são uma mistura de resina epóxi com pós de granito de dimensões definidas geralmente utilizado como material alternativo para a construção e bases e estruturas de sistemas de precisão.
- Granitos sintéticos são utilizados em substituição aos ferro-fundido e aço devido a sua capacidade de amortecimento de vibrações, durabilidade, facilidade de manipulação, capacidade de forma e menor custo.



Materiais Estruturais

Metálicos

Granitos

Sintéticos

Chevron Phillips Marlex® HHM TR-480Z/M362 Natural high density ethylene hexene copolymer/black concrete

Physical Properties	Metric
Density	0.944 g/cc
Environmental Stress Crack Resistance	>= 1000 hour @Temperature 50.0 °C
Melt Flow	0.110 g/10 min @Load 2.16 kg, Temperature 190 °C
High Load Melt Index	10.0 g/10 min @Load 21.6 kg, Temperature 190 °C
Mechanical Properties	Metric
Tensile Strength, Ultimate	34.0 MPa
Tensile Strength, Yield	22.0 MPa
Elongation at Break	>= 500 %
Flexural Modulus	0.960 GPa
Thermal Properties	Metric
Brittleness Temperature	<= -90.0 °C
Processing Properties	Metric
Processing Temperature	193 - 216 °C

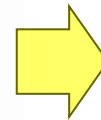


Materiais Estruturais

Metálicos

Granitos

Sintéticos





Materiais Estruturais

Metálicos

Granitos

Sintéticos



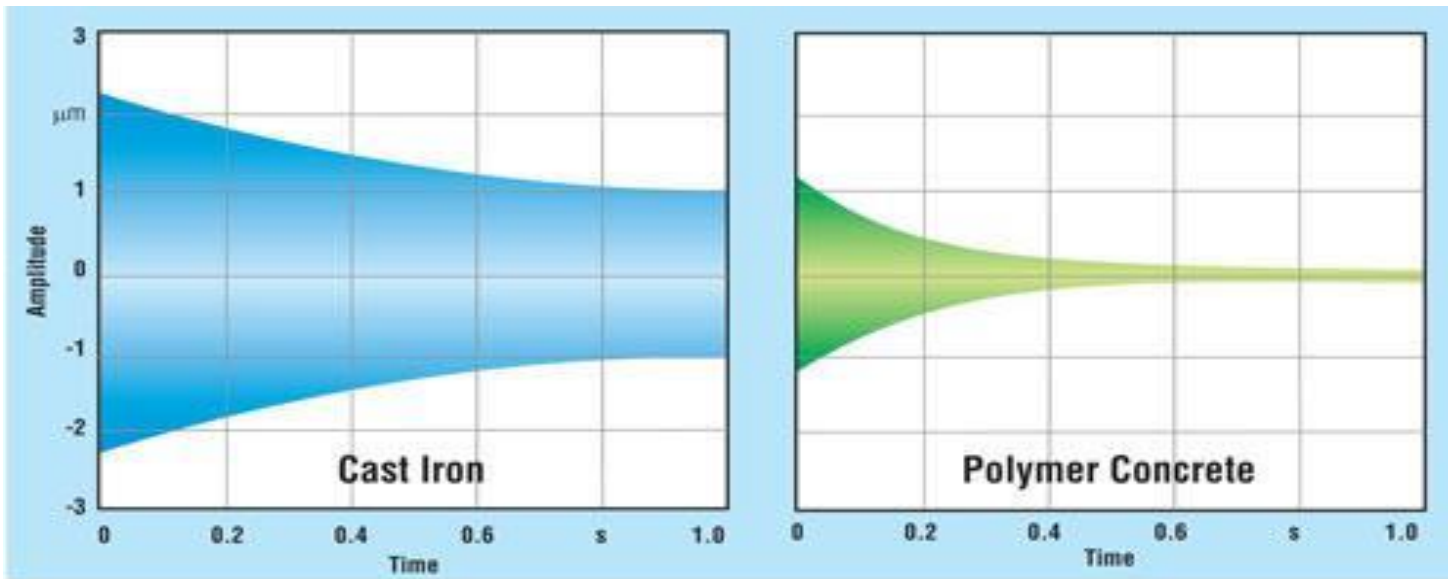


Materiais Estruturais

Metálicos

Granitos

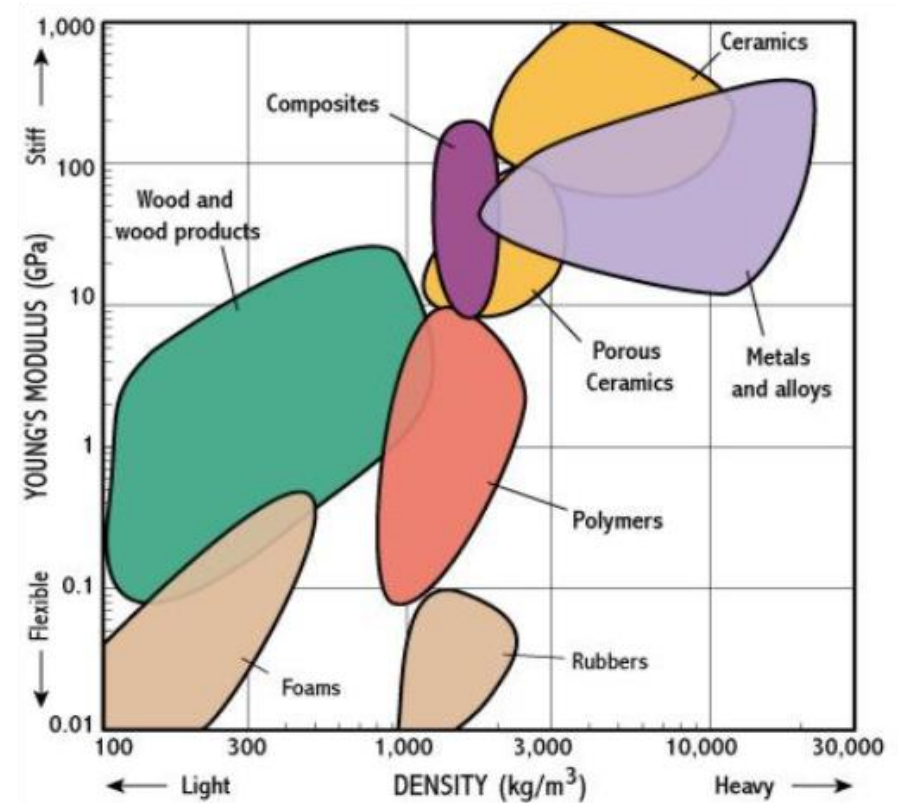
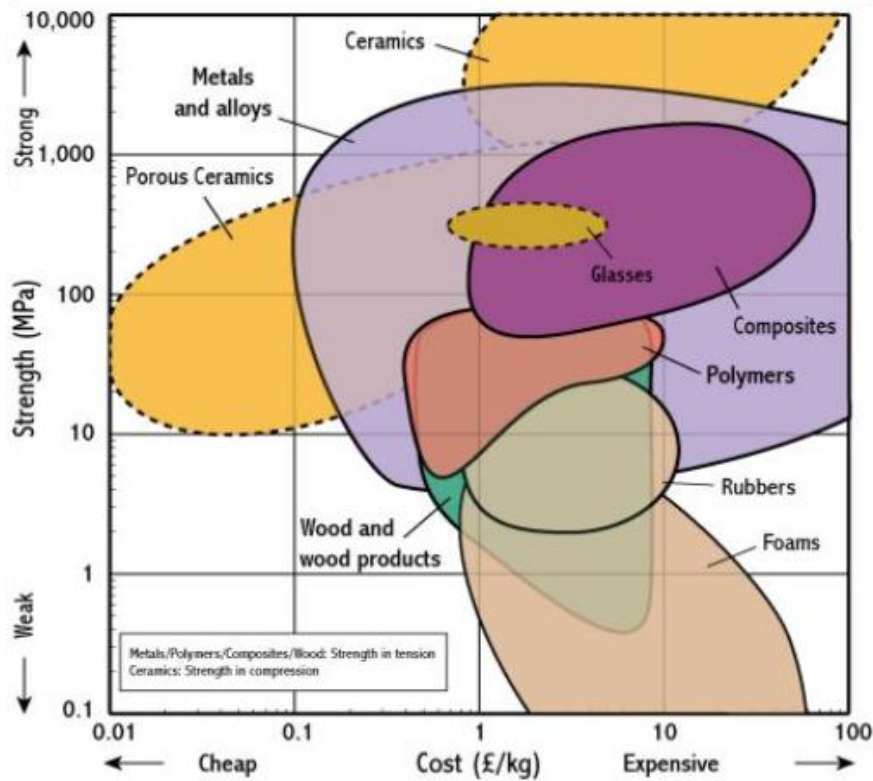
Sintéticos





Materiais Estruturais

Cerâmicos





Materiais Estruturais

Cerâmicos

Alumina

99,9% Al_2O_3

Alumina é uma das cerâmicas mais robustas, com excelentes propriedades estruturais, resistência ao desgaste e corrosão, além da capacidade de isolamento térmico e elétrico.

