



ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Engenharia de Precisão

PMR 3501 – A26

Materiais em Engenharia de Precisão

2023.2



Materiais

Componentes estruturais

Componentes finais





Materiais

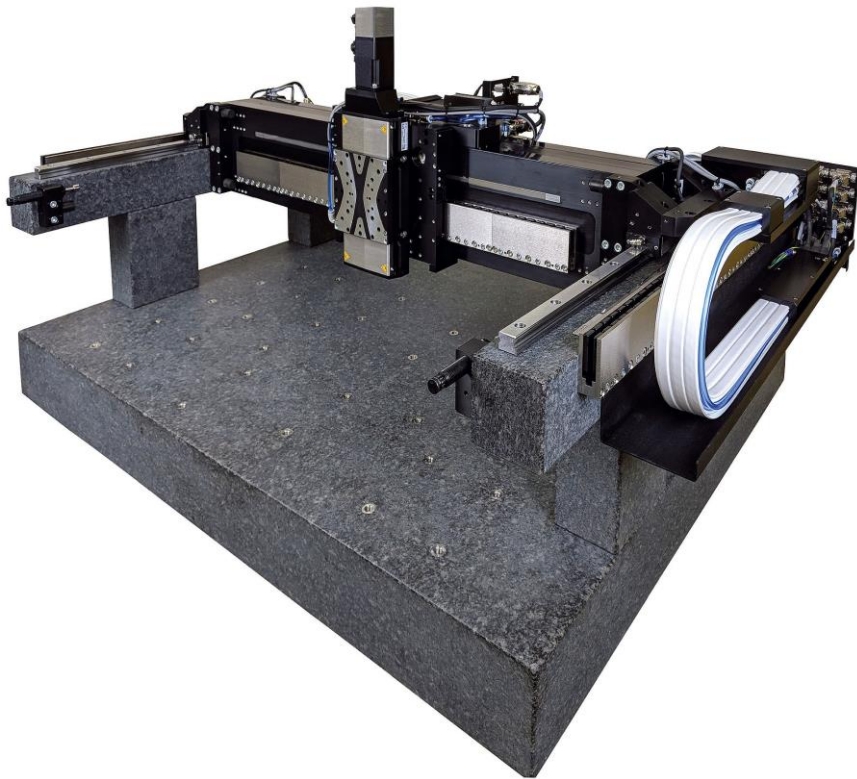
Estruturais

- 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

Principais requisitos para materiais Estruturais

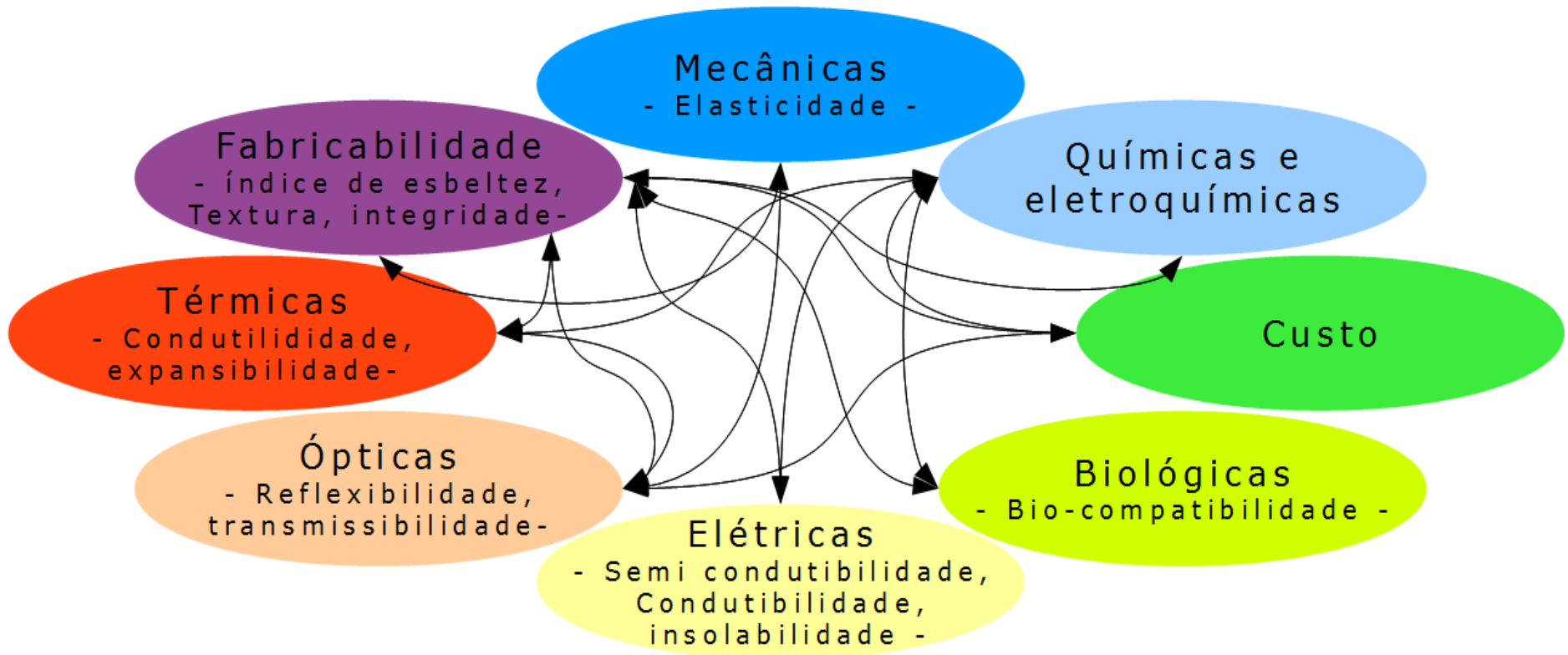


- resistência mecânica
- elasticidade
- estabilidade mecânica
- **estabilidade térmica**
- estabilidade química
- **amortecimento de vibrações**
- fabricabilidade
- acessibilidade-disponibilidade
- custo



Materiais

Estruturais





Materiais

Estruturais

Lei de Hooke define o comportamento linear de materiais isotrópicos:

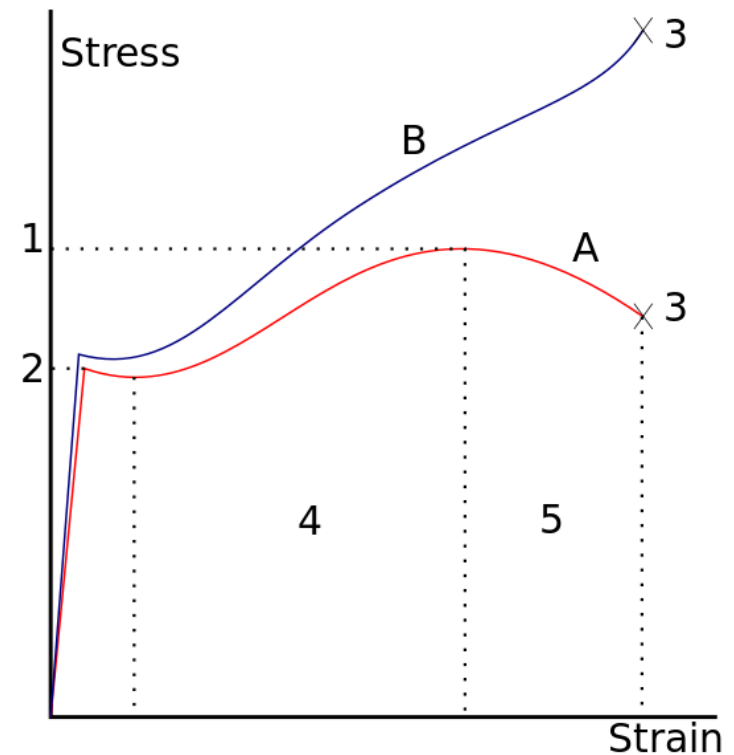
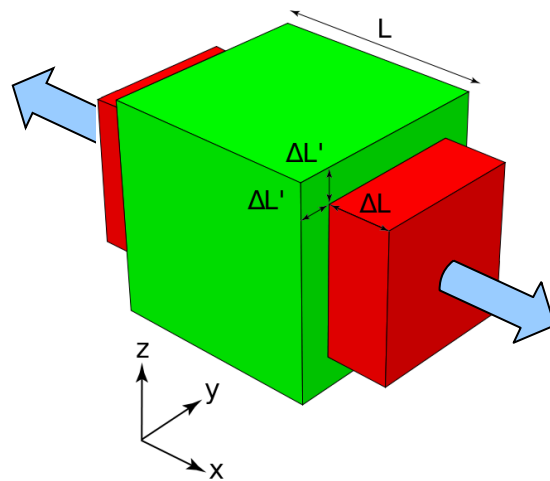
Relação de Poisson

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x - \eta(\sigma_y + \sigma_z)}{E} + \alpha\Delta T$$

$$\varepsilon_y = \frac{\sigma_y - \eta(\sigma_x + \sigma_z)}{E} + \alpha\Delta T$$

$$\varepsilon_z = \frac{\sigma_z - \eta(\sigma_x + \sigma_y)}{E} + \alpha\Delta T$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{G} \quad \gamma_{xz} = \frac{\tau_{xz}}{G} \quad \gamma_{yz} = \frac{\tau_{yz}}{G} \quad G = \frac{E}{2(1+\nu)}$$



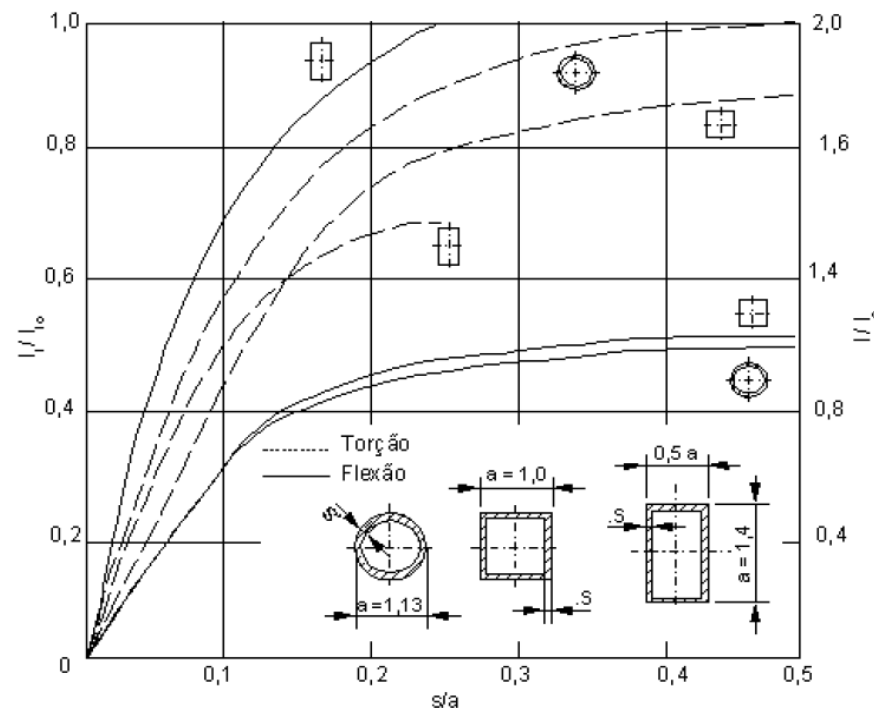
Stress–strain curve for low-carbon steel



Materiais

Estruturais

- Se um dos requisitos funcionais de uma estrutura for alta rigidez, então as deformações não vão afetar o alinhamento dos componentes.

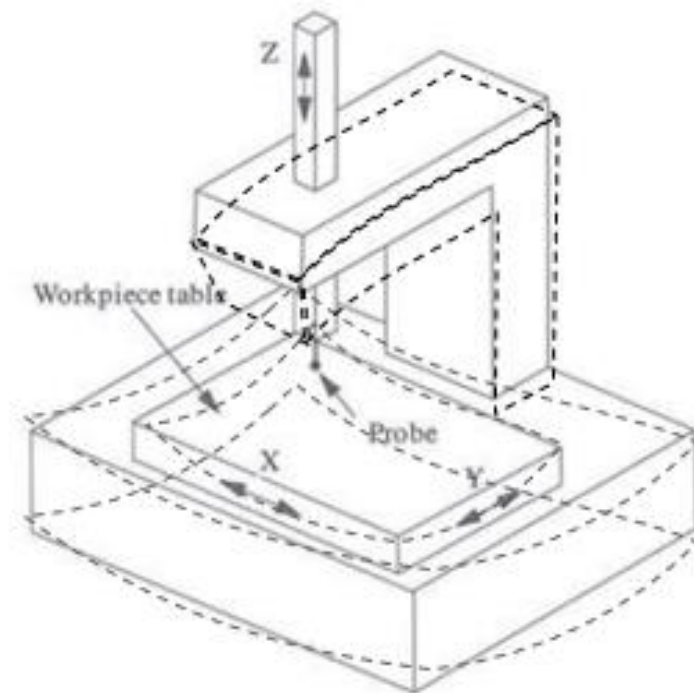
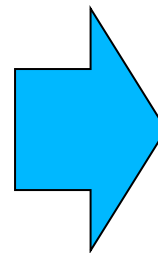
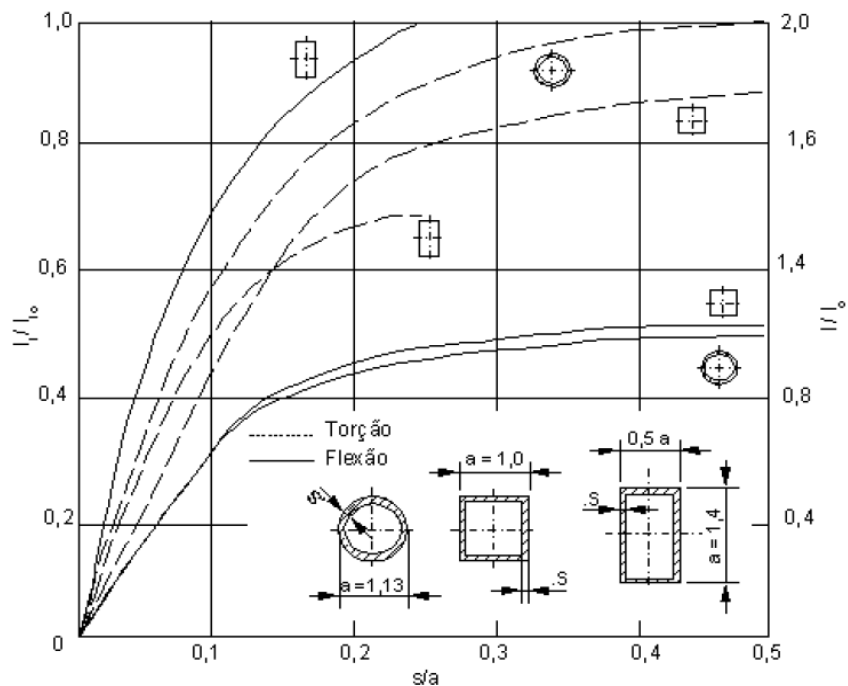




Materiais

Estruturais

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

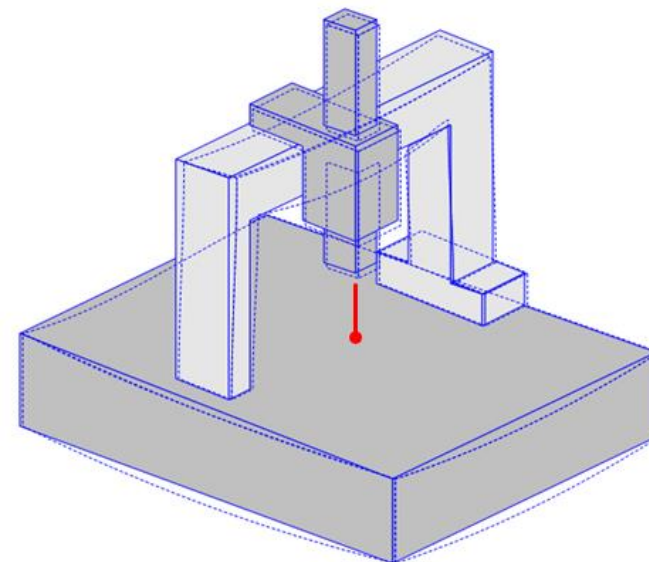
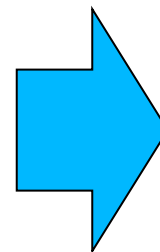
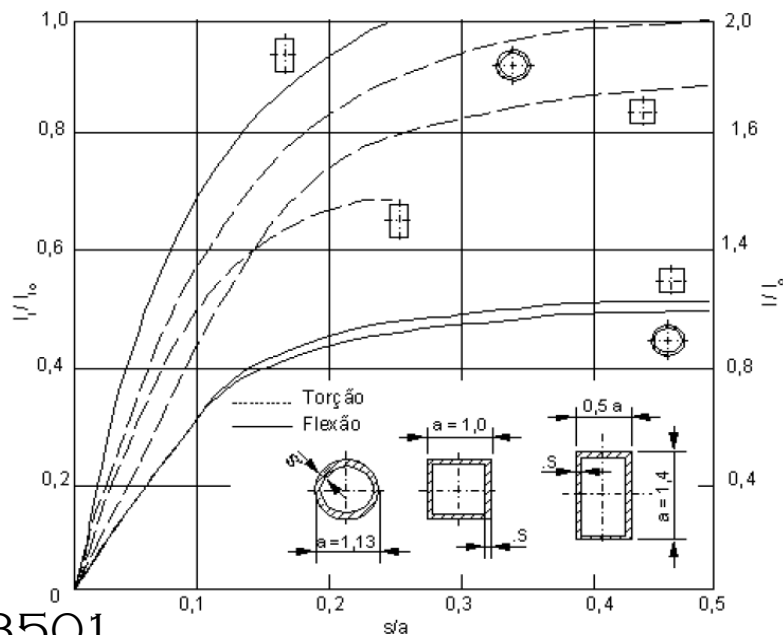




Materiais

Estruturais

- Se peso (inércia) for um requisitos então uma solução de compromisso deve ser alcançada.
- Diferentes aplicações e diferentes requisitos tem custos diferentes





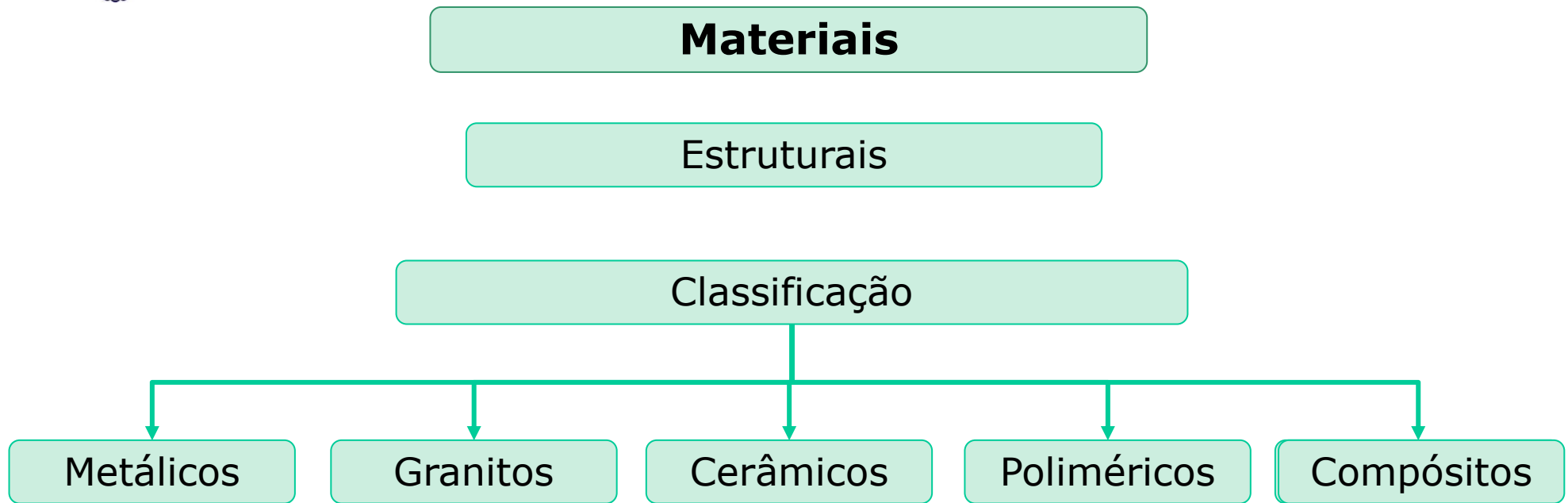
Materiais

Estruturais

Seleção

A seleção de um material estrutural depende

- dimensões
- peso
- arranjo estrutural
- fabricabilidade
- facilidade transporte e manipulação
- requisitos e projeto
- outros





Materiais

Estruturais

Ferro Fundido

| Physical Properties | Metric |
|---------------------|------------------|
| Density | 5.54 - 7.81 g/cc |

| Mechanical Properties | Metric |
|----------------------------|---------------------------------|
| Hardness, Brinell | 120 - 807 |
| Hardness, Knoop | 162 - 906 |
| Hardness, Rockwell B | 40.0 - 97.0 |
| Hardness, Rockwell C | 11.4 - 65.0 |
| Hardness, Vickers | 151 - 871 |
| Tensile Strength, Ultimate | 118 - 1650 MPa |
| Tensile Strength, Yield | 65.5 - 1450 MPa |
| Elongation at Break | 1.00 - 25.0 % |
| Reduction of Area | 2.00 - 10.0 % |
| Modulus of Elasticity | 62.1 - 240 GPa |
| Flexural Yield Strength | 248 - 655 MPa |
| Compressive Yield Strength | 331 - 2520 MPa |
| Poissons Ratio | 0.240 - 0.370 |
| Charpy Impact | 6.78 - 27.1 J |
| Charpy Impact, Unnotched | 4.07 - 123 J |
| Izod Impact Unnotched | 4.00 - 244 J |
| Fatigue Strength | 69.0 - 510 MPa |
| Fracture Toughness | 44.0 - 109 MPa-m ^{1/2} |
| Machinability | 0.000 - 52.0 % |
| Shear Modulus | 27.0 - 67.6 GPa |
| Shear Strength | 149 - 1480 MPa |

| Electrical Properties | Metric |
|------------------------|------------------------------|
| Electrical Resistivity | 0.00000500 - 0.000240 ohm-cm |
| Magnetic Permeability | 100 - 750 |

| 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 $\cdot^\circ\text{C}$ |
| 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 % |





Materiais

Estruturais


Aços

Aços são amplamente utilizados na construção de sistemas de precisão.

Podem ser utilizados aços carbonos de construção geral até aços alta liga, a seleção depende dos requisitos do sistema.

| Physical Properties | Metric |
|---------------------|-----------|
| Density | 7.85 g/cc |

| Mechanical Properties | Metric |
|----------------------------|-----------|
| Hardness, Brinell | 167 - 229 |
| Tensile Strength, Ultimate | 569 MPa |
| Tensile Strength, Yield | 343 MPa |
| Elongation at Break | 20.0 % |
| Modulus of Elasticity | 205 GPa |
| Poissons Ratio | 0.290 |
| Machinability | 55 % |
| Shear Modulus | 80.0 GPa |

| Thermal Properties | Metric |
|---|---|
| CTE, linear  | 11.5 $\mu\text{m}/\text{m}\cdot^\circ\text{C}$ @Temperature 20.0 - 100 °C |
| | 13.0 $\mu\text{m}/\text{m}\cdot^\circ\text{C}$ @Temperature 0.000 - 300 °C |
| | 14.0 $\mu\text{m}/\text{m}\cdot^\circ\text{C}$ @Temperature 0.000 - 500 °C |
| Specific Heat Capacity | 0.486 J/g $\cdot^\circ\text{C}$ @Temperature 50.0 - 100 °C |
| Thermal Conductivity | 49.8 W/m-K |

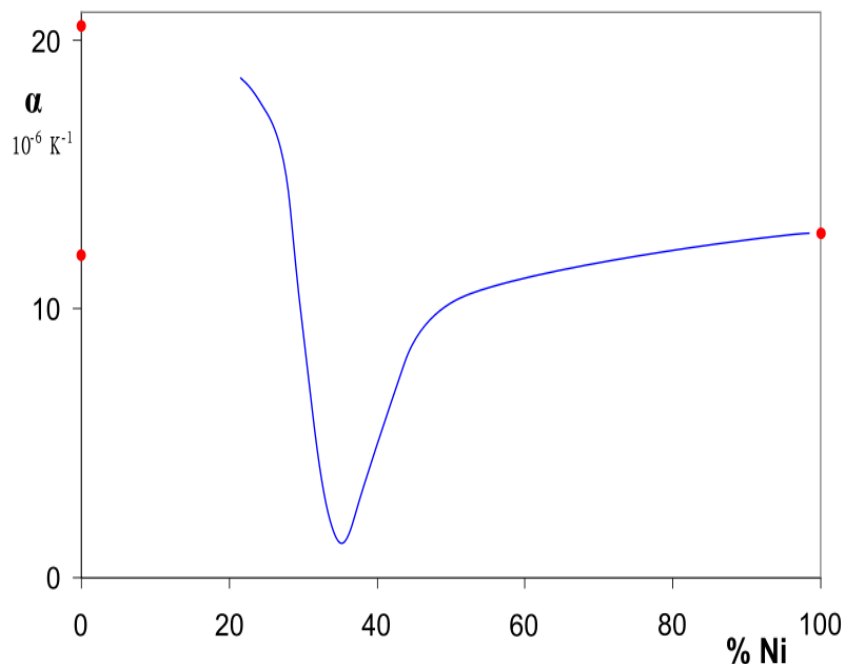


Materiais

Estruturais


Invar 36

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



| 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 |

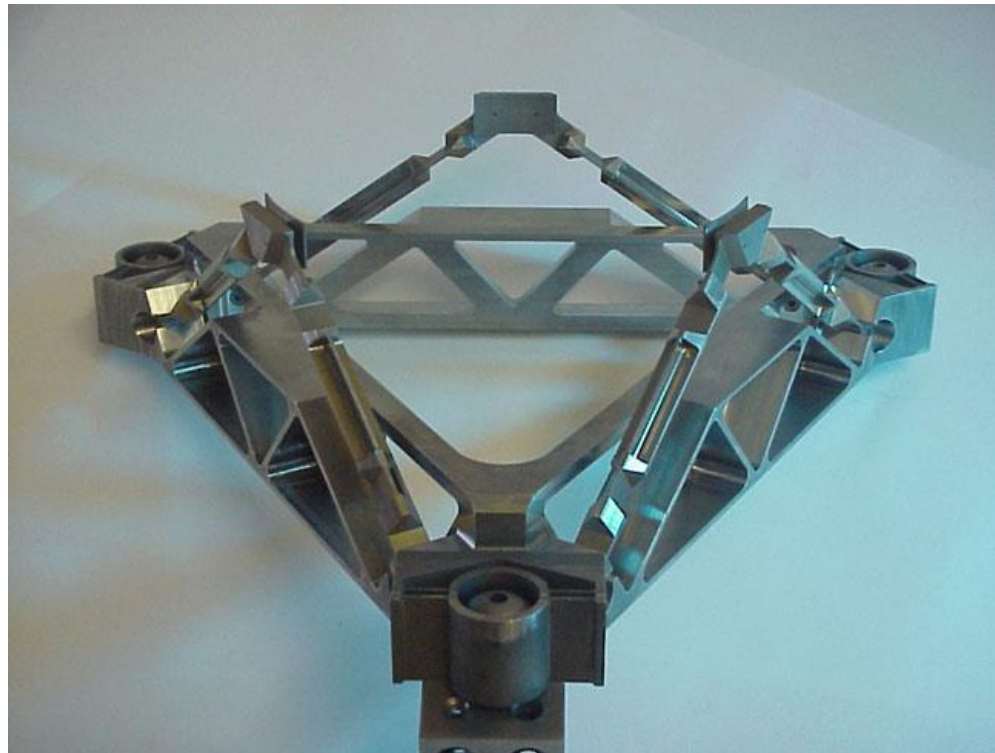
| Thermal Properties | Metric |
|---|--|
| CTE, linear  | 1.30 $\mu\text{m/m}^\circ\text{C}$ @Temperature 93.0 °C |
| | 4.18 $\mu\text{m/m}^\circ\text{C}$ @Temperature 260 °C |
| | 7.60 $\mu\text{m/m}^\circ\text{C}$ @Temperature 371 °C |
| Specific Heat Capacity | 0.515 J/g $^\circ\text{C}$ |
| Thermal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



Materiais

Estruturais

- Invar 36







Materiais

Estruturais

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 internas

Desvantagens

Geração de formas



Materiais

Estruturais

Granitos naturais



| 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 $\cdot^\circ\text{C}$ |
| Thermal Conductivity | 1.20 - 4.20 W/m-K |



Materiais

Estruturais

Granitos sintéticos

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

Concreto polimérico

Concreto polimérico é um tipo de concreto que utiliza polímeros como ligantes em substituição ao cimento.

Resinas termo resistentes são o principal tipo de polímero utilizados como ligante devido a sua elevada estabilidade térmica, resistência mecânica e química.

O concreto polimérico também pode ser acrescido de agregados tais como sílica, quartzo, granito, entre outros.



Materiais

Estruturais

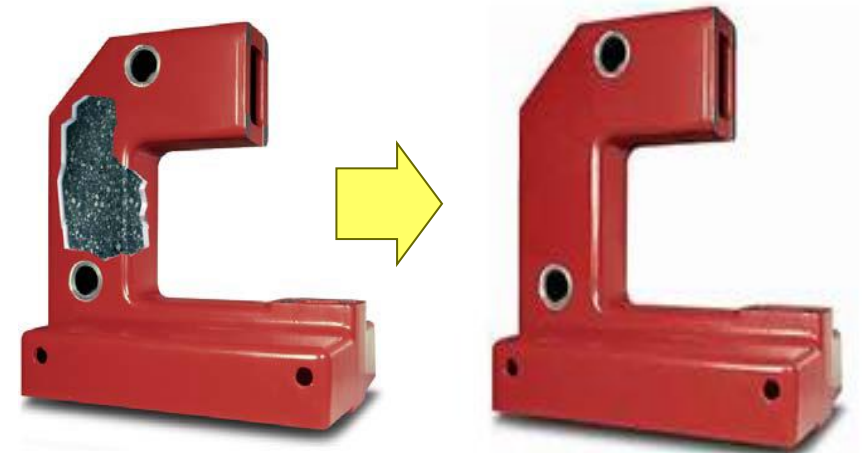
Granito Sintético / Concreto polimérico

| 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

Granito Sintético / Concreto polimérico

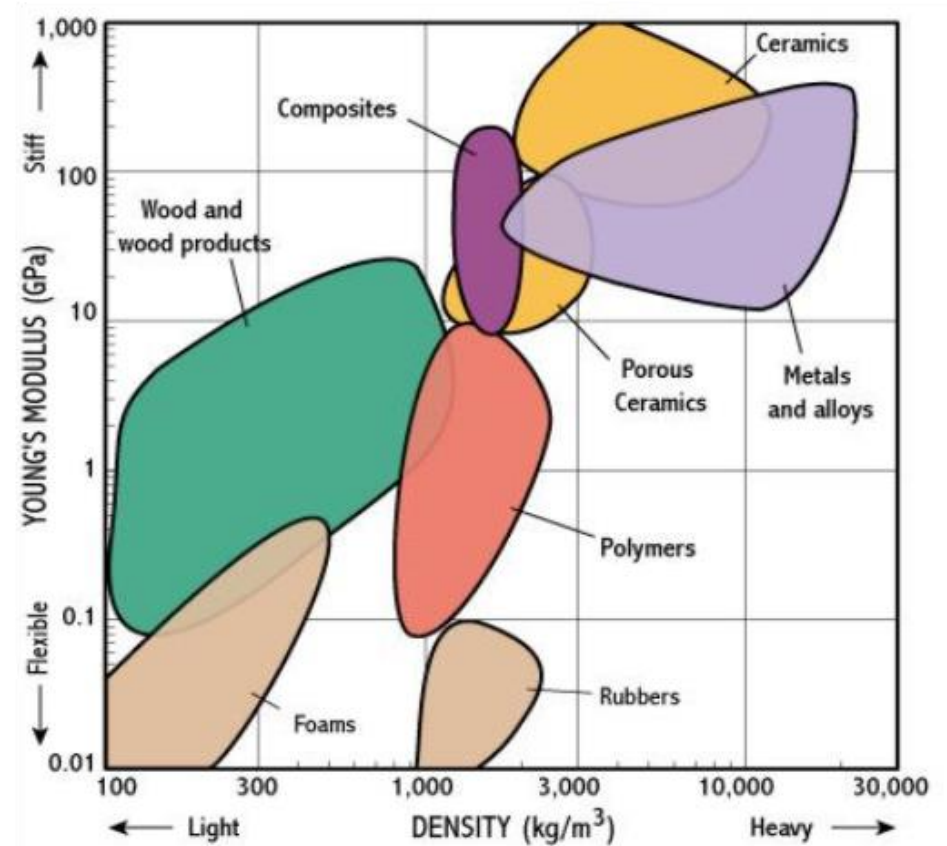
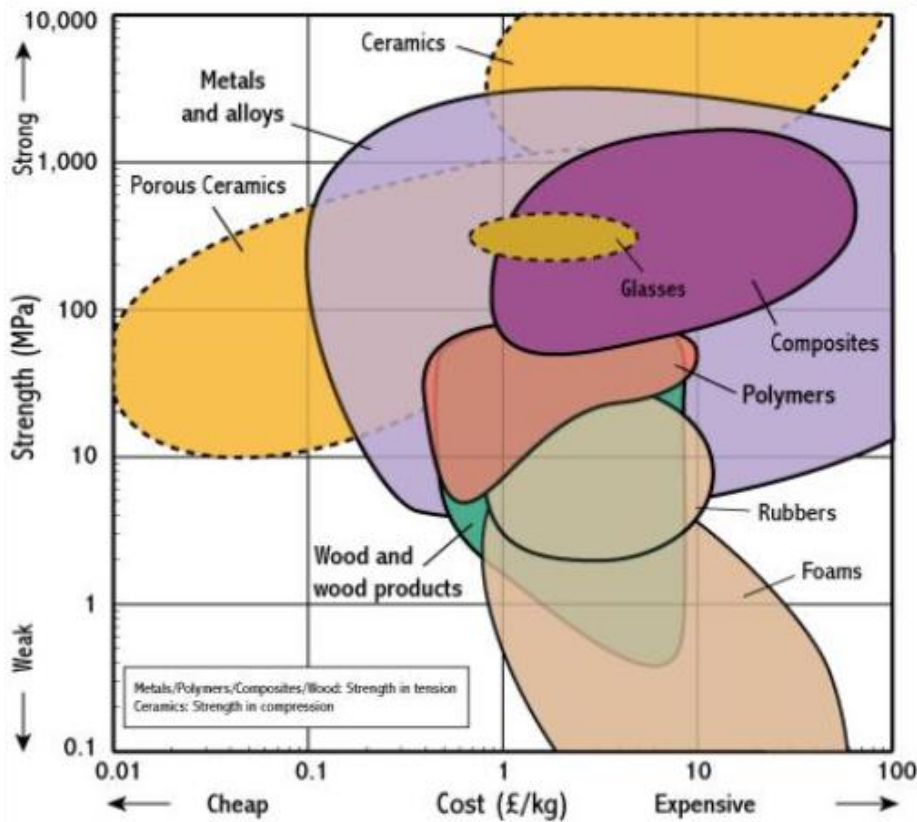




Materiais

Estruturais

Cerâmicas





Materiais

Estruturais

Cerâmica – Alumina 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 elétricos



Materiais

Estruturais

Cerâmica – Alumina Al_2O_3

| | | AS999 | AG999 | AM997 | |
|---|---|--------------------|------------------|----------------|-----------|
| General Properties | Characteristics | High Purity | Plasma-resistant | General grade | |
| | Main Component Purity (wt%) | 99.99 | 99.9 | 99.7 | |
| | Color | White | Whitish-yellow | Whitish-yellow | |
| | Density (g/cm^3) | 3.95 | 3.93 | 3.93 | |
| | Water Absorption (%) | 0 | 0 | 0 | |
| Mechanical Properties | Bending Strength (MPa) | 390 | 390 | 390 | |
| | Young's Modulus (GPa) | 380 | 380 | 375 | |
| | Vickers Hardness (GPa) | 18 | 17 | 18 | |
| Thermal Properties | Max. Operating Temperature ($^{\circ}C$) | 1600 | 1600 | 1600 | |
| | Coefficient of Thermal Expansion ($1/^{\circ}C \times 10^{-6}$) | RT~500 $^{\circ}C$ | 7 | 7.4 | 7 |
| | | RT~800 $^{\circ}C$ | 7.7 | 8.1 | 7.6 |
| | Coefficient of Thermal Conductivity ($W/m \times K$) | 33 | 30 | 33 | |
| Thermal Shock Resistance ΔT ($^{\circ}C$) | 200 | - | 200 | | |
| Electrical Properties | Volume Resistivity | 25 $^{\circ}C$ | 10^{15} | 10^{15} | 10^{16} |
| | | 300 $^{\circ}C$ | 10^{12} | - | 10^{13} |
| | | 500 $^{\circ}C$ | 10^9 | - | 10^{10} |
| | | 800 $^{\circ}C$ | 10^7 | - | 10^9 |
| | Dielectric Constant | 10GHz | 9.9 | 9.7 | 9.7 |
| | Dielectric Loss ($\times 10^{-4}$) | | 0.5 | 6 | 1 |
| | Q Factor ($\times 10^4$) | | 2 | 0.2 | 1 |
| | Dielectric Breakdown Voltage (KV/mm) | | 18 | 17 | 18 |



Materiais

Estruturais

Cerâmica – Alumina Al_2O_3





Materiais

Estruturais

Cerâmica - Zircônia ZrO_2

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

Aplicações

Guias para transporte de semicondutores

Componentes de sistemas de ultra precisão

Peças resistentes a abrasão





Materiais

Estruturais

Cerâmica - Zircônia

| | | | |
|--------------------------------------|---|----------|------------------|
| General Properties | Main Component Purity (wt%) | | 94 |
| | Color | | Whitish-yellow |
| | Density (g/cm ³) | | 5.98 |
| | Water Absorption (%) | | 0 |
| Mechanical Properties | Bending Strength (MPa) | | 880 |
| | Young's Modulus (GPa) | | 245 |
| | Vickers Hardness (GPa) | | 16 |
| Thermal Properties | Max. Operating Temperature (°C) | | - |
| | Coefficient of Thermal Expansion (1/°C × 10 ⁻⁶) | RT~500°C | 8.9 |
| | | RT~800°C | 10.4 |
| | Coefficient of Thermal Conductivity (W/m×K) | | 3 |
| Thermal Shock Resistance ΔT (°C) | | 280 | |
| Electrical Properties | Volume Resistivity | 25°C | 10 ¹⁴ |
| | | 300°C | - |
| | | 500°C | - |
| | | 800°C | - |
| | Dielectric Constant 10GHz | | 33.0 |
| | Dielectric Loss (×10 ⁻⁴) | | 9 |
| | Q Factor (×10 ⁴) | | 0.1 |
| Dielectric Breakdown Voltage (KV/mm) | | - | |



Materiais

Estruturais

Cerâmica - Zerodur

Cerâmica vítrea com coeficiente de expansão ultra baixo

| 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 $\mu\text{m}/\text{m}\cdot^\circ\text{C}$ @Temperature 20.0 - 300 $^\circ\text{C}$ |
| Specific Heat Capacity | 0.821 J/g- $^\circ\text{C}$ |
| Thermal Conductivity | 1.64 W/m-K @Temperature 100 $^\circ\text{C}$ |
| Optical Properties | Metric |
| Refractive Index | 1.5394 |
| | 1.5447 |
| | 1.5447 |
| | 1.5544 |



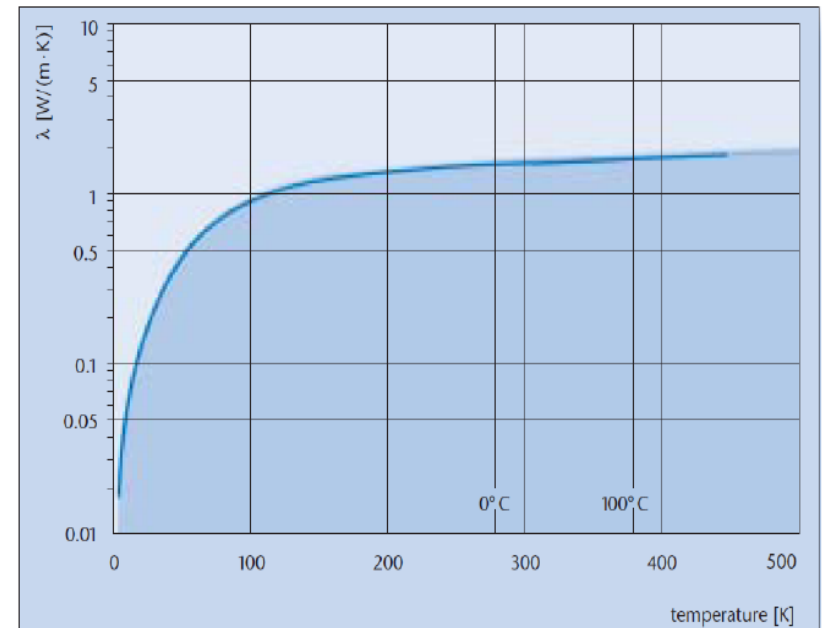
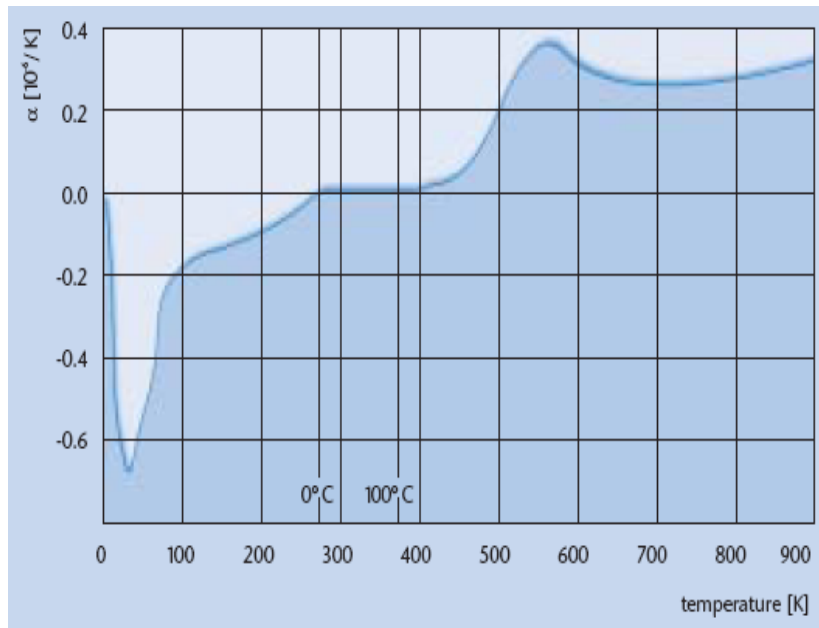


Materiais

Estruturais

Cerâmica - Zerodur

| | |
|--|------|
| 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

Cerâmica - Zerodur

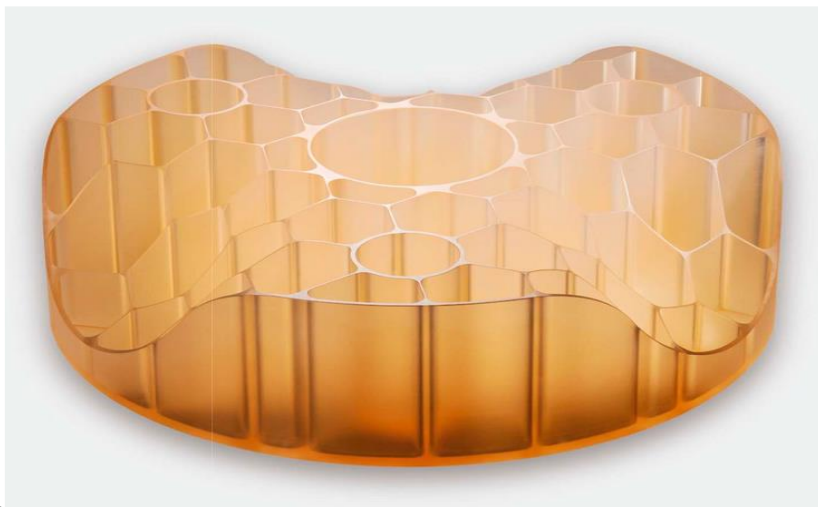
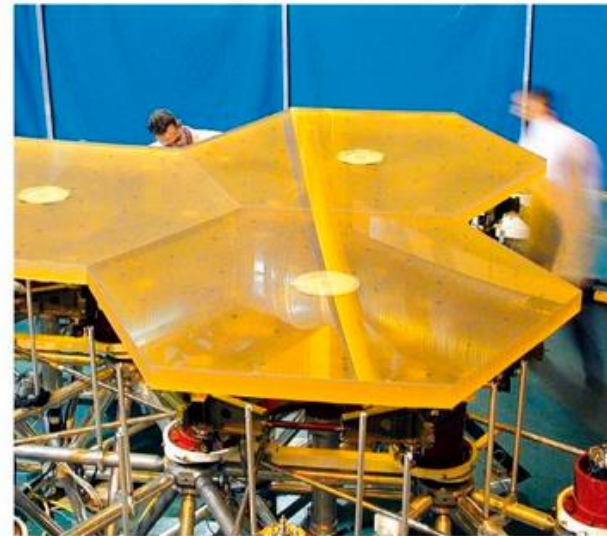




Materiais

Estruturais

Cerâmica - Zerodur





Materiais

Estruturais

Cerâmica - 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

Cerâmica - Carboneto de silício SiC

| | | | |
|--------------------------------------|---|----------|-------------------|
| General Properties | Main Component Purity (wt%) | | 97 |
| | Color | | Black |
| | Density (g/cm ³) | | 3.1 |
| | Water Absorption (%) | | 0 |
| Mechanical Properties | Bending Strength (MPa) | | 400 |
| | Young's Modulus (GPa) | | 400 |
| | Vickers Hardness (GPa) | | 20 |
| Thermal Properties | Max.Operating Temperature (°C) | | 1600 |
| | Coefficient of Thermal Expansion (1/°C×10 ⁻⁶) | RT~500°C | 3.9 |
| | | RT~800°C | 4.3 |
| | Coefficient of Thermal Conductivity (W/m×K) | | 130 |
| Thermal Shock Resistance ΔT (°C) | | 300 | |
| Electrical Properties | Volume Resistivity | 25°C | 3×10 ⁸ |
| | | 300°C | - |
| | | 500°C | - |
| | | 800°C | - |
| | Dielectric Constant 10GHz | | - |
| | Dielectric Loss (×10 ⁻⁴) | | - |
| | Q Factor (×10 ⁴) | | - |
| Dielectric Breakdown Voltage (KV/mm) | | - | |



Materiais

Estruturais

Cerâmica - Carboneto de silício SiC



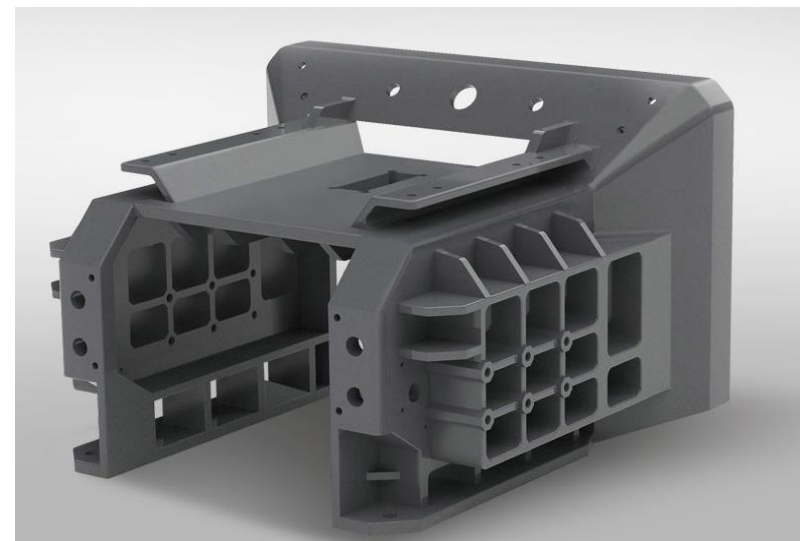
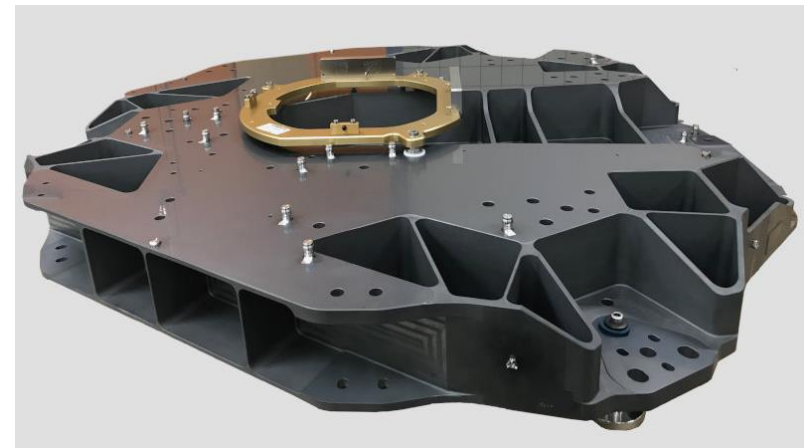
ASTRO-F primary mirror is made of SiC (Silicon Carbide), a lightweight and rigid material.



Materiais Estruturais

Cerâmicos

Carboneto de silício (SiC)





Materiais

Estruturais

Cerâmica - 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

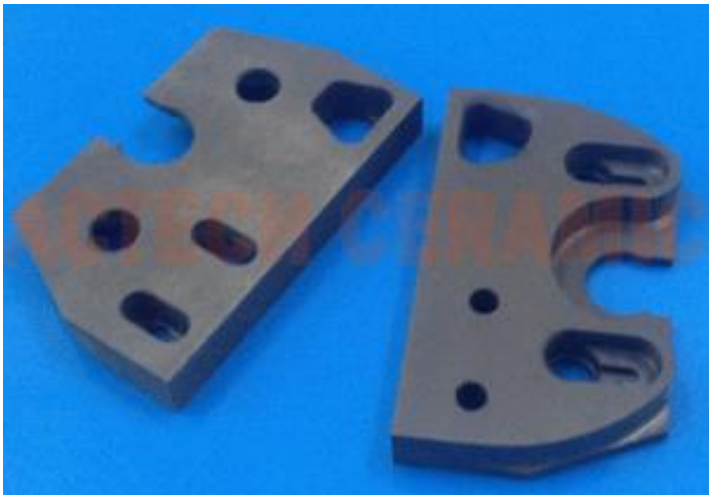
Componentes resistentes ao calor



Materiais Estruturais

Cerâmicos

Nitreto de silício (SiN)





Materiais

Estruturais

Cerâmica - Nitreto de silício (SiN)

| | | | |
|--------------------------------------|---|----------|------------------|
| General Properties | Main Component Purity (wt%) | | 90 |
| | Color | | Gray |
| | Density (g/cm ³) | | 3.25 |
| | Water Absorption (%) | | 0 |
| Mechanical Properties | Bending Strength (MPa) | | 785 |
| | Young's Modulus (GPa) | | 285 |
| | Vickers Hardness (GPa) | | 16 |
| Thermal Properties | Max. Operating Temperature (°C) | | 1200 |
| | Coefficient of Thermal Expansion (1/°C×10 ⁻⁶) | RT~500°C | 3.5 |
| | | RT~800°C | 4.2 |
| | Coefficient of Thermal Conductivity (W/m×K) | | 13 |
| Thermal Shock Resistance ΔT (°C) | | 650 | |
| Electrical Properties | Volume Resistivity | 25°C | 10 ¹⁶ |
| | | 300°C | 10 ¹⁴ |
| | | 500°C | 10 ¹¹ |
| | | 800°C | 10 ⁷ |
| | Dielectric Constant 10GHz | | 8.3 |
| | Dielectric Loss (×10 ⁻⁴) | | 25 |
| | Q Factor (×10 ⁴) | | 0.04 |
| Dielectric Breakdown Voltage (KV/mm) | | 14 | |



Materiais

Estruturais

Cerâmica - Nitreto de Alumínio

| | | ALN99 | ALN94 | |
|--------------------------------------|--|-------------|---------------------------|------------------|
| General Properties | Characteristics | High purity | High Thermal Conductivity | |
| | Main Component Purity(wt%) | 99 | 94 | |
| | Color | Light gray | Light gray | |
| | Density(g/cm ³) | 3.24 | 3.31 | |
| | Water Absorption(%) | 0 | 0 | |
| Mechanical Properties | Bending Strength(MPa) | 295 | 345 | |
| | Young's Modulus(GPa) | 320 | 320 | |
| | Vickers Hardness(GPa) | 11 | 11 | |
| Thermal Properties | Max.Operating Temperature (°C) | 1000 | 1000 | |
| | Coefficient of Thermal Expansion (1°C×10 ⁻⁶) | RT~500°C | 4.4 | 4.4 |
| | | RT~800°C | 5.1 | 5.1 |
| | Coefficient of Thermal Conductivity (W/m×K) | 80 | 150 | |
| | Thermal Shock Resistance ΔT (°C) | 300 | 400 | |
| Electrical Properties | Volume Resistivity | 25°C | 10 ¹⁴ | 10 ¹⁴ |
| | | 300°C | 10 ⁸ | 10 ¹⁰ |
| | | 500°C | 10 ⁷ | 10 ⁷ |
| | | 800°C | 10 ⁵ | 10 ⁵ |
| | Dielectric Constant | 10GHz | 8.5 | 8.5 |
| | Dielectric Loss (×10 ⁻⁴) | | 30 | 30 |
| | Q Factor (×10 ⁴) | | 0.03 | 0.03 |
| Dielectric Breakdown Voltage (KV/mm) | | - | - | |

Cerâmicas – SiAlON

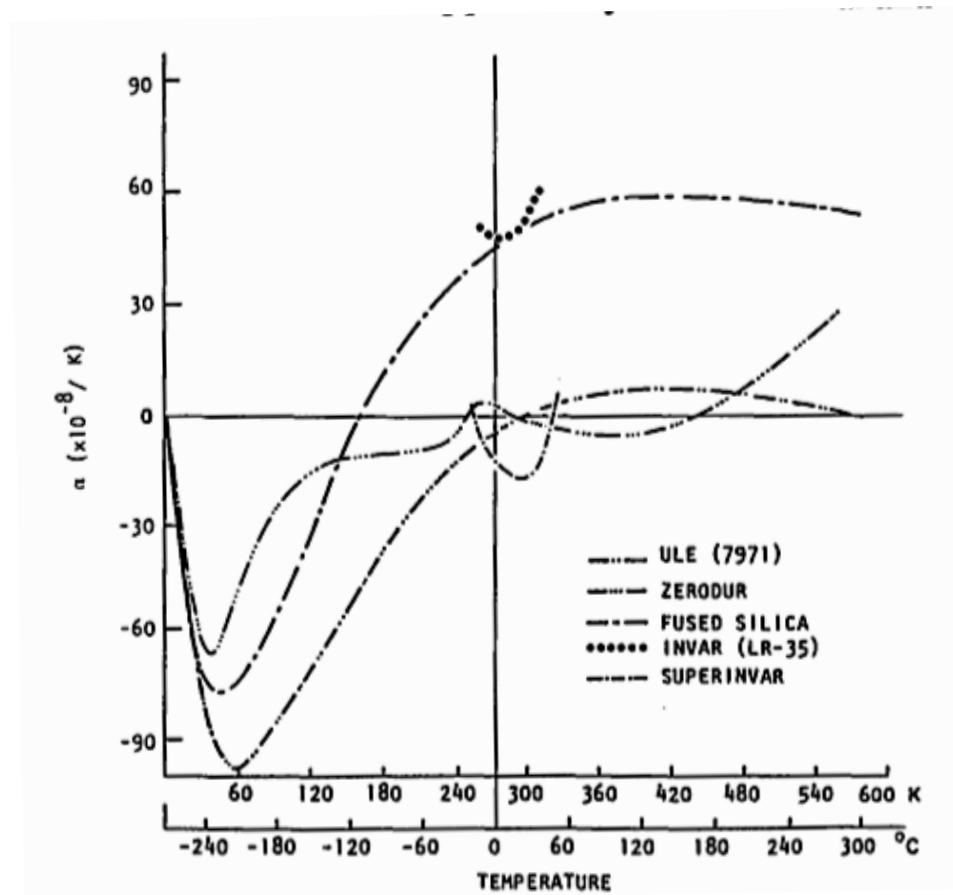
| | | | |
|--------------------------------------|--|----------|------------------|
| General Properties | Main Component Purity (wt%) | 90 | |
| | Color | Gray | |
| | Density (g/cm ³) | 3.2 | |
| Mechanical Properties | Water Absorption (%) | 0 | |
| | Bending Strength (MPa) | 880 | |
| | Young's Modulus (GPa) | 290 | |
| Thermal Properties | Vickers Hardness (GPa) | 12 | |
| | Max.Operating Temperature (°C) | 1300 | |
| | Coefficient of Thermal Expansion (1°C×10 ⁻⁶) | RT~500°C | 2.4 |
| | | RT~800°C | 2.9 |
| | Coefficient of Thermal Conductivity (W/m×K) | 27 | |
| Thermal Shock Resistance ΔT (°C) | 800 | | |
| Electrical Properties | Volume Resistivity | 25°C | 10 ¹⁵ |
| | | 300°C | - |
| | | 500°C | - |
| | | 800°C | - |
| | Dielectric Constant | 10GHz | 8 |
| | Dielectric Loss (×10 ⁻⁴) | | 14 |
| | Q Factor (×10 ⁴) | | 0.7 |
| Dielectric Breakdown Voltage (KV/mm) | | 15 | |



Materiais

Estruturais

Considerações térmicas

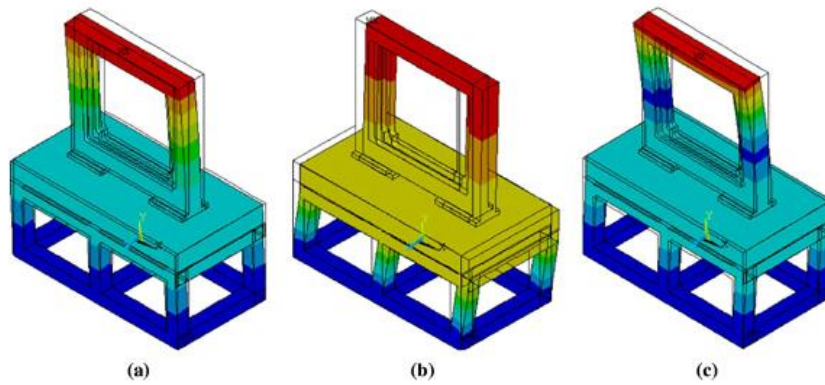




Materiais

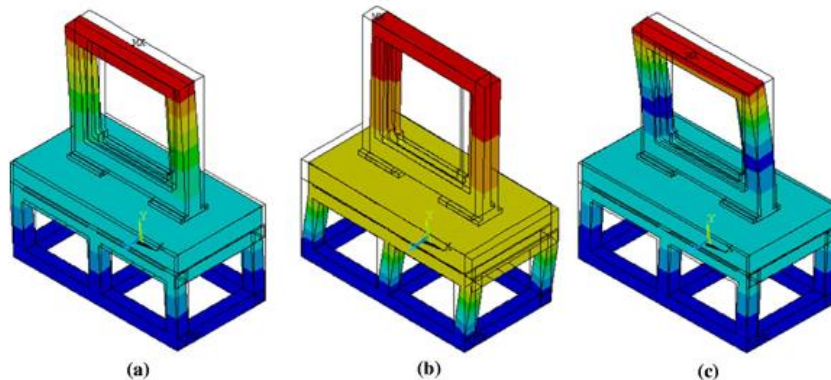
Estruturais

Considerações dinâmicas



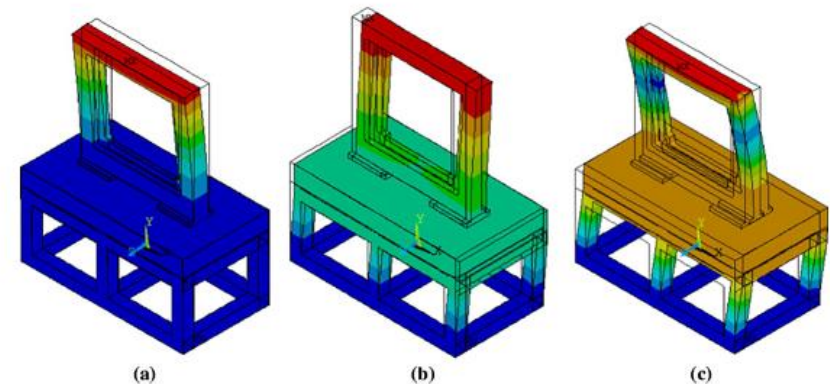
Notes: (a) 41.101 Hz; (b) 45.023 Hz; (c) 65.242 Hz

Figure 3 The first three modes of a cast iron frame structure



Notes: (a) 62.34 Hz; (b) 66.931 Hz; (c) 99.569 Hz

Figure 4 The first three modes of a natural granite frame structure



Notes: (a) 46.708 Hz; (b) 69.896 Hz; (c) 85.551 Hz

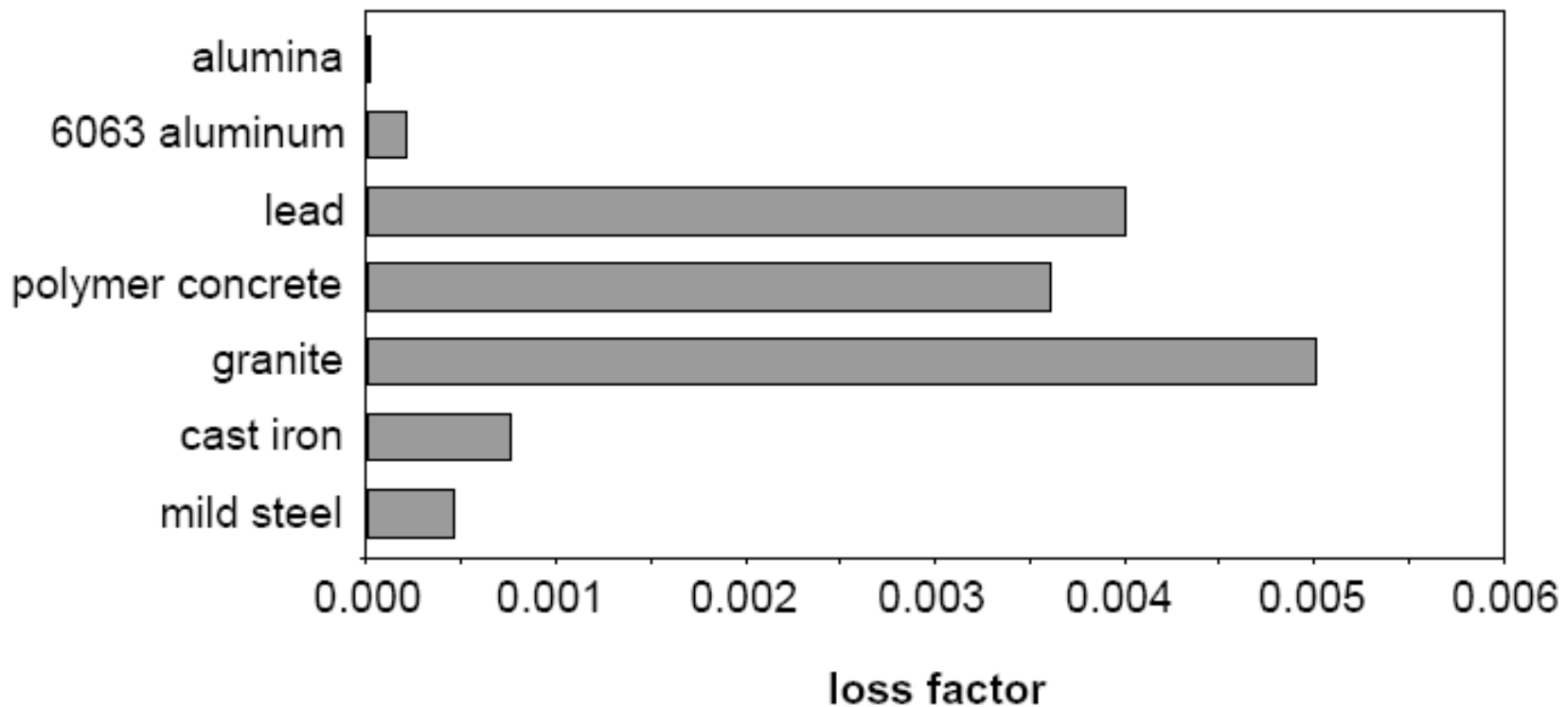
Figure 5 The first three modes of an artificial stone frame structure



Materiais

Estruturais

Considerações dinâmicas



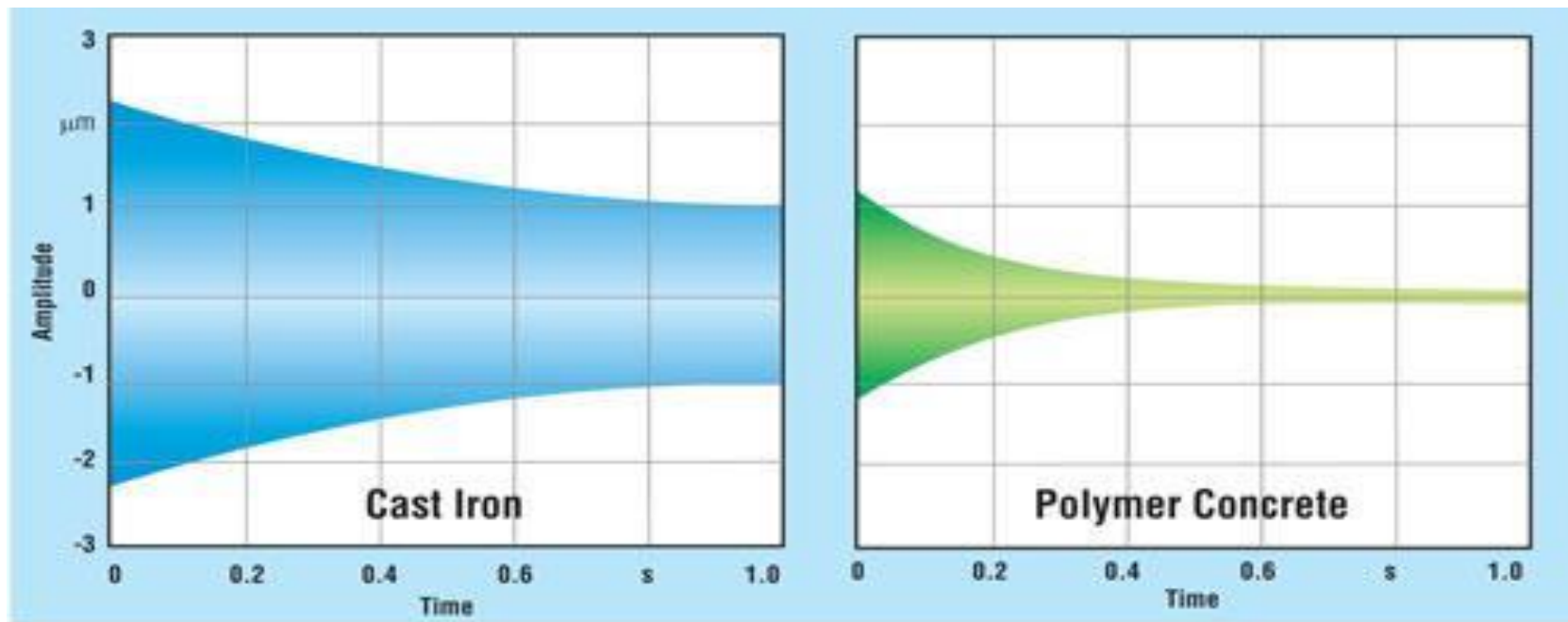
Fator de amortecimento - comparativo



Materiais

Estruturais

Considerações dinâmicas

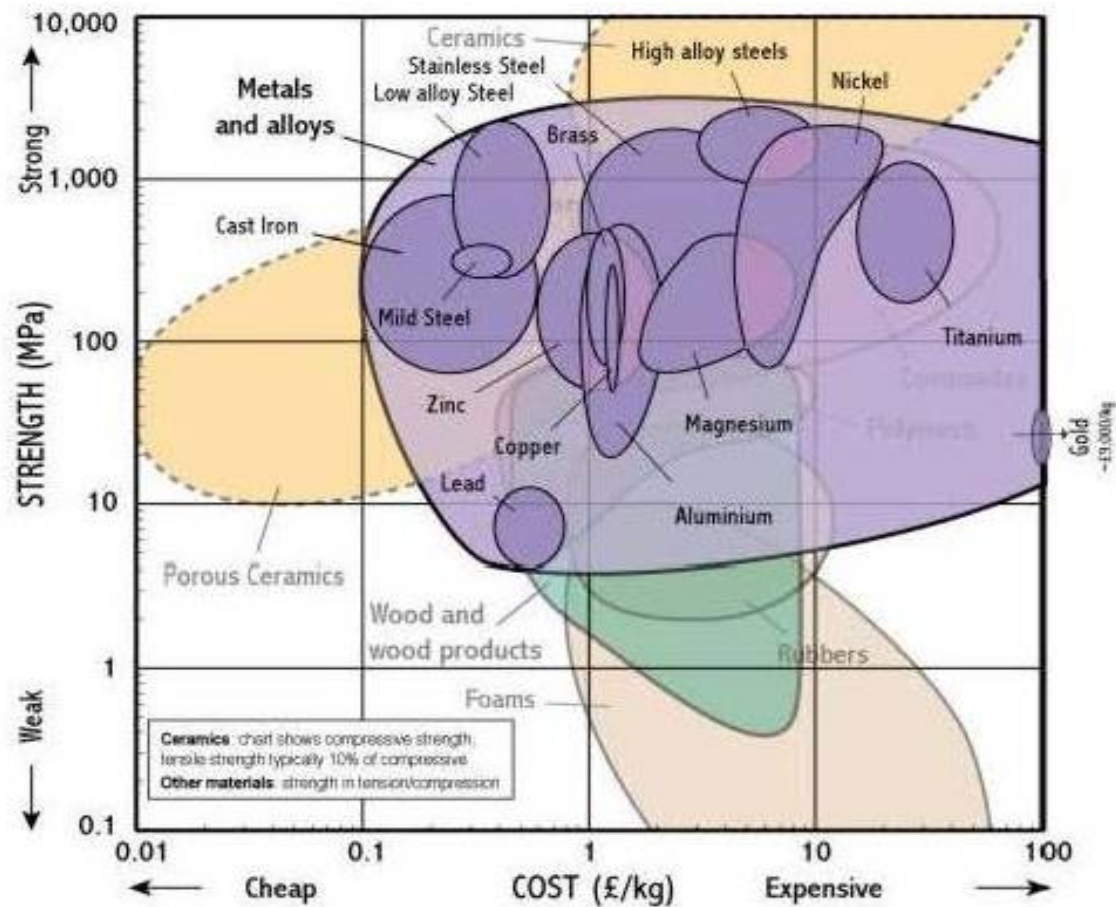




Materiais

Estruturais

Considerações de custo





Materiais

Estruturais

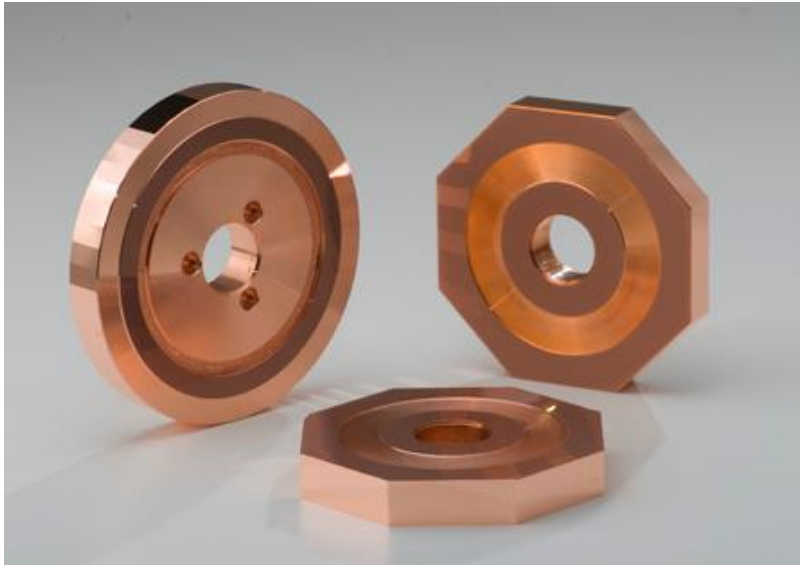
As soluções serão de compromisso e envolvem a seleção de vários tipos de materiais





Materiais

Para componentes



- resistência mecânica
- elasticidade
- estabilidade mecânica
- estabilidade térmica
- estabilidade química
- **resistência ao meio**
- **resistência ao desgaste**
- **propriedades ópticas**
- **fabricabilidade**
- acessibilidade-disponibilidade
- custo



Materiais para Componentes

Classificação

Metálicos

Cobre

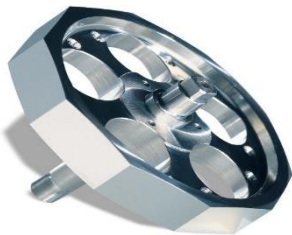
Alumínio

Bronze / Latão

Ouro

Prata

Aços (*)



Cerâmicos

Vítreas

Carvão vítreo

Alumina

Cermets

Silício

Zerodur

Zircônia

SiC

Poliméricos

Acrílicos





Materiais

Para componentes

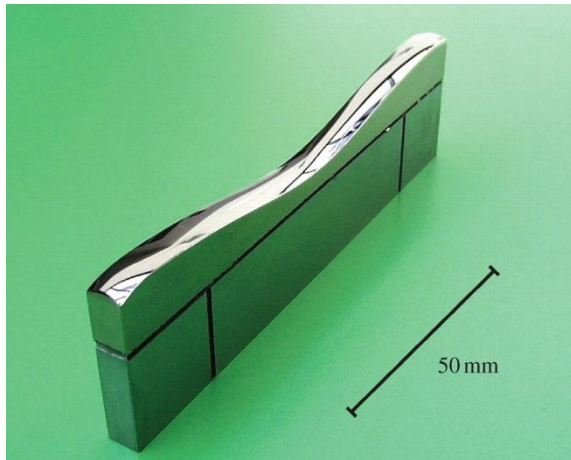
| | | |
|--------------|---------------------------|---------------------------|
| 1 - ALUMÍNIO | 3 - ACRÍLICOS | 7 - VIDROS |
| 2 - COBRE | 4 - PRATA | 8 - CERÂMICAS |
| 2.1 - BRONZE | 5 - OURO | 8.1 - CERÂMICAS VÍTREAS |
| 2.2 - LATÃO | 6 - AÇOS (COM RESTRIÇÕES) | 8.2 - CERÂMICAS METÁLICAS |





Materiais

Para componentes





Materiais

Para componentes

Diamond turning of contact lenses

<https://www.youtube.com/watch?v=rWE1sM5Tcbs>

<https://www.youtube.com/watch?v=IGHsWHsR4AU>

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



Materiais para Componentes

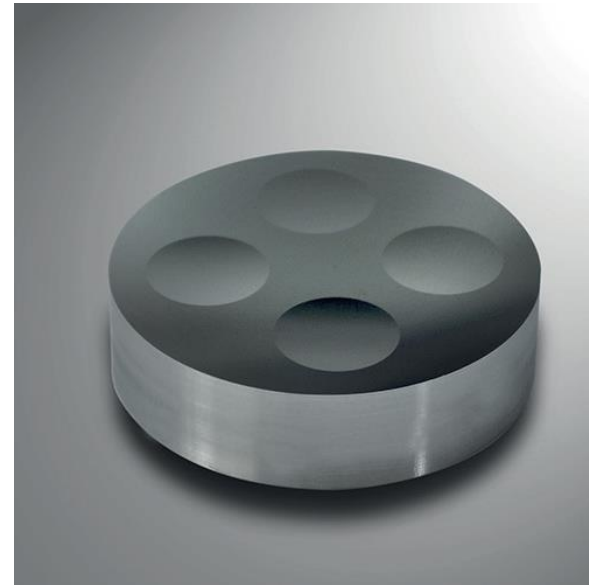
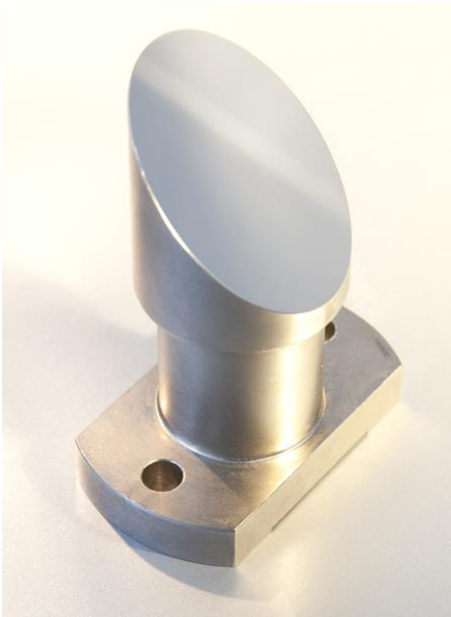
Cobre





Materiais para Componentes

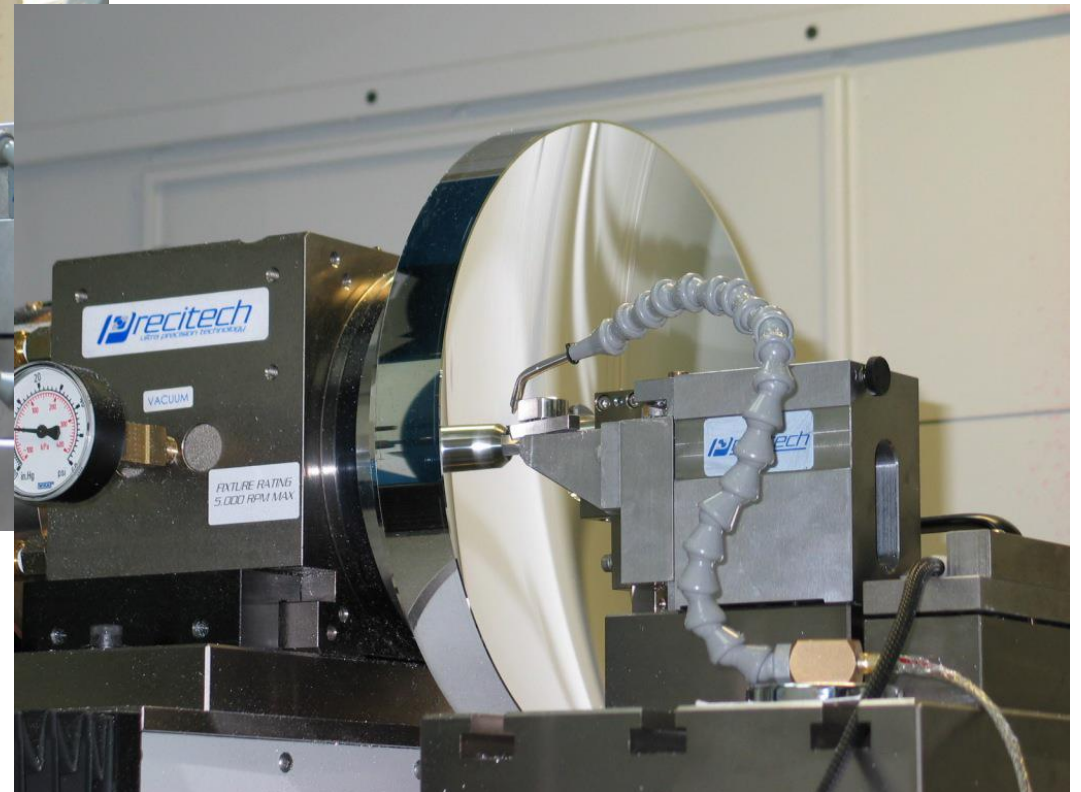
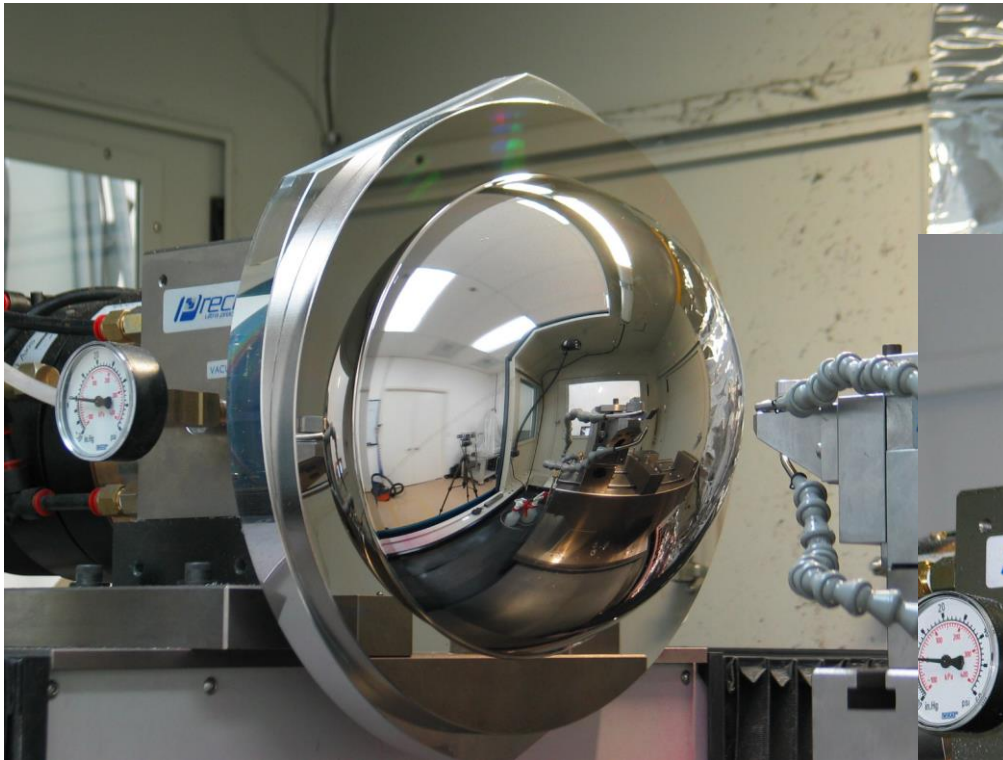
Alumínio





Materiais para Componentes

Alumínio





Materiais para Componentes

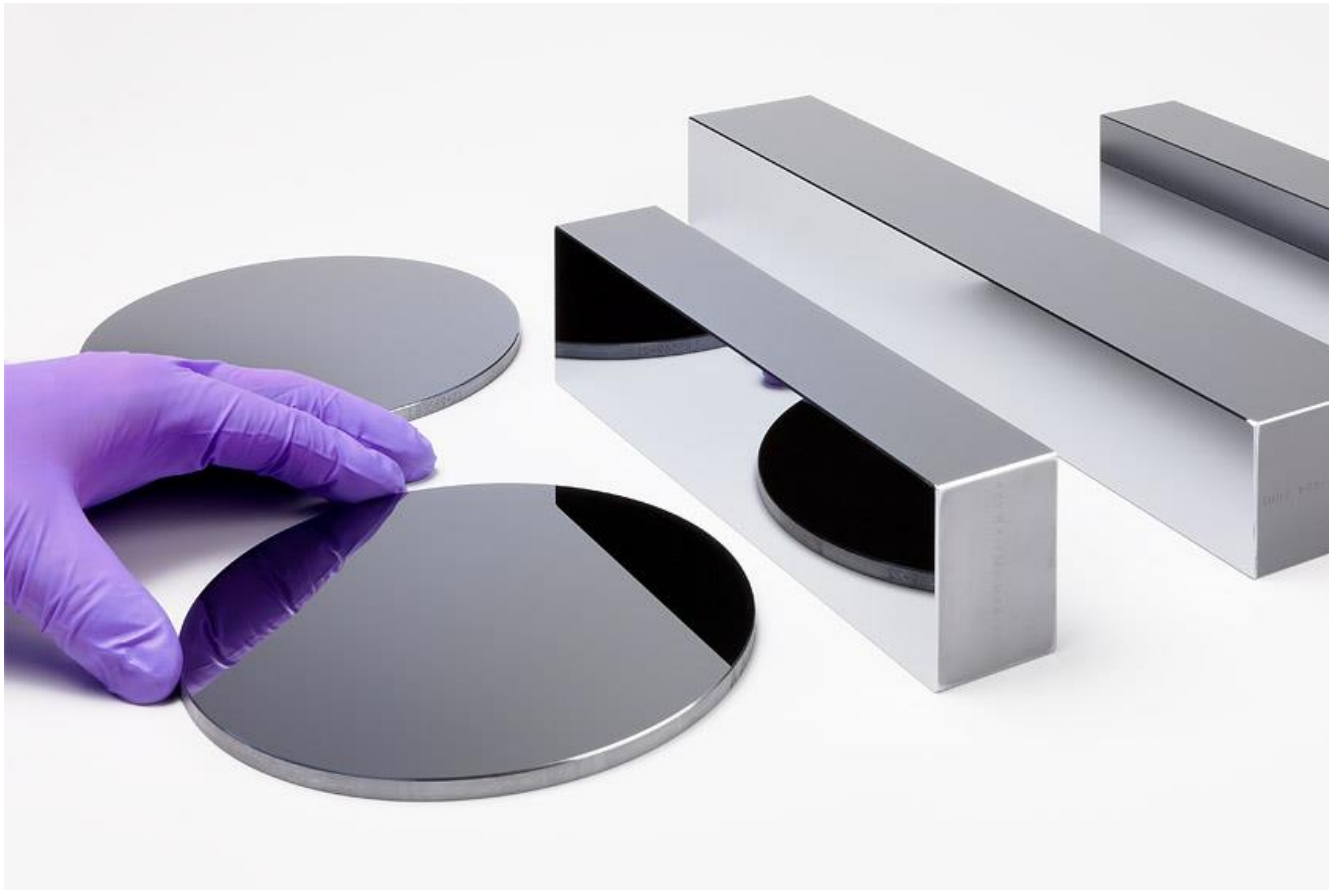
Ouro





Materiais para Componentes

Silício





Materiais para Componentes

Aço Inox





Materiais para Componentes

Nikel





Materiais para Componentes

Carvão vítreo





Materiais para Componentes

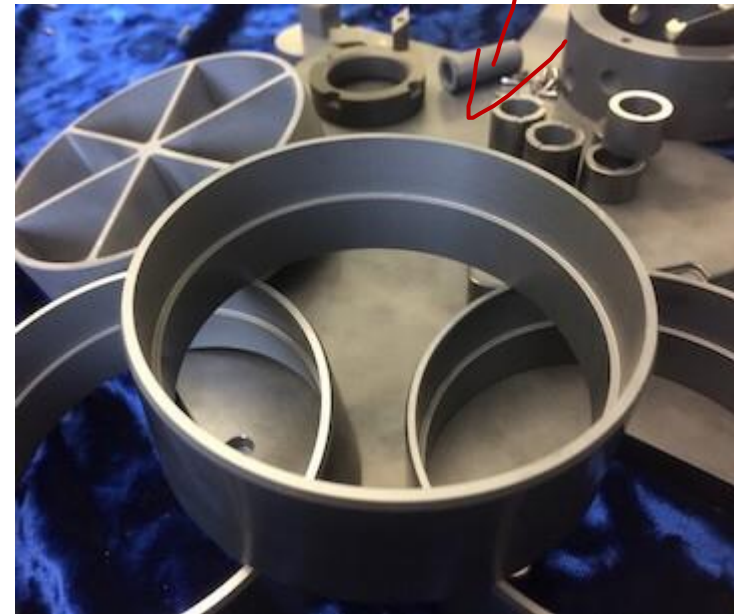
ZnSe





Materiais para Componentes

SiC





Materiais para Componentes

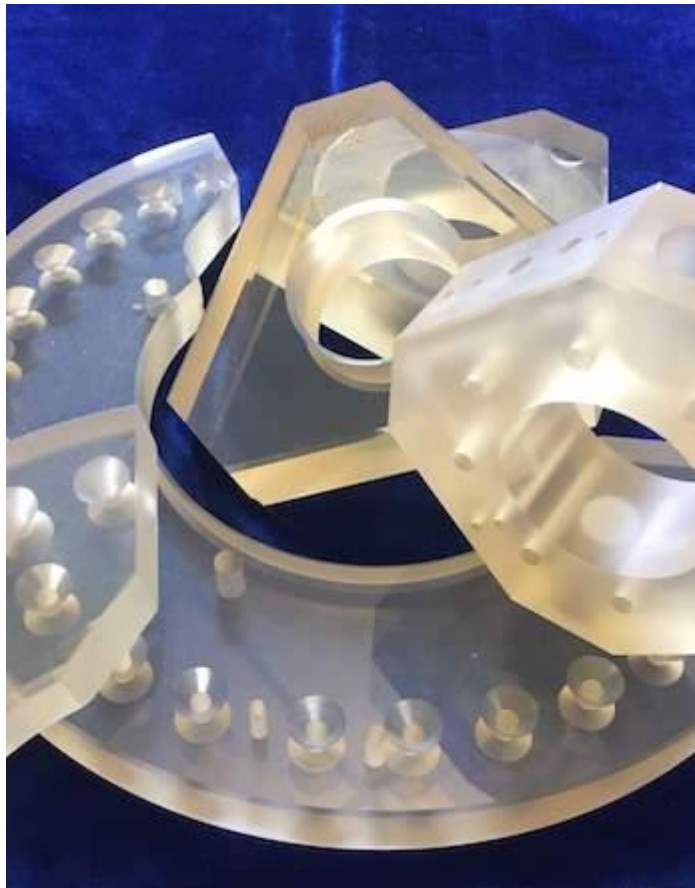
Vidros





Materiais para Componentes

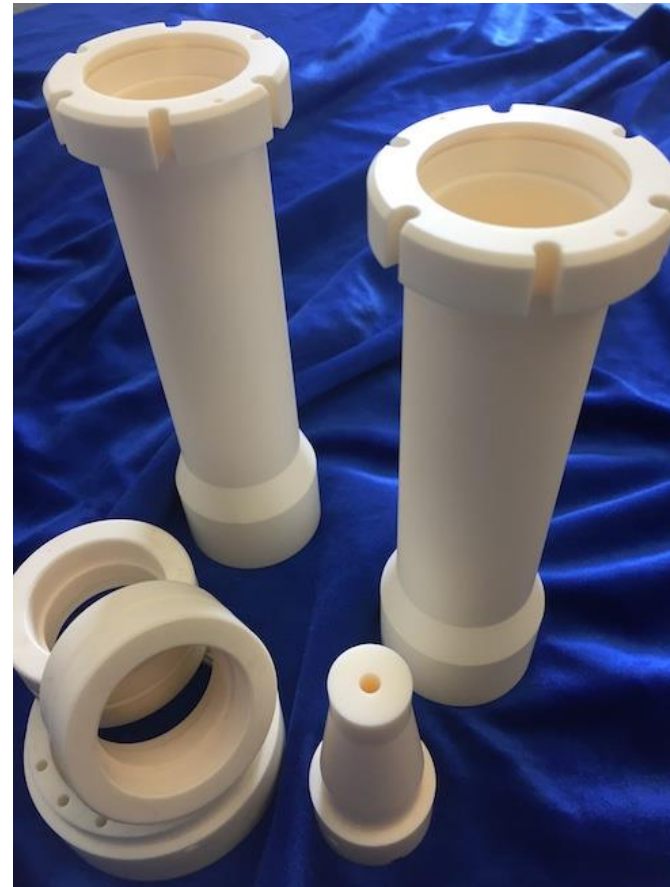
Zerodur





Materiais para Componentes

Alumina





FIM DA AULA