



**ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**  
**Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais**

## **MATERIAIS CERÂMICOS**

**PMT 2100 - Introdução à Ciência dos Materiais para  
Engenharia  
2º semestre de 2005**

# Roteiro da Aula

- Materiais Cerâmicos : principais propriedades e produtos
- Estrutura
  - Materiais cristalinos e amorfos
  - Defeitos
- Classificação dos Materiais Cerâmicos
- Vidros
  - Características e processamento
  - Têmpera
- Materiais Cerâmicos Cristalinos
  - Conformação
  - Secagem
  - Queima
  - Microestrutura
- Cerâmicas de Alto Desempenho.

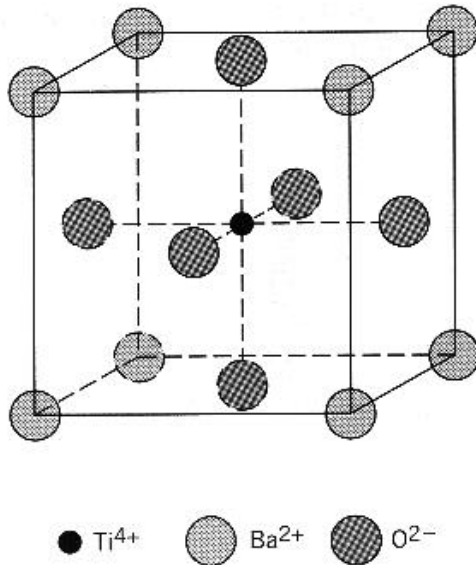
# Materiais Cerâmicos

- A característica comum a estes materiais é serem constituídos de elementos metálicos e elementos não metálicos, ligados por ligações de caráter misto, iônico-covalente .
- Os materiais cerâmicos apresentam alto ponto de fusão.
- São geralmente isolantes elétricos, embora possam existir materiais cerâmicos semicondutoras, condutores e até mesmo supercondutores (estes dois últimos, em faixas específicas de temperatura).
- São comumente estáveis sob condições ambientais severas.
- Os materiais cerâmicos são geralmente duros e frágeis.
- Os principais materiais cerâmicos são:
  - Materiais Cerâmicos Tradicionais : cerâmicas estruturais, louças, refratários (provenientes de matérias primas argilosas).
  - Vidros e Vitro-Cerâmicas.
  - Abrasivos.
  - Cimentos.
  - Cerâmicas “Avançadas” : aplicações eletro-eletrônicas, térmicas, mecânicas, ópticas, químicas, bio-médicas.

# Estrutura dos Materiais Cerâmicos

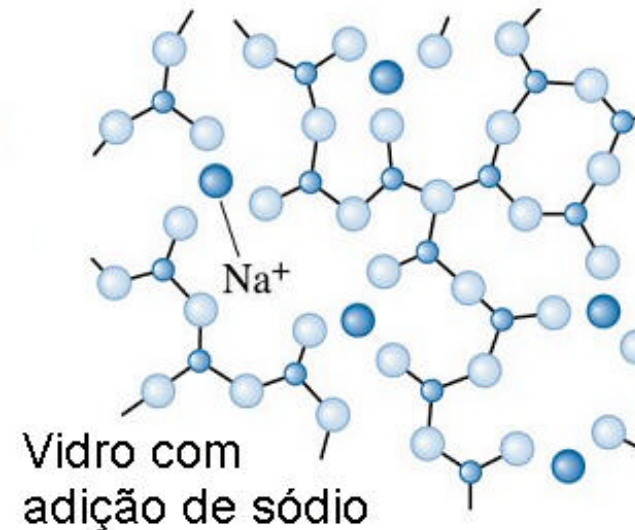
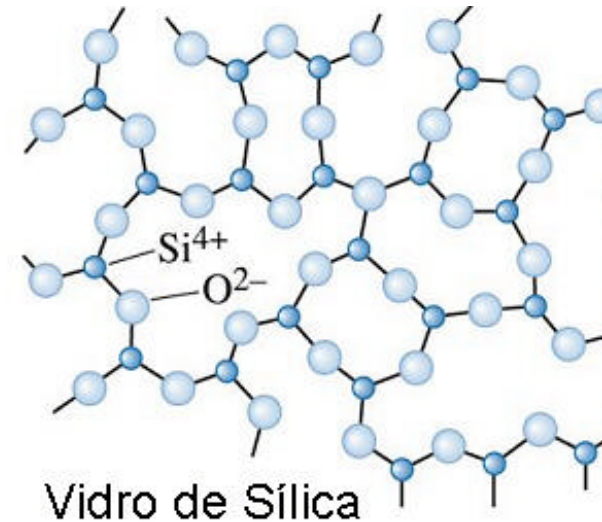
## Cerâmicas Cristalinas

- Em geral, a estrutura cristalina dos materiais cerâmicos é mais complexa que a dos metais, uma vez que eles são compostos pelo menos por dois elementos, em que cada tipo de átomo ocupa posições determinadas no reticulado cristalino.

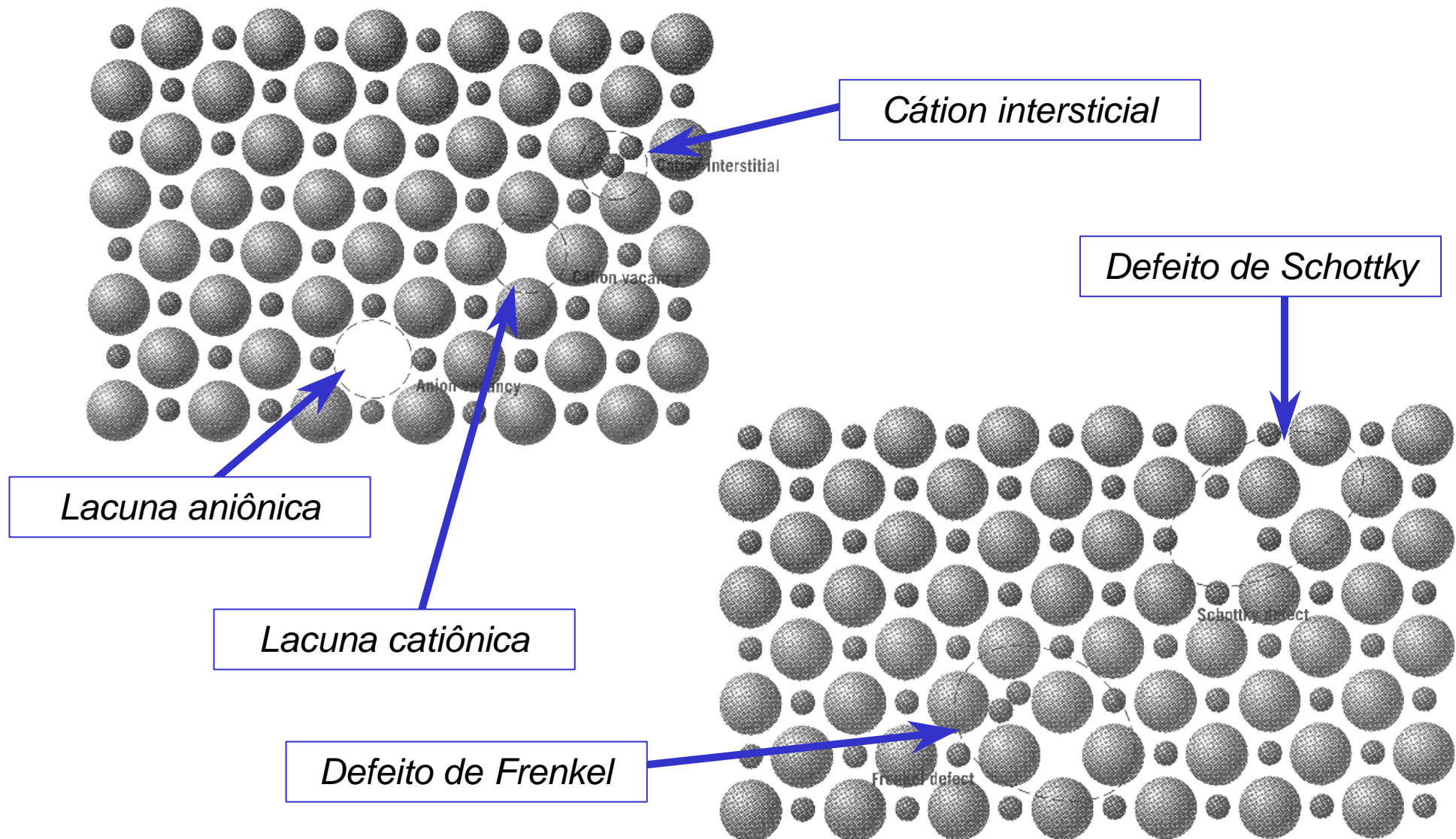


*Exemplo : Titanato de Bário ( $BaTiO_3$ )  
Material Piezoelétrico  
Estrutura tipo  $A_m B_n X_p$*

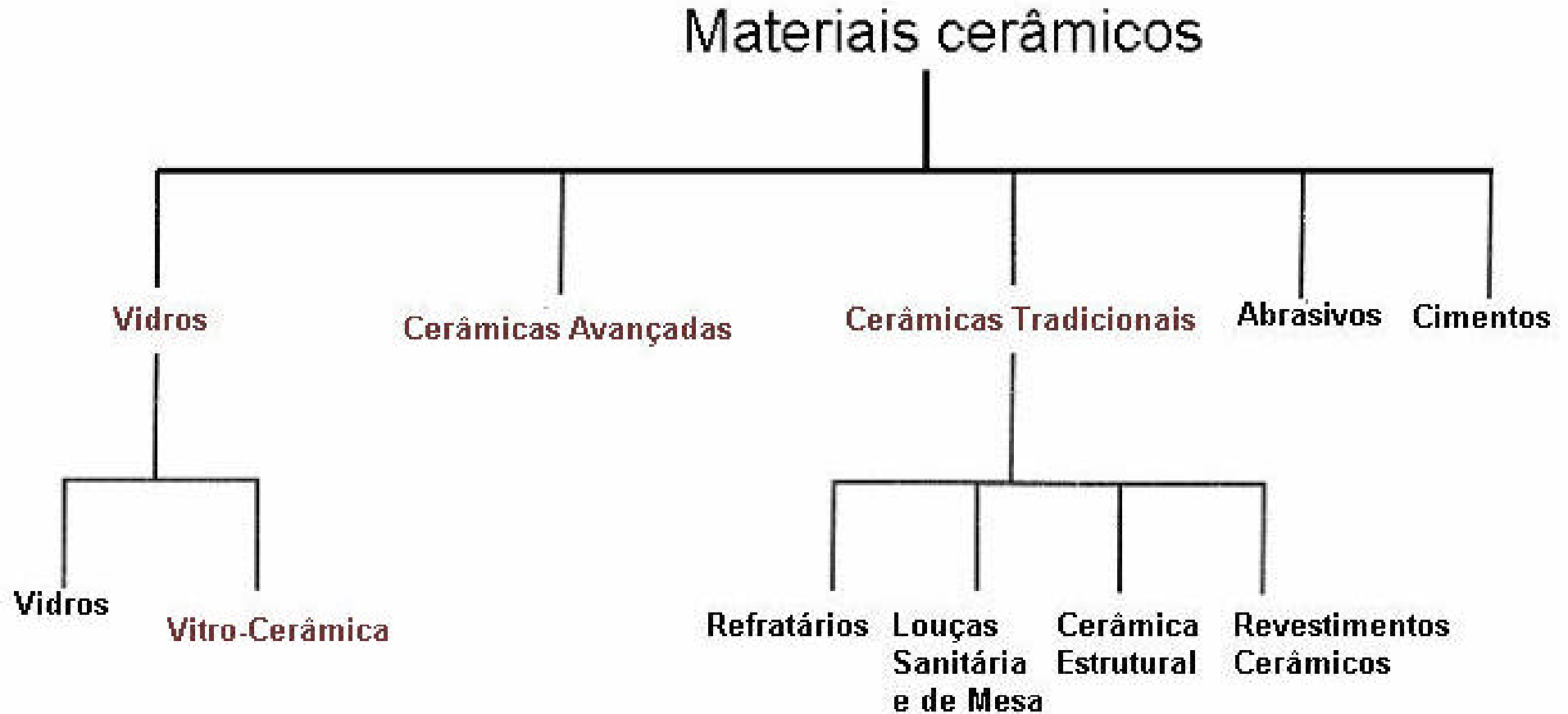
## Vidros (Cerâmicas Não-Cristalinas)



# Estrutura dos Materiais Cerâmicos - Defeitos



# Classificação dos Materiais Cerâmicos Baseada na Aplicação



# Vidros

- Principal tipo de vidro : vidro de sílica
  - Sólido não cristalino
    - que apresenta apenas ordenação atômica de curto alcance.
- Composição Química
  - Principal óxido:  $\text{SiO}_2$  ; outros óxidos:  $\text{CaO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .
- Material muito comum na vida cotidiana
  - Exemplos: embalagens, janelas, lentes, fibra de vidro.
- Os produtos de vidro são conformados (moldados) a quente, quando o material está “fundido” (apresentando-se como um material de elevada viscosidade, que pode ser deformado plasticamente sem se romper).

## Tipos de vidros

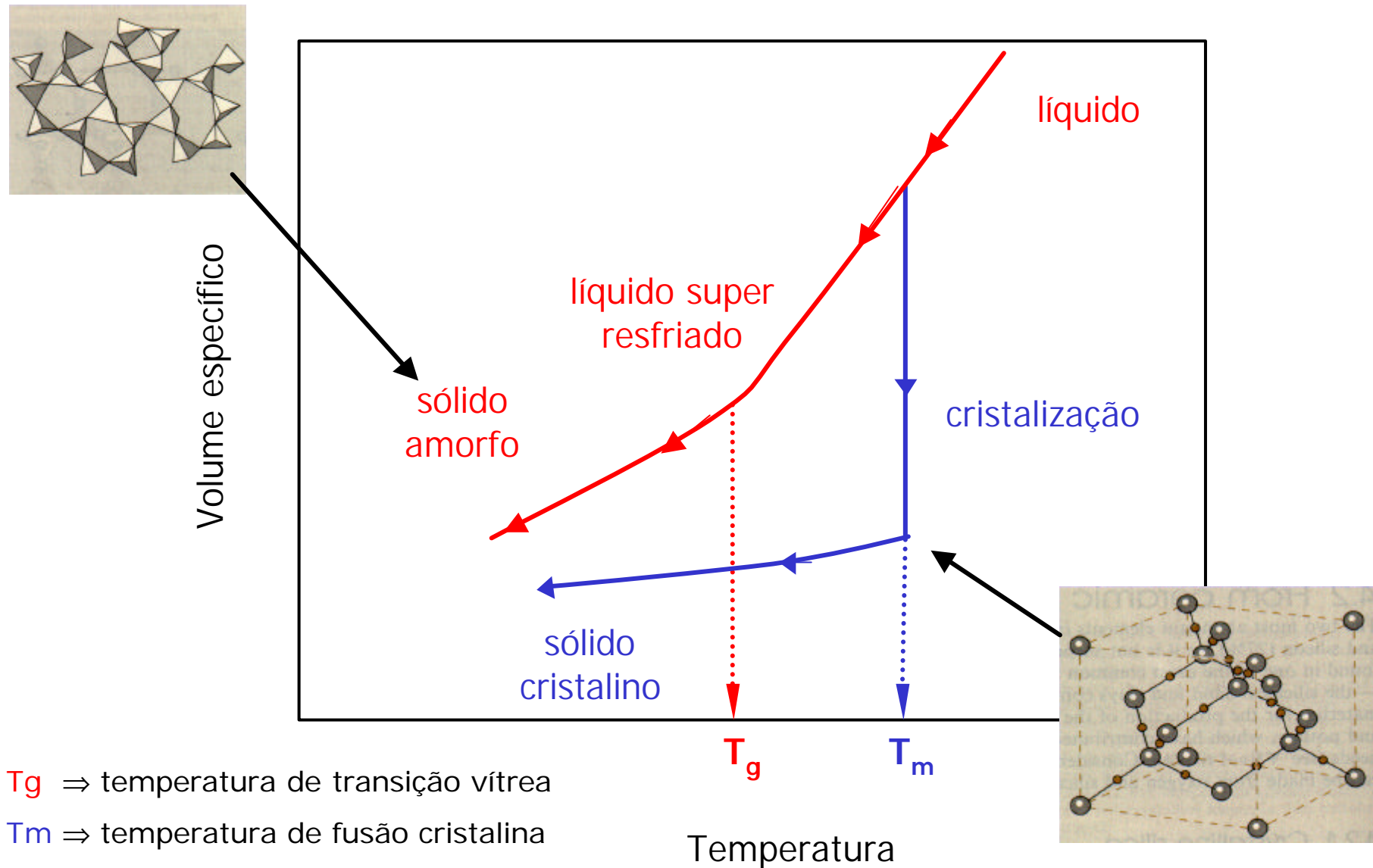
tipo de vidro	composição (% em massa)						características e aplicações
	SiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	outros	
sílica fundida	> 99,5						alta temperatura de fusão, baixo coeficiente de expansão térmica (resistente ao choque térmico)
96% de sílica (Vycor)	96				4		resistente ao choque térmico e ao ataque químico - material de laboratório
borosilicatos (Pyrex)	81	3,5		2,5	13,0		resistente ao choque térmico e ao ataque químico - artigos de cozinha
embalagem	74	16	5	1		4 MgO	baixo ponto de fusão, facilmente moldado, durável
fibra de vidro	55		16	15	14	4 MgO	facilmente transformado em fibras- compostos polímeros - fibras de vidro
vidro óptico (flint)	54	1				37PbO 8 K <sub>2</sub> O	facilmente fabricado, resistente ao choque térmico, artigos de cozinha



# Propriedades dos Vidros

- Não ocorre cristalização (ordenação dos íons em uma estrutura cristalina) durante o resfriamento.
- Quando o líquido é resfriado, aumenta a sua viscosidade (e diminui o seu volume) até que a viscosidade aumente tanto que o material começa a apresentar o comportamento mecânico de um sólido.
- Não existe uma temperatura de fusão cristalina, mas uma temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ).

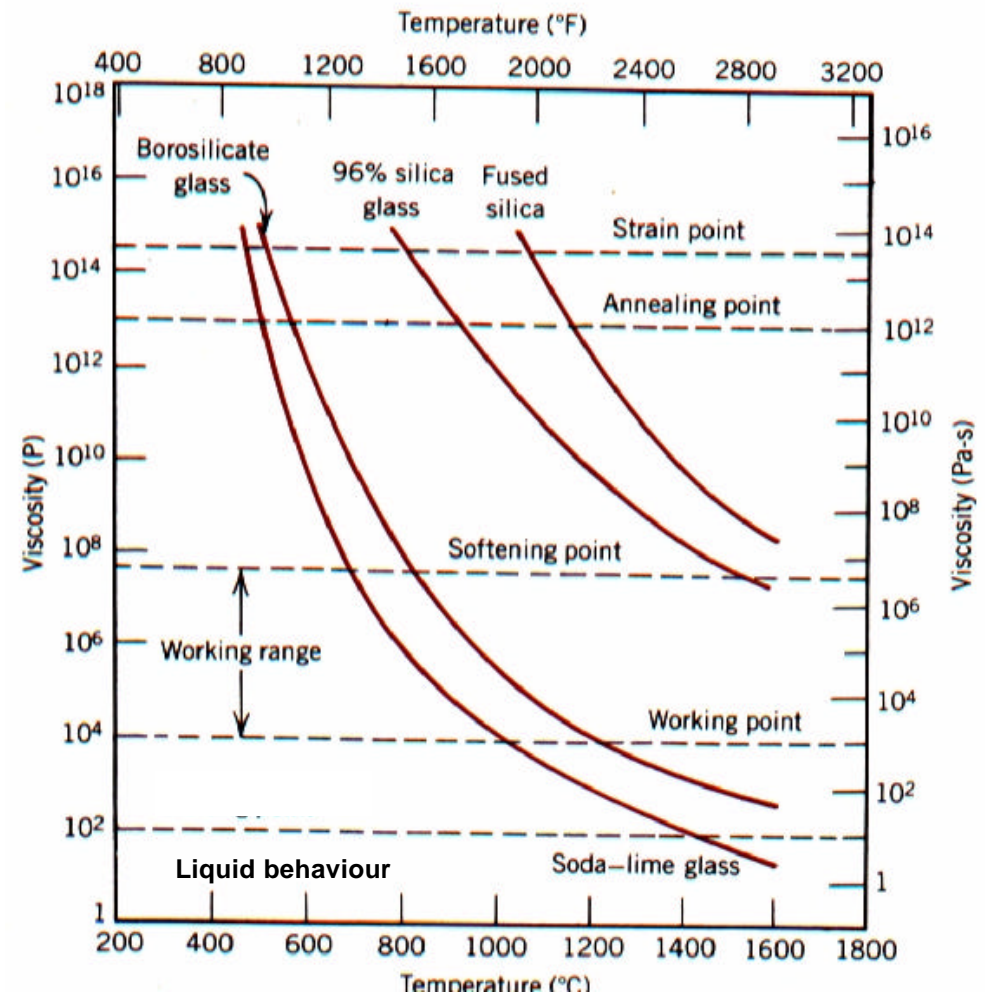
# Volume específico em função da temperatura



# Conformação de Produtos de Vidro

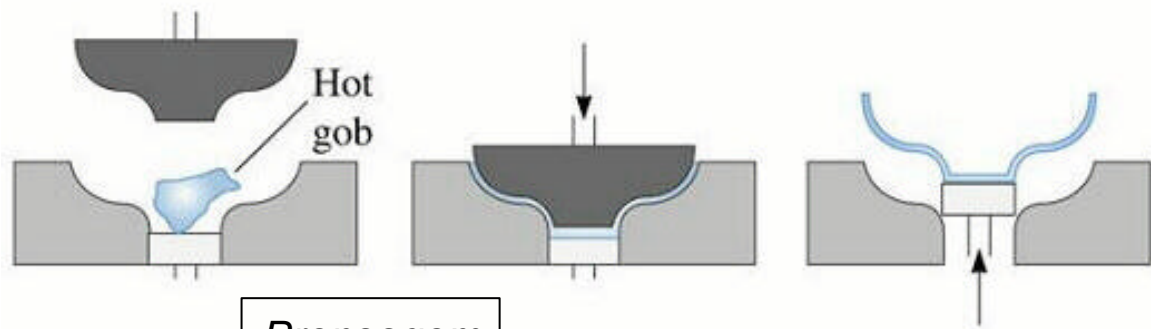
11

- Ponto de deformação (Strain Point)
  - abaixo desta temperatura o vidro fica frágil: viscosidade  $\approx 3 \times 10^{14}$  P.
- Ponto de recozimento (Annealing Point)
  - as tensões residuais podem ser eliminadas em até 15 min: viscosidade  $\approx 10^{13}$  P.
- Ponto de amolecimento (Softening Point)
  - Máxima temperatura para evitar alterações dimensionais significativas: viscosidade  $\approx 4 \times 10^7$  P.
- Ponto de trabalho (Working Point)
  - O vidro pode ser facilmente deformado: viscosidade  $\approx 10^4$  P.
- Abaixo de uma viscosidade de  $\approx 100$  P
  - O vidro pode ser considerado um líquido.

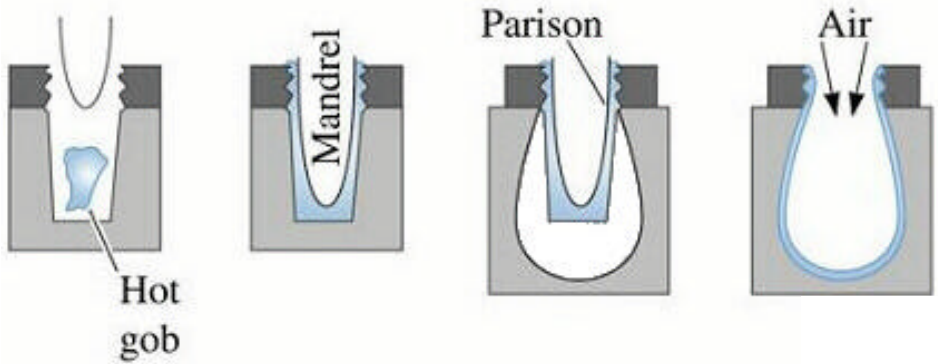


*Viscosidade em função da temperatura para diferentes tipos de vidro.*

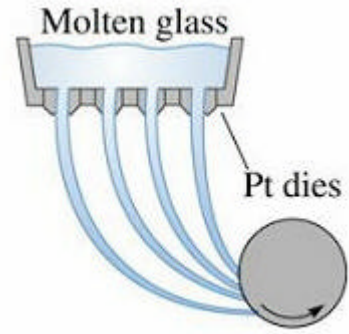
# Conformação de Produtos de Vidro



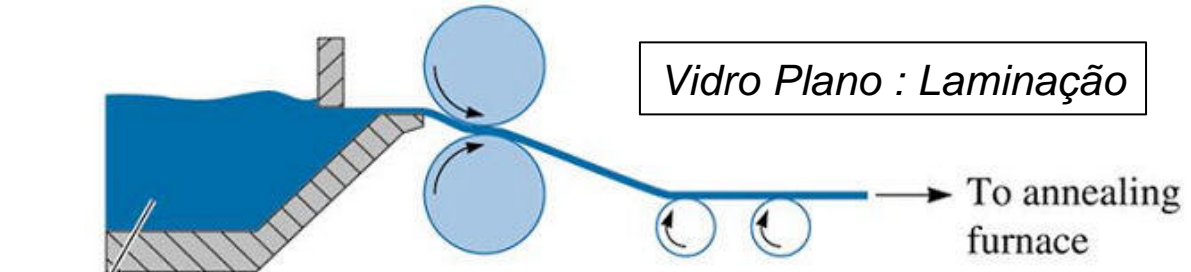
Prensagem



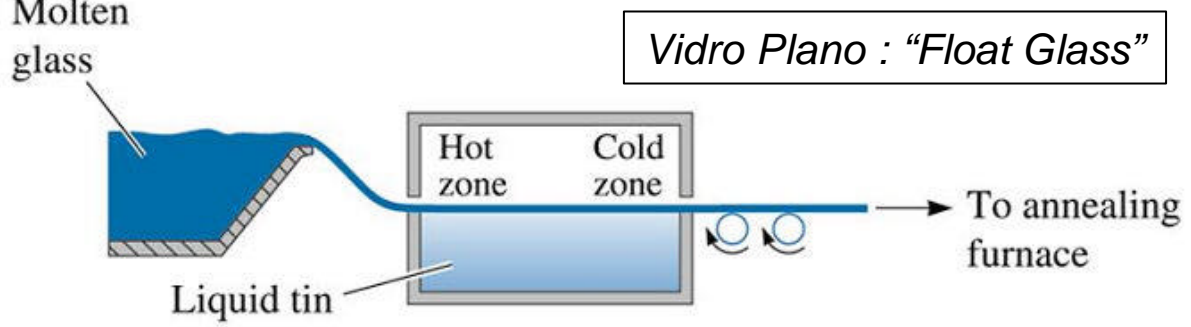
Prensagem + Sopros



Fibras de Vidro



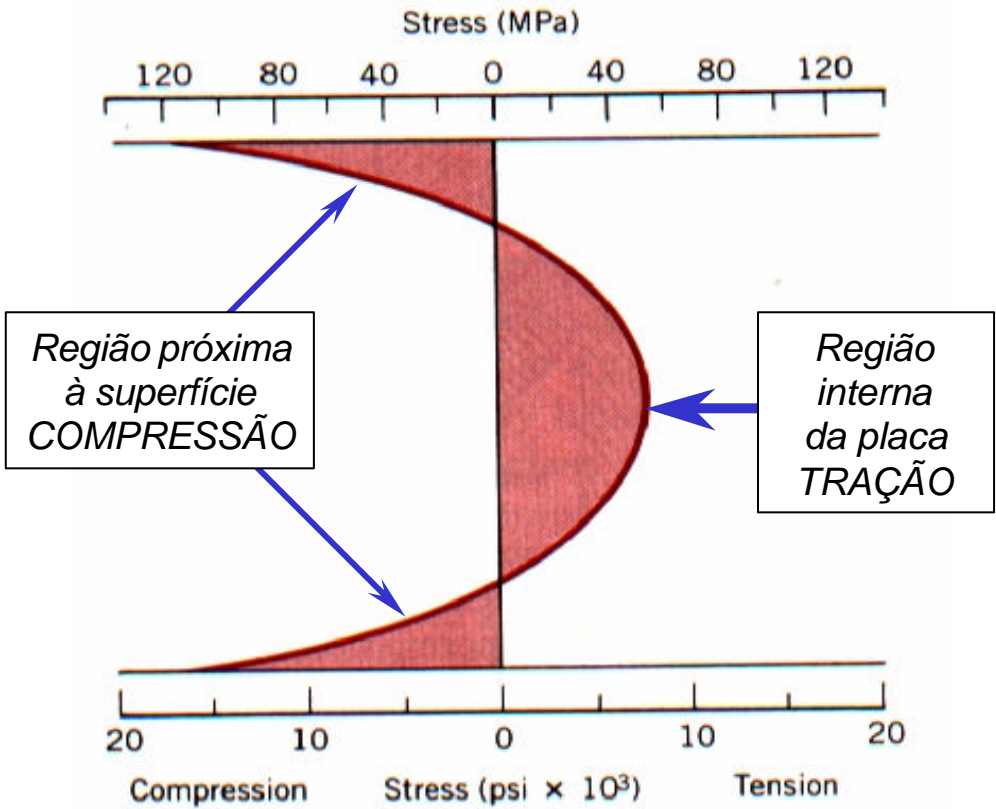
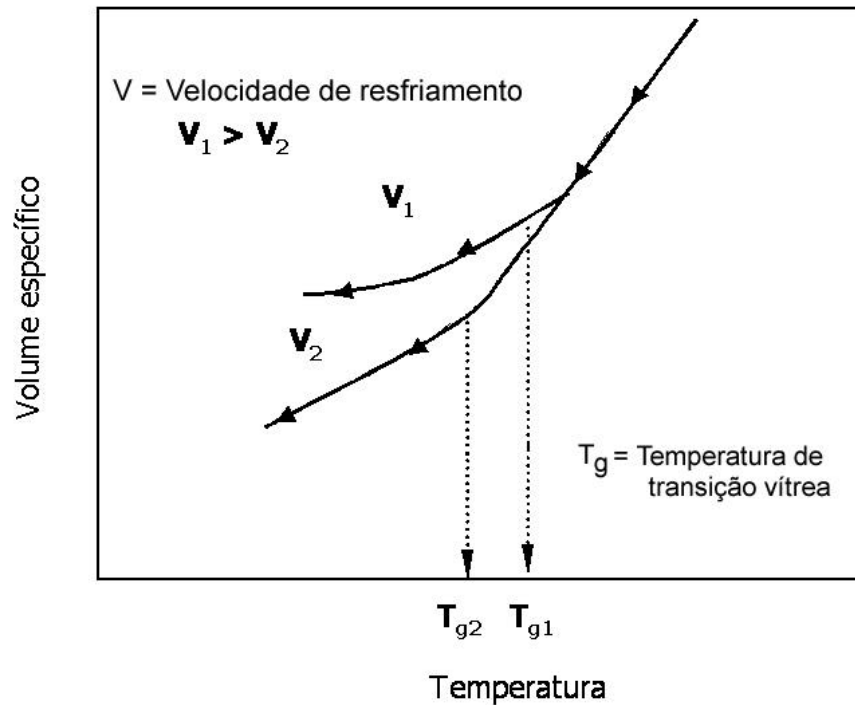
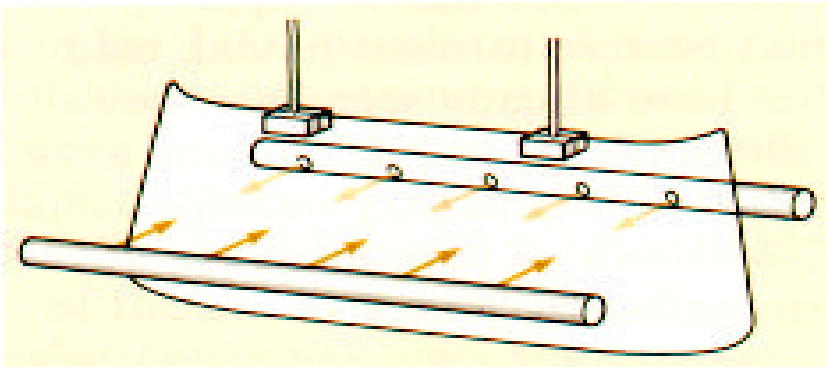
Vidro Plano : Laminação



Vidro Plano : "Float Glass"

# Tratamento térmico dos vidros - Têmpera

*Exemplo de têmpera de um pára-brisas de automóvel.*



*Distribuição de tensões residuais na seção transversal de uma chapa de vidro temperada em decorrência das diferentes velocidades de resfriamento da superfície e o núcleo*

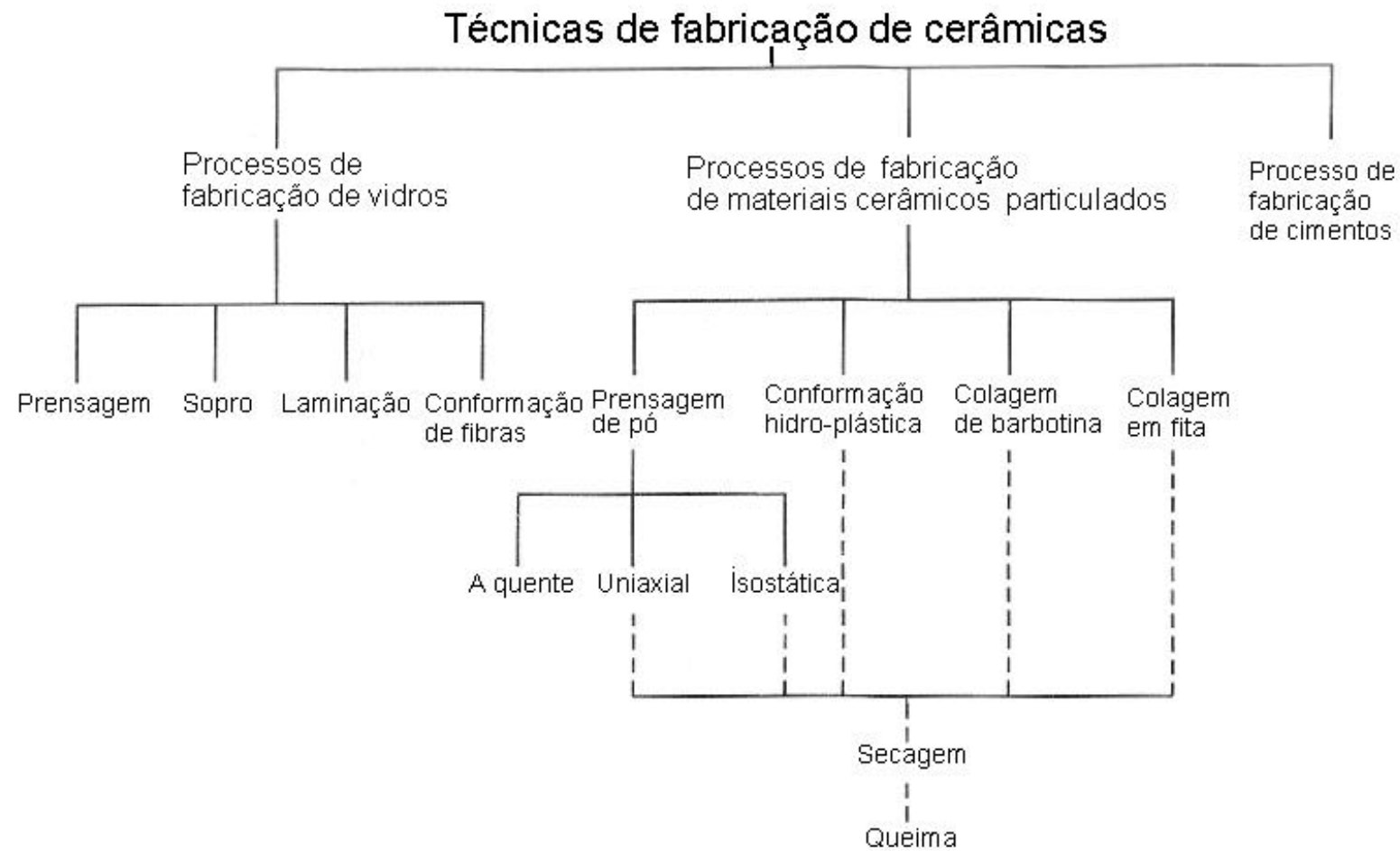
# Processos de Fabricação de Materiais Cerâmicos Cristalinos

Muitos materiais cerâmicos têm elevado ponto de fusão e apresentam dificuldade de conformação passando pelo estado líquido. A plasticidade necessária para sua moldagem é conseguida antes da queima, por meio de mistura das matérias primas em pó com um líquido.

## PROCESSAMENTO

- Preparação da matéria prima em pó.
- Mistura do pó com um líquido (geralmente água) para formar um material conformável : suspensão de alta fluidez (“barbotina”) ou massa plástica.
- Conformação da mistura (existem diferentes processos).
- Secagem das peças conformadas.
- Queima das peças após secagem.
- Acabamento final (quando necessário).

# Técnicas de Fabricação dos Materiais Cerâmicos



# Fabricação de Materiais Cerâmicos

## Métodos de Conformação

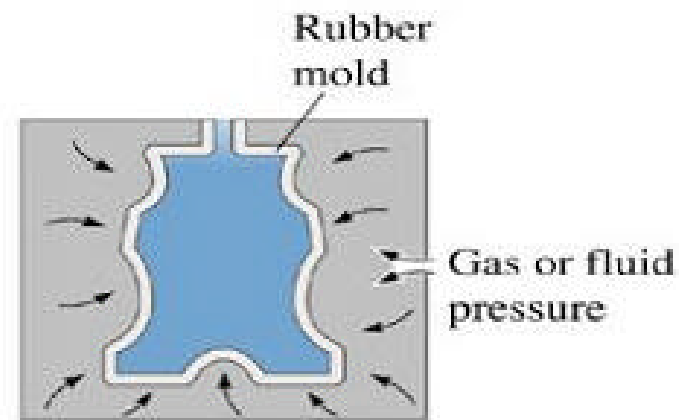
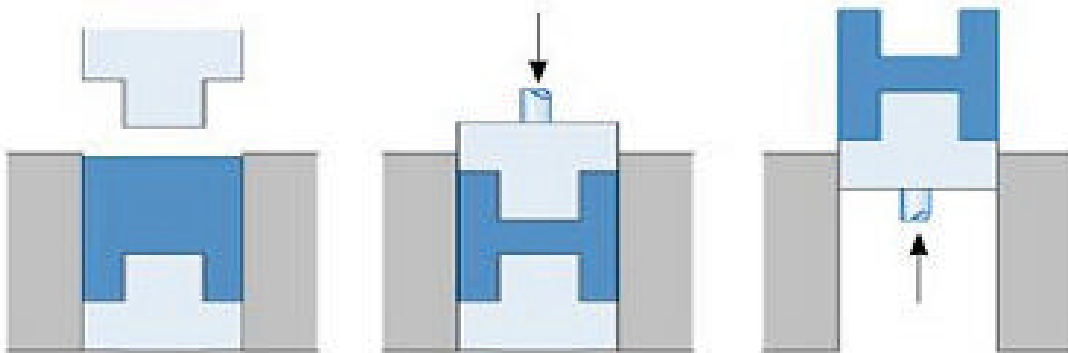
- Prensagem simples: pisos e azulejos
- Prensagem isostática: vela do carro
- Extrusão: tubos e capilares, tijolos baianos
- Injeção: pequenas peças com formas complexas e rotor de turbinas
- Colagem de barbotina: sanitários, pias, vasos, artesanato
- Torneamento: xícaras e pratos



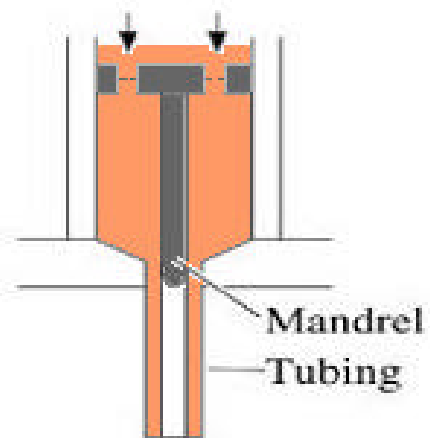
# Fabricação de Materiais Cerâmicos

## Métodos de Conformação

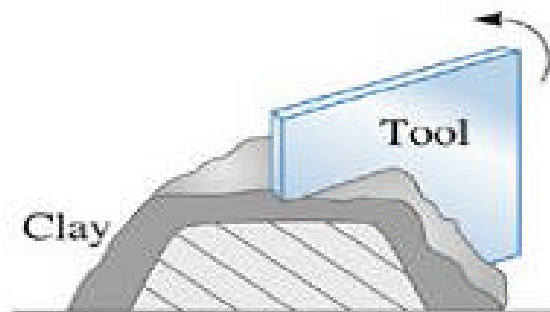
Prensagem Uniaxial



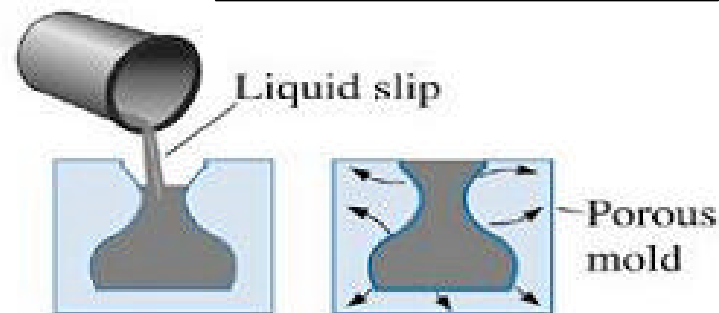
Prensagem Isostática



Extrusão



Torneamento

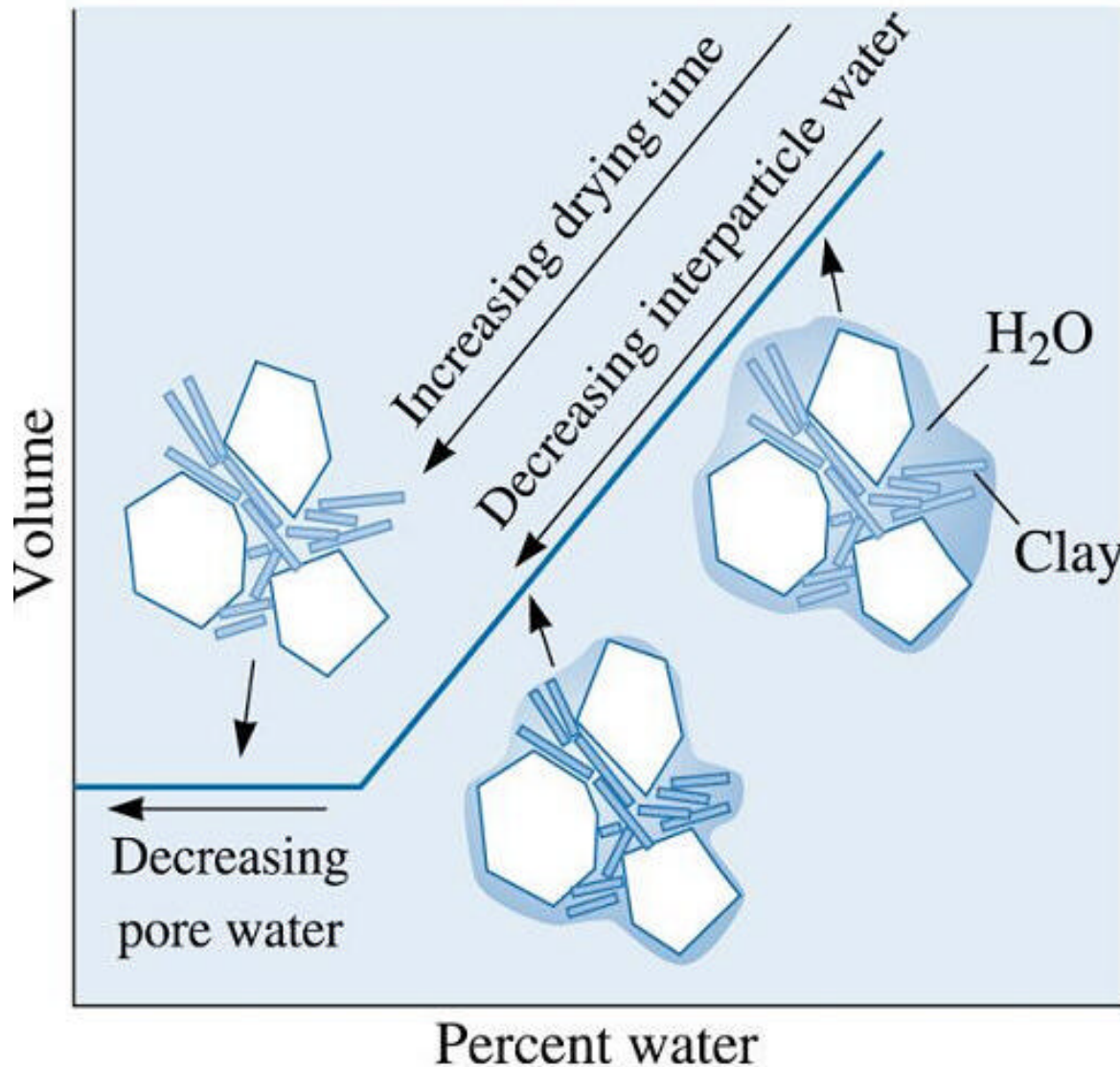


Colagem com barbotina

# Fabricação de Materiais Cerâmicos

## Secagem das Peças Conformadas

18



- Na secagem ocorre perda de massa e retração pela remoção gradativa de umidade.
- A peça seca pode passar por uma etapa de acabamento:
  - acabamento superficial e montagem das peças (por exemplo, asas das xícaras).
  - aplicação de esmaltes ou vidrados.

## Fabricação de materiais cerâmicos particulados

### Queima das peças após secagem

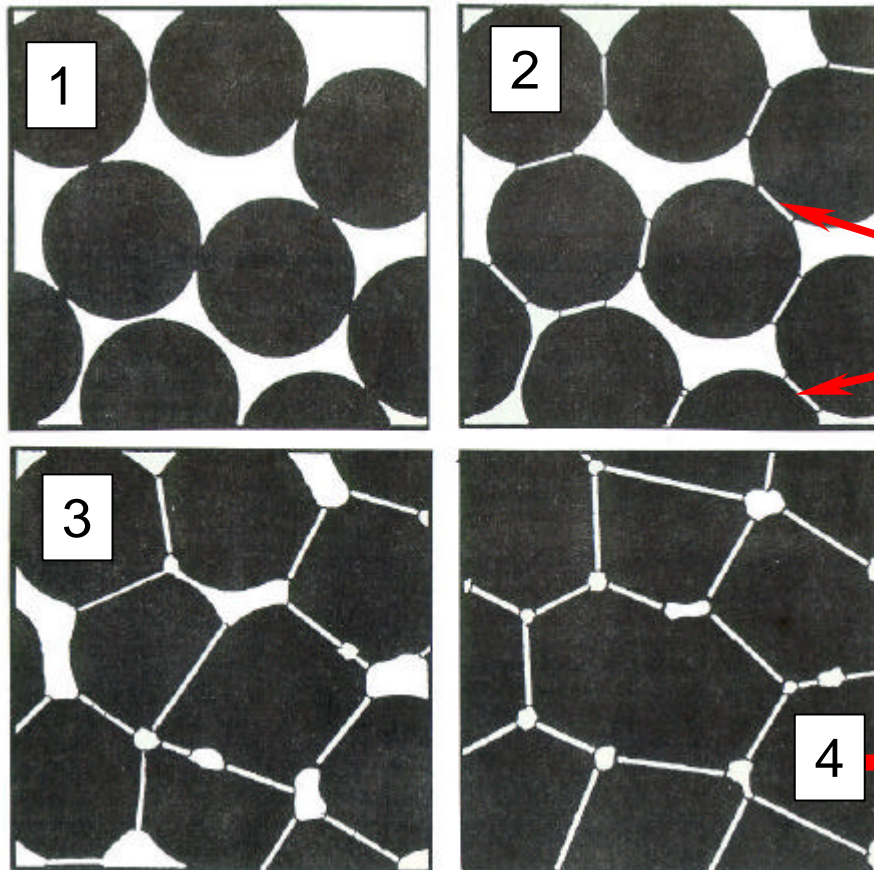
As peças são queimadas geralmente entre 900°C e 1400°C. Esta temperatura depende da composição da peça e das propriedades desejadas. Durante a queima ocorre um aumento da densidade e da resistência mecânica devido à combinação de diversos fatores, mencionados abaixo.

Na queima ocorrem os seguintes fenômenos:

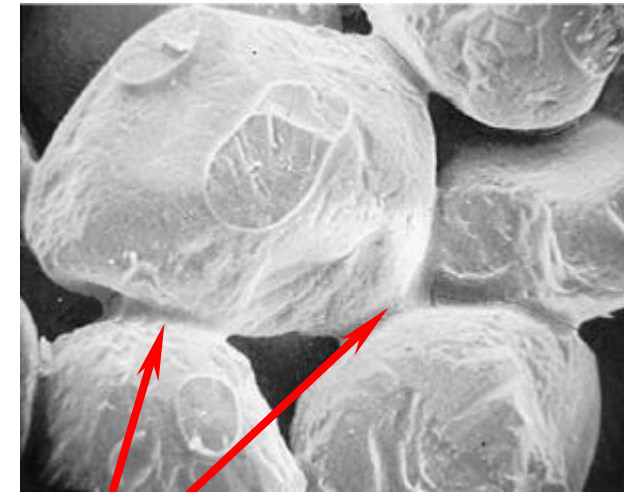
- Eliminação do material orgânico (dispersantes, ligantes, material orgânico nas argilas)
- decomposição e **formação de novas fases** de acordo com o diagrama de fases (formação de alumina, mulita e vidro a partir das argilas)
- **Sinterização** (eliminação da porosidade e densificação)

# Sinterização durante a queima

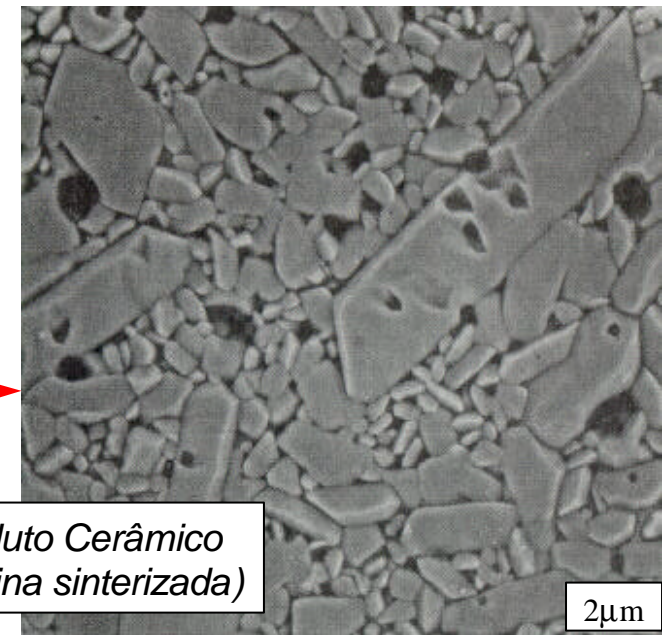
- O potencial para a sinterização é a diminuição da quantidade de superfície por unidade de volume.
- O transporte de massa ocorre por difusão.



Representação esquemática de etapas do processo de sinterização



Formação do "pescoço"



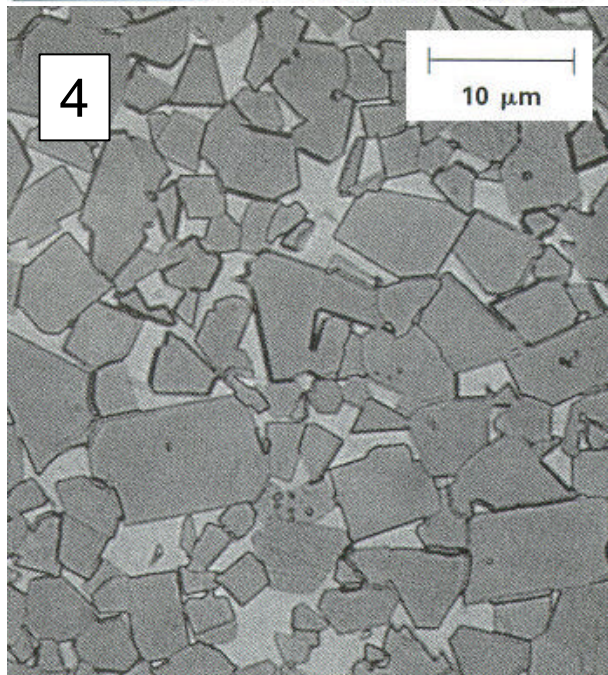
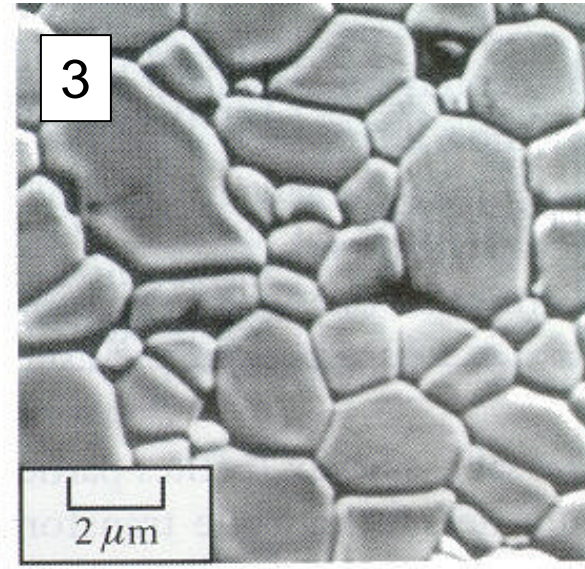
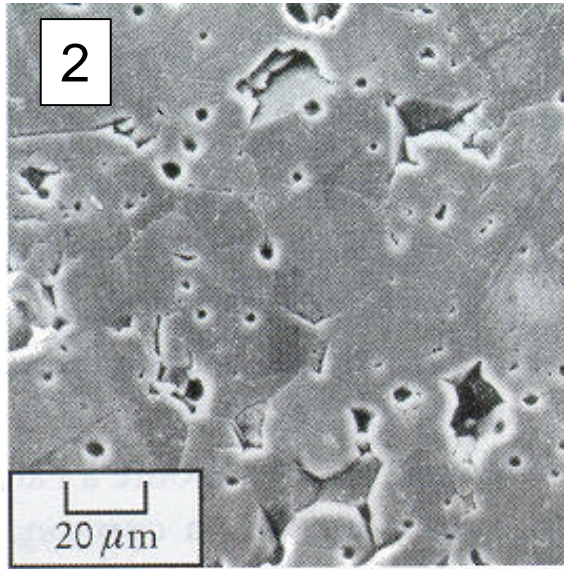
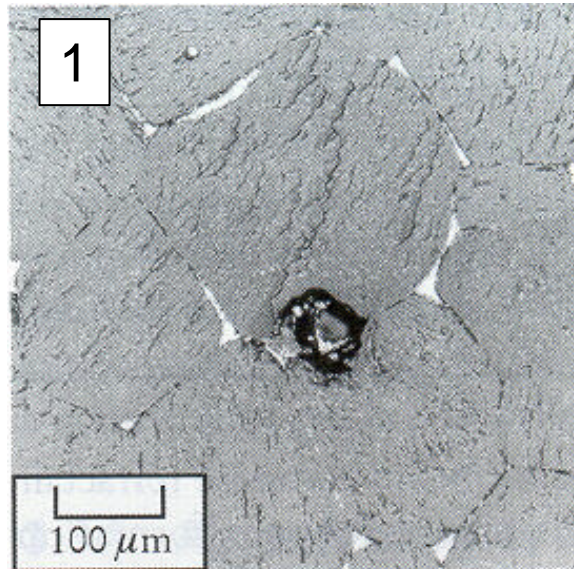
Produto Cerâmico (alumina sinterizada)

2µm



# Microestruturas de Produtos Cerâmicos

21



1. Tijolo refratário. Podem ser observados: entre os grãos, a presença de fase vítrea; um poro, no meio da foto.
2. Alumina (98% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) utilizada como isolante elétrico. Os poros na microestrutura podem ser perfeitamente observados.
3. Alumina densa (99,7% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), com grãos finos.
4. Peça para uso em alta temperatura e condição de alta resistência ao desgaste, em WC-Co, mostrando a presença de fase líquida entre os grãos.

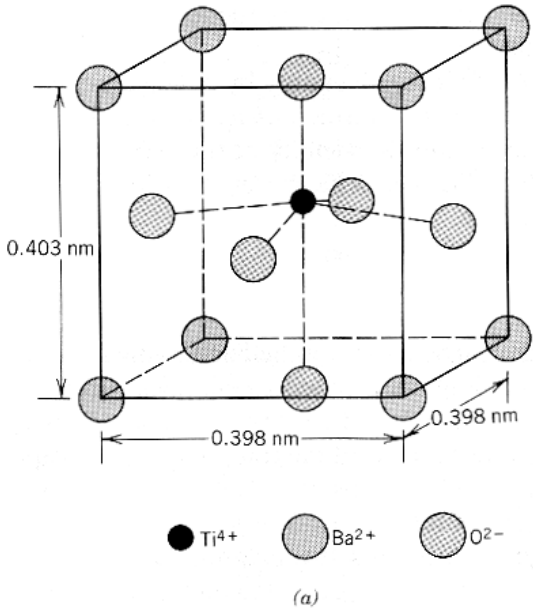
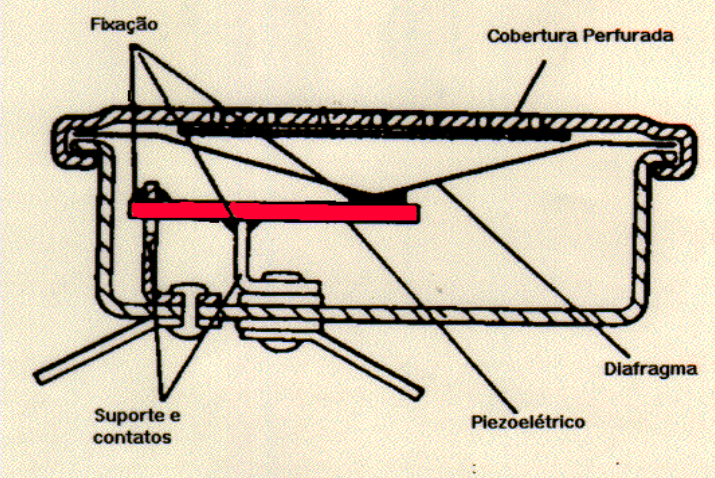
## Cerâmicas de alta tecnologia

- Os processos de fabricação desses materiais podem diferir muito daqueles das cerâmicas tradicionais.
- As matérias primas são muito mais caras, porque tem qualidade muito melhor controlada (controle do nível de impurezas é crítico).
- As aplicações são baseadas em propriedades mais específicas:
  - elétricas
    - sensores de temperatura (NTC, PTC)
    - ferroelétricos (capacitores, piezoelétricos)
    - varistores (resistores não lineares)
    - dielétricos (isolantes)
  - térmicas
  - químicas
    - sensores de gases e vapores
  - magnéticas
  - ópticas
  - biológicas



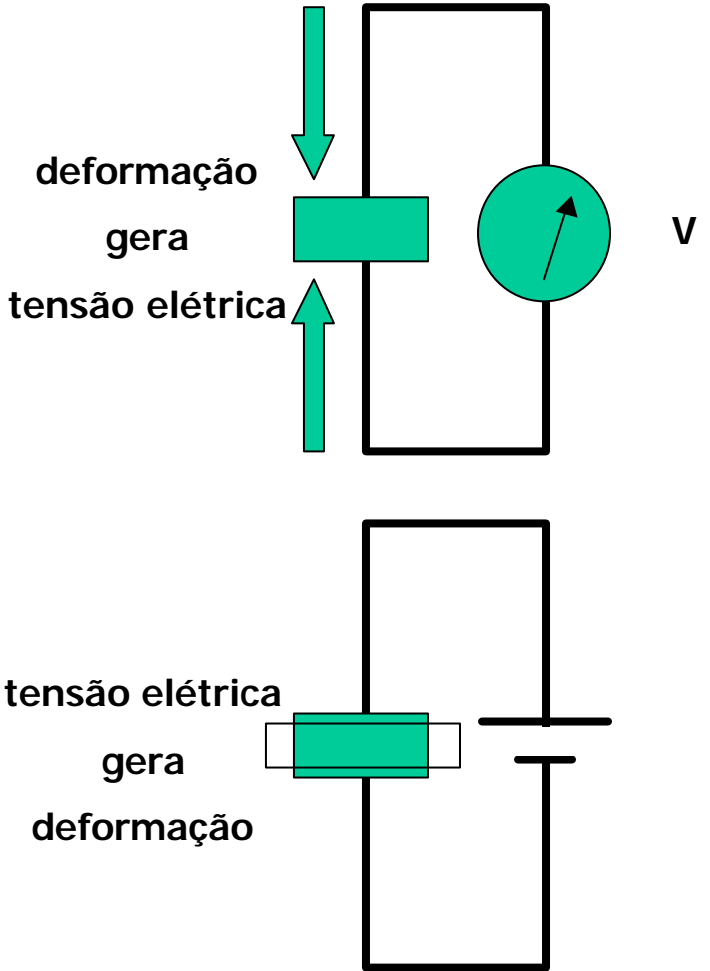
# Materiais Piezoelétricos

## Exemplo de Aplicação: Microfone



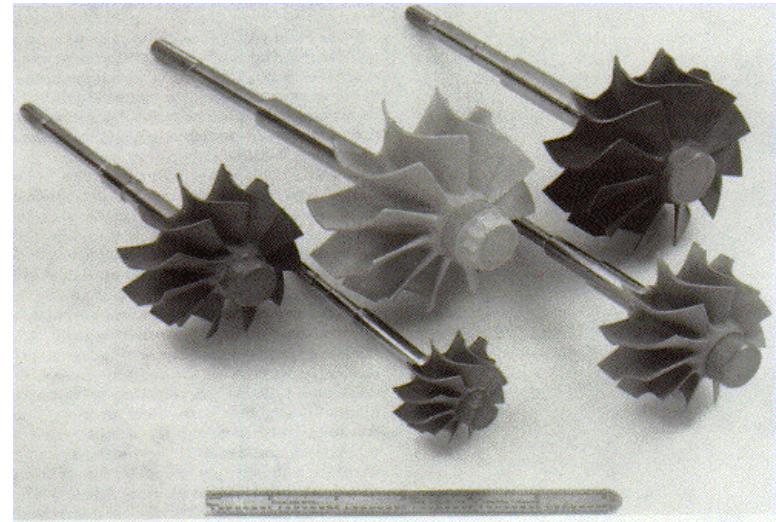
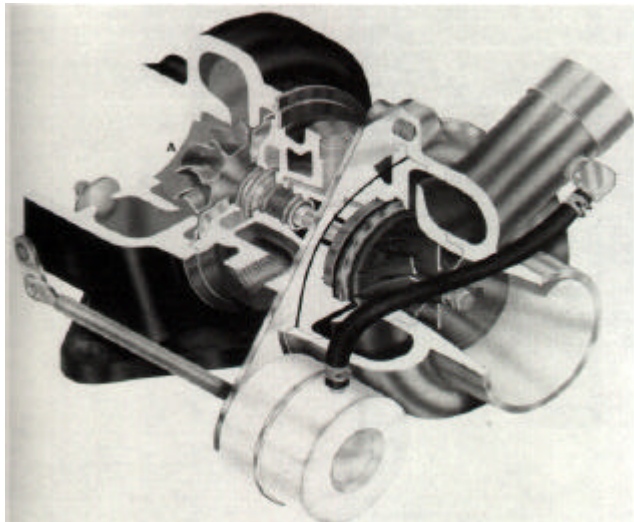
Estrutura Cristalina do titanato de bário ( $BaTiO_3$ )

## Princípio de Funcionamento



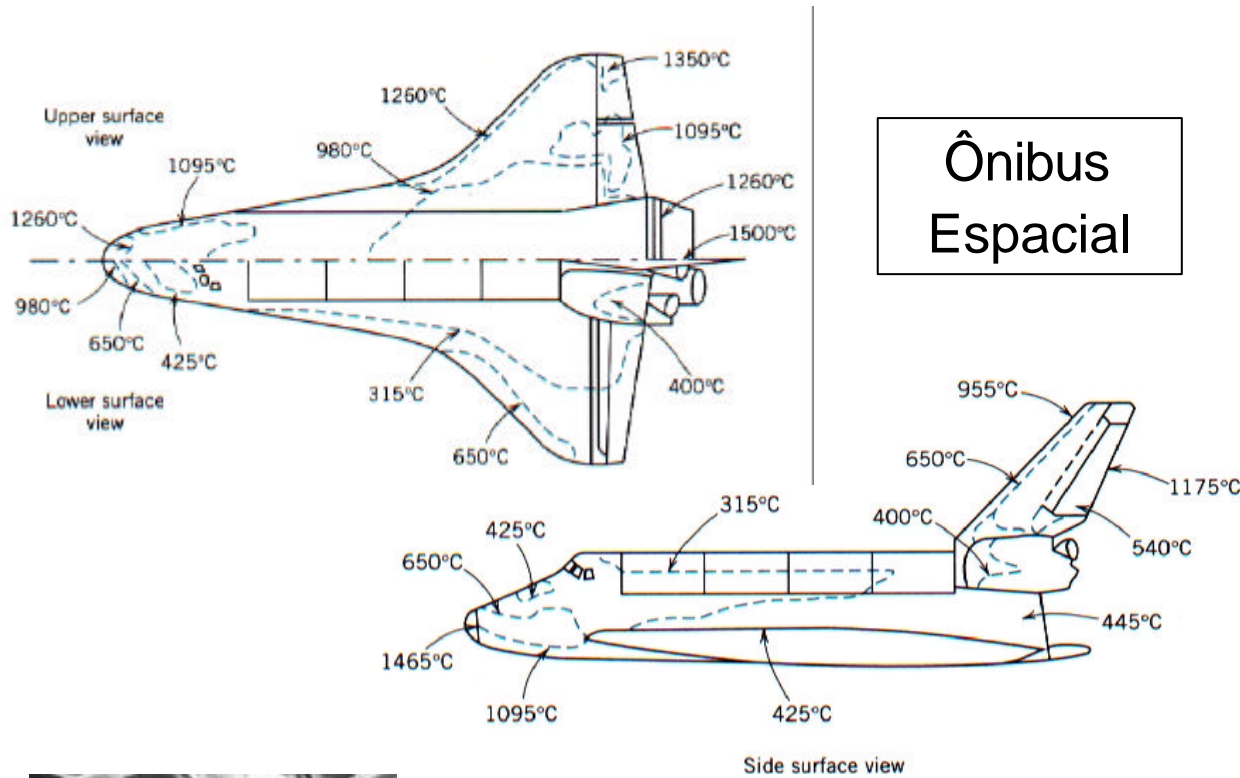
# Funções mecânicas e térmicas

- ferramentas de corte
  - principais materiais:  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiC}$ ,  $\text{TiN}$
- materiais resistentes em temperaturas elevadas
  - principais materiais:  $\text{SiC}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Si}_3\text{N}_4$
  - turbinas, turbo-compressores e trocadores de calor





# Ônibus Espacial