Aplicações

- Componentes de câmaras para semicondutores
- Peças para transporte de Wafers de semicondutores
- Componentes gerais de sistemas de precisão
- Peças resistentes a altas temperaturas e isoladores



Materiais Estruturais

Cerâmicos

Alumina

99,9% Al_2O_3

Chemical Properties	Metric
Molar Volume	25.575 cc/mol

Mechanical Properties	Metric
Hardness, Knoop	1700 - 2200
Hardness, Vickers	1365
Vickers Microhardness	2085
Hardness, Mohs	9.0
Abrasive Hardness	1000
Drilling Hardness	189000
Tensile Strength, Ultimate	300 MPa
Modulus of Elasticity	370 GPa
Flexural Strength	400 MPa
Compressive Strength	3000 MPa
	1900 MPa @Temperature 1000 °C
Poissons Ratio	0.22
Fracture Toughness	4.00 MPa·m ^{1/2}
Shear Modulus	150 GPa

Thermal Properties	Metric
Heat of Fusion	1093 J/g
Heat of Vaporization	19380 J/g
CTE, linear	0.600 $\mu\text{m}/\text{m}\cdot^\circ\text{C}$ @Temperature -173 °C
	3.30 $\mu\text{m}/\text{m}\cdot^\circ\text{C}$ @Temperature -73.0 °C
	5.50 $\mu\text{m}/\text{m}\cdot^\circ\text{C}$ @Temperature 25.0 °C
	7.10 $\mu\text{m}/\text{m}\cdot^\circ\text{C}$ @Temperature 127 °C
	7.50 $\mu\text{m}/\text{m}\cdot^\circ\text{C}$ @Temperature 227 °C
	7.90 $\mu\text{m}/\text{m}\cdot^\circ\text{C}$ @Temperature 327 °C
	8.50 $\mu\text{m}/\text{m}\cdot^\circ\text{C}$ @Temperature 527 °C
	9.10 $\mu\text{m}/\text{m}\cdot^\circ\text{C}$ @Temperature 727 °C
	9.60 $\mu\text{m}/\text{m}\cdot^\circ\text{C}$ @Temperature 927 °C
	10.1 $\mu\text{m}/\text{m}\cdot^\circ\text{C}$ @Temperature 1127 °C
	10.5 $\mu\text{m}/\text{m}\cdot^\circ\text{C}$ @Temperature 1327 °C



Materiais Estruturais

Cerâmicos

Alumina

99,9% Al_2O_3

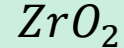




Materiais Estruturais

Cerâmicos

Óxido de Zircônia



Óxido de Zircônia é uma das cerâmicas mais resistentes disponíveis. É um dos melhores materiais quando os requisitos de resistência estrutural e resistência a corrosão se fazem prioritários, além de ter uma excelente resistência a abrasão

Aplicações

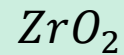
- Guias para transporte de semicondutores
- Ferramentas de corte industrial
- Componentes de sistemas de ultra precisão
- Peças resistentes a abrasão




Materiais Estruturais

Cerâmicos

Óxido de Zircônia



Physical Properties	Metric
Density	5.68 g/cc 6.10 g/cc
Molecular Weight	123.223 g/mol
Electrical Properties	Metric
Magnetic Susceptibility	-0.0000138
Thermal Properties	Metric
Heat of Fusion	706 J/g
CTE, linear 	7.00 $\mu\text{m}/\text{m}\cdot^\circ\text{C}$ @Temperature 20.0 °C 12.0 $\mu\text{m}/\text{m}\cdot^\circ\text{C}$ @Temperature 20.0 °C
Thermal Conductivity	1.675 W/m-K
Melting Point	2681 - 2847 °C





Materiais Estruturais

Cerâmicos

Zerodur

vidro cerâmico

Physical Properties	Metric
Density	2.53 g/cc
Mechanical Properties	Metric
Modulus of Elasticity	91.0 GPa
Poissons Ratio	0.240
Thermal Properties	Metric
CTE, linear	0.0500 $\mu\text{m}/\text{m}\cdot^\circ\text{C}$ <small>@Temperature 20.0 - 300 °C</small>
Specific Heat Capacity	0.821 J/g $\cdot^\circ\text{C}$
Thermal Conductivity	1.64 W/m-K <small>@Temperature 100 °C</small>
Optical Properties	Metric
Refractive Index	1.5394
	1.5447
	1.5447
	1.5544



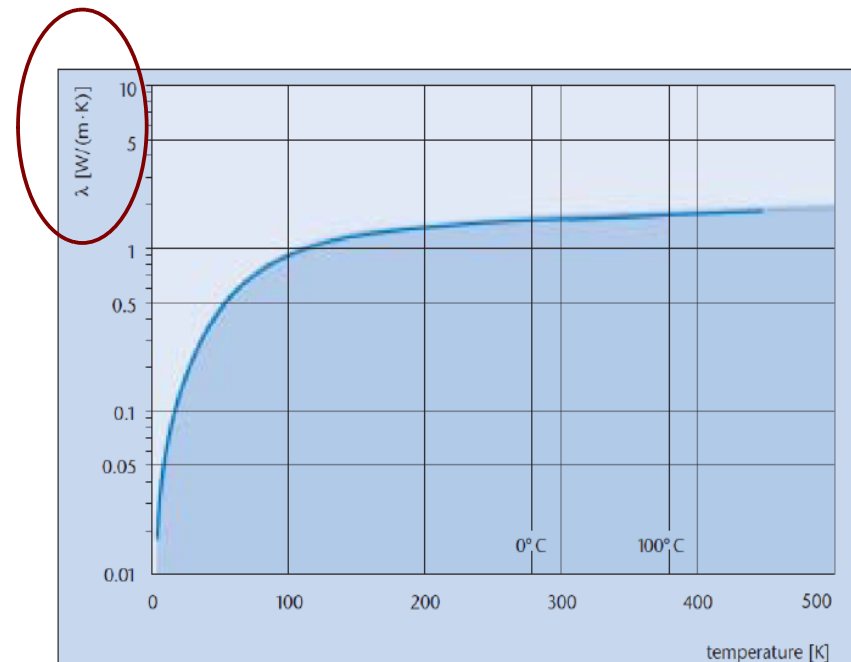
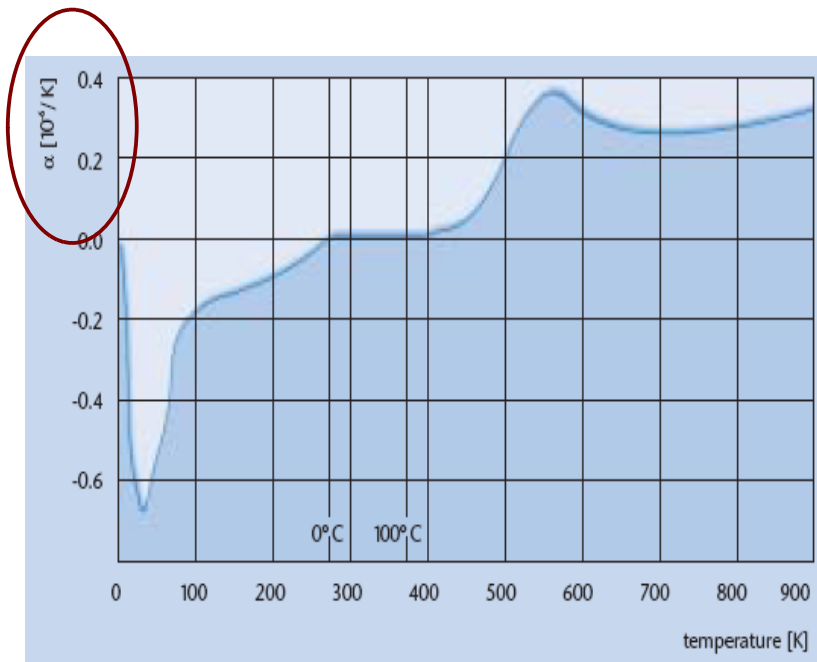
Materiais Estruturais

Cerâmicos

Zerodur

vidro cerâmico

Thermal conductivity λ at 20°C [W/(m · K)]	1.46
Thermal diffusivity index a at 20°C [10^{-6} m ² /s]	0.72
Specific heat capacity c_p at 20°C [J/(g·K)]	0.80



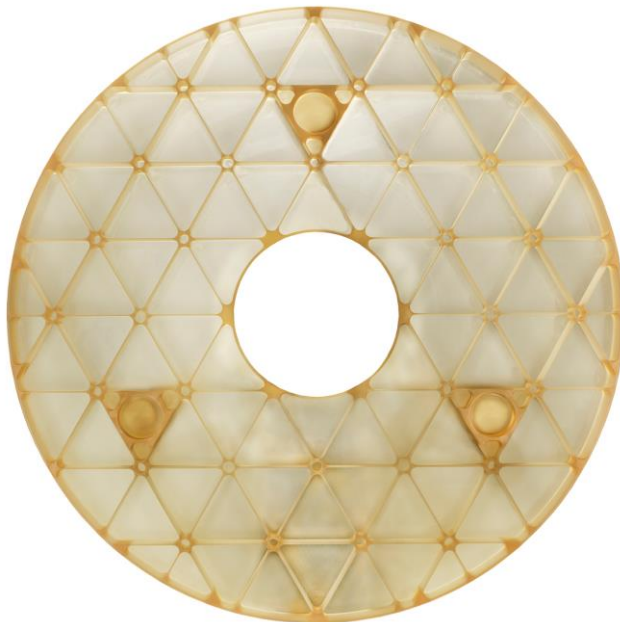


Materiais Estruturais

Cerâmicos

Zerodur

vidro cerâmico



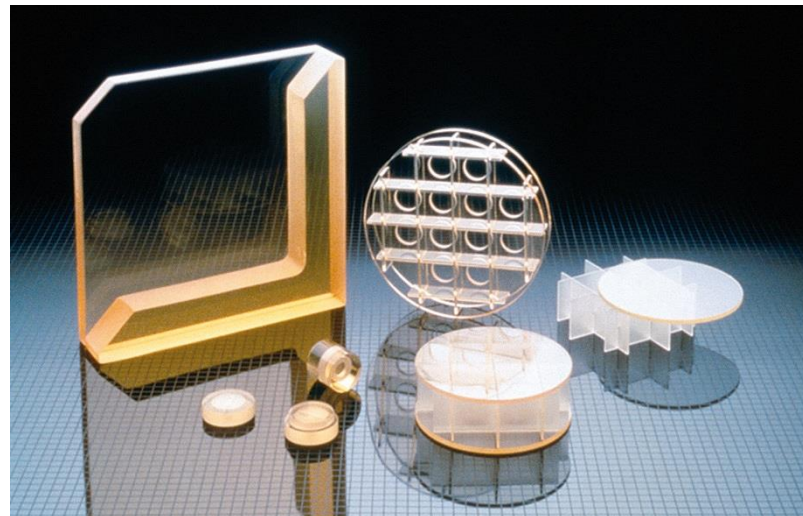
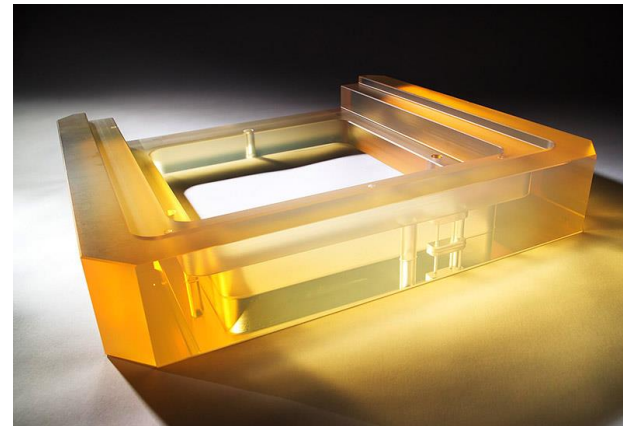
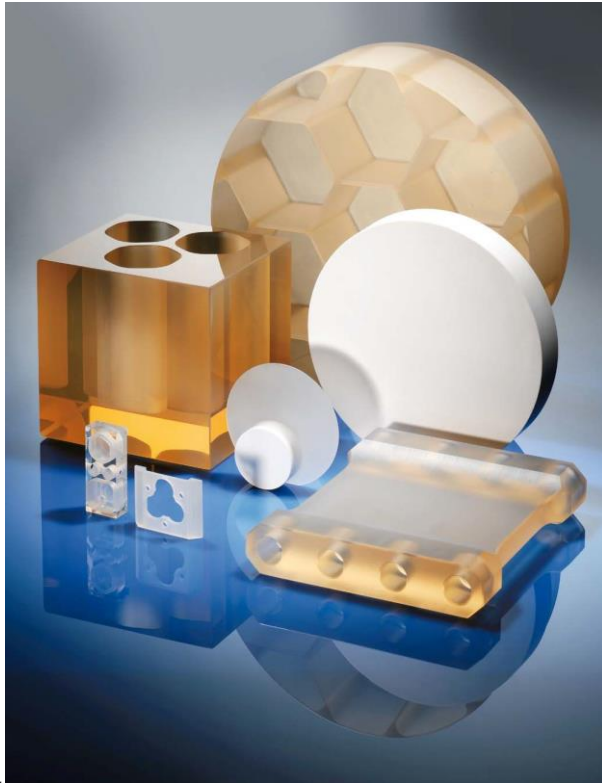


Materiais Estruturais

Cerâmicos

Zerodur

vidro cerâmico



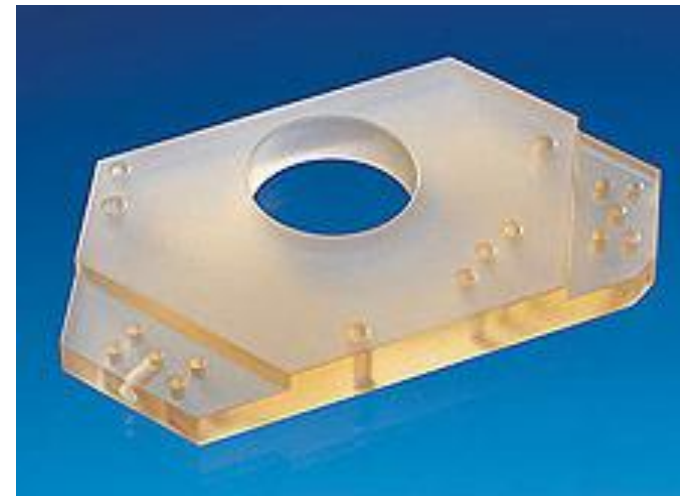
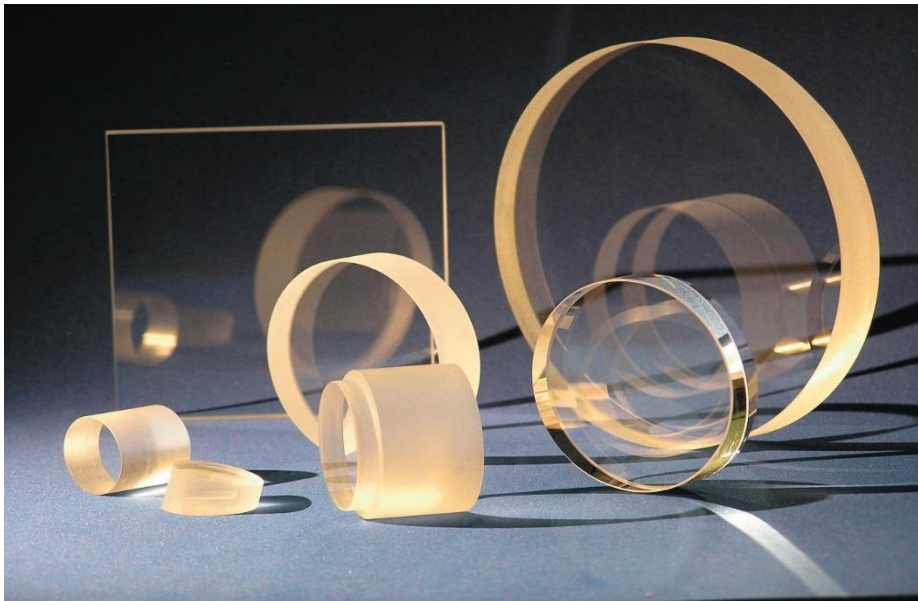


Materiais Estruturais

Cerâmicos

Zerodur

vidro cerâmico





Materiais Estruturais

Cerâmicos

Carboneto de silício

SiC

Carboneto de silício é um material leve, extremamente duro e resistente a corrosão o que o torna ideal para aplicações com requisitos de resistência ao desgaste, ou ambientes abrasivamente agressivos. Carboneto de silício também oferece excelente condutividade térmica e alto módulo de Young.

Aplicações

- Equipamentos de processamento de Semicondutores
- Componentes de emprego geral
- Componentes resistentes a abrasão



Materiais Estruturais


Cerâmicos

Carboneto de silício

SiC

Physical Properties	Metric
Density	3.10 g/cc
	3.21 g/cc
a Lattice Constant	3.0817 Å
c Lattice Constant	15.1183 Å

Mechanical Properties	Metric
Modulus of Elasticity	410 GPa
Compressive Strength	4600 MPa
Poissons Ratio	0.14
Fracture Toughness	4.60 MPa-m ^{1/2}
Shear Modulus	180 GPa

Thermal Properties	Metric
Specific Heat Capacity	0.670 J/g-°C
Thermal Conductivity 	77.5 W/m-K @Temperature 400 °C
	125.6 W/m-K @Temperature 200 °C
Melting Point	2797 °C

Optical Properties	Metric
Refractive Index	2.67

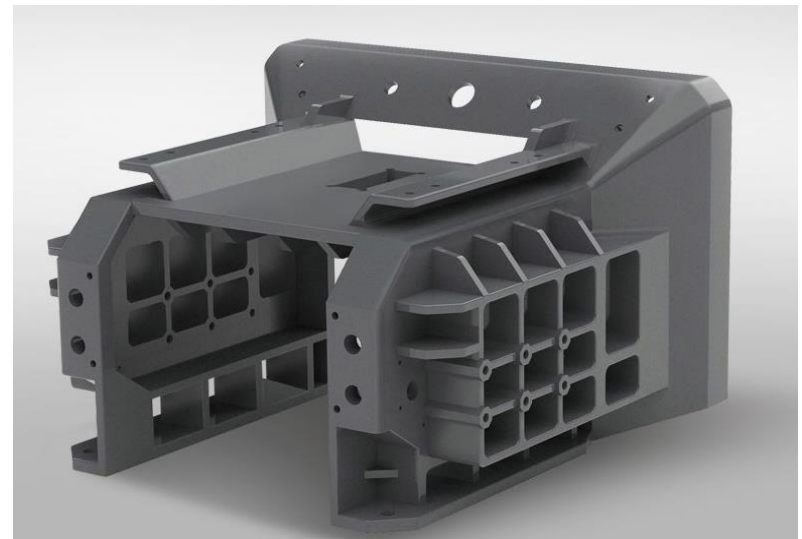
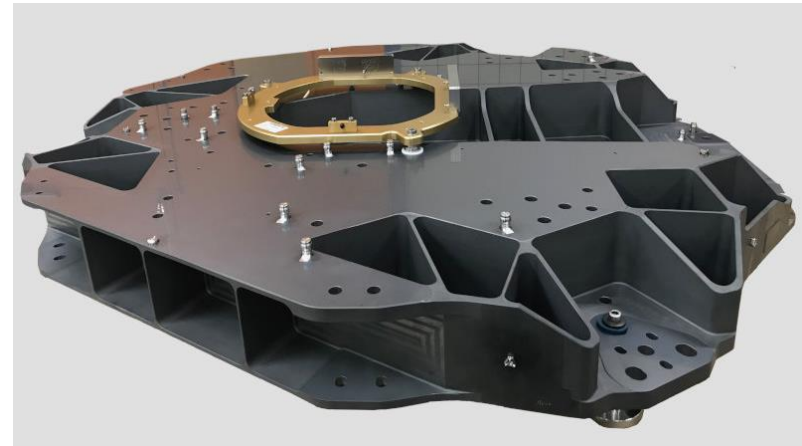


Materiais Estruturais

Cerâmicos

Carboneto de silício

SiC





Materiais Estruturais

Cerâmicos

Nitreto de silício

SiN

Cerâmicas de Nitreto de Silício oferecem alta resistência a choques térmicos e mecânicos. Estas propriedades combinadas com sua elevada resistência mecânica fazem do SiN uma excelente escolha para aplicações que envolvam alta temperatura e carregamentos mecânicos.

Aplicações

- Equipamentos de processamento de Semicondutores
- Componentes de emprego geral
- Componentes resistentes ao calor



Materiais Estruturais

Cerâmicos

Nitreto de silício

SiN

Physical Properties	Metric
Density	3.20 g/cc

Mechanical Properties	Metric
Hardness, Vickers	1600
Modulus of Elasticity	260 - 320 GPa
Flexural Strength	900 MPa
Poissons Ratio	0.25
Fracture Toughness	5.80 - 8.50 MPa-m ^{1/2}
Shear Modulus	104 - 128 GPa

Thermal Properties	Metric
CTE, linear	2.80 $\mu\text{m}/\text{m}\cdot^\circ\text{C}$ @Temperature 20.0 °C



Materiais Estruturais

Cerâmicos

Nitreto de silício

SiN





Materiais Estruturais

Cerâmicos

Nitreto de Alumínio

AlN

Nitreto de Alumínio é frequentemente utilizada por sua condutividade térmica e resistência à ataque por plasmas de fluoridos.

Aplicações

- Componentes de câmaras para processamento de semicondutores
- Substrato para aquecimento por radiação



Materiais Estruturais

Cerâmicos

Nitreto de Alumínio

AlN

Physical Properties	Metric
Density	3.26 g/cc
a Lattice Constant	3.111 Å
c Lattice Constant	4.978 Å
Molecular Weight	40.989 g/mol

Electrical Properties	Metric
Dielectric Constant	8.8 - 8.9
Band Gap	6.02 eV

Thermal Properties	Metric
CTE, linear	4.50 $\mu\text{m}/\text{m}\cdot^\circ\text{C}$ <small>@Temperature $\leq 1000^\circ\text{C}$</small>
Thermal Conductivity	285 W/m-K
Melting Point	3200 $^\circ\text{C}$

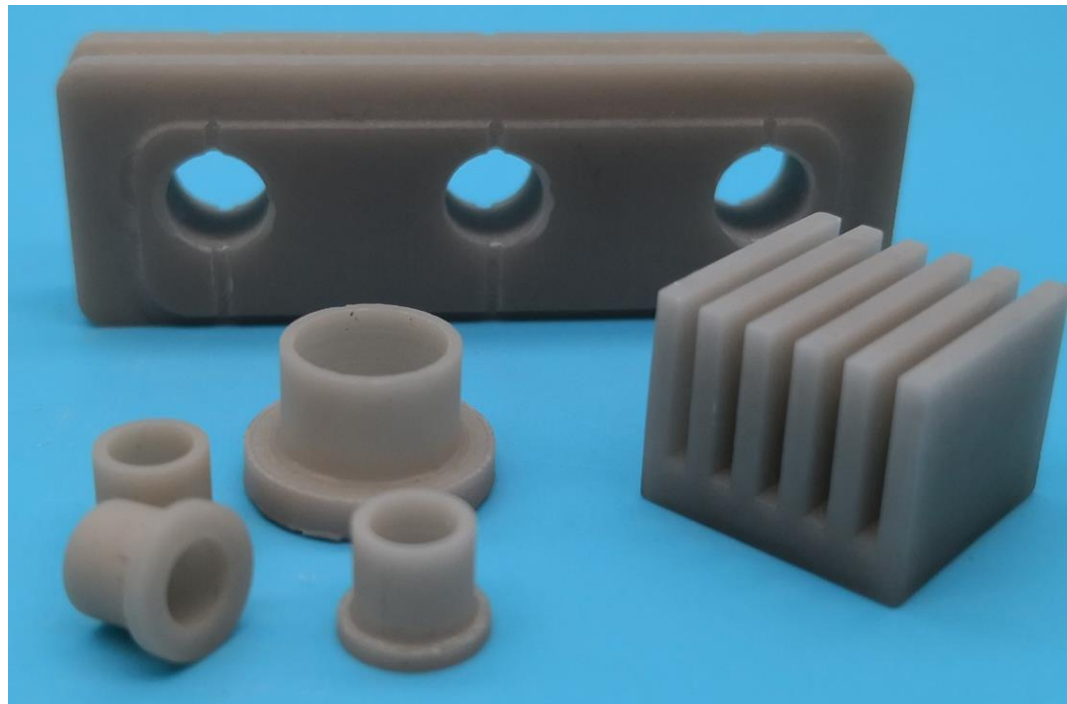


Materiais Estruturais

Cerâmicos

Nitreto de Alumínio

AlN





Estruturas

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





ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

FIM DA AULA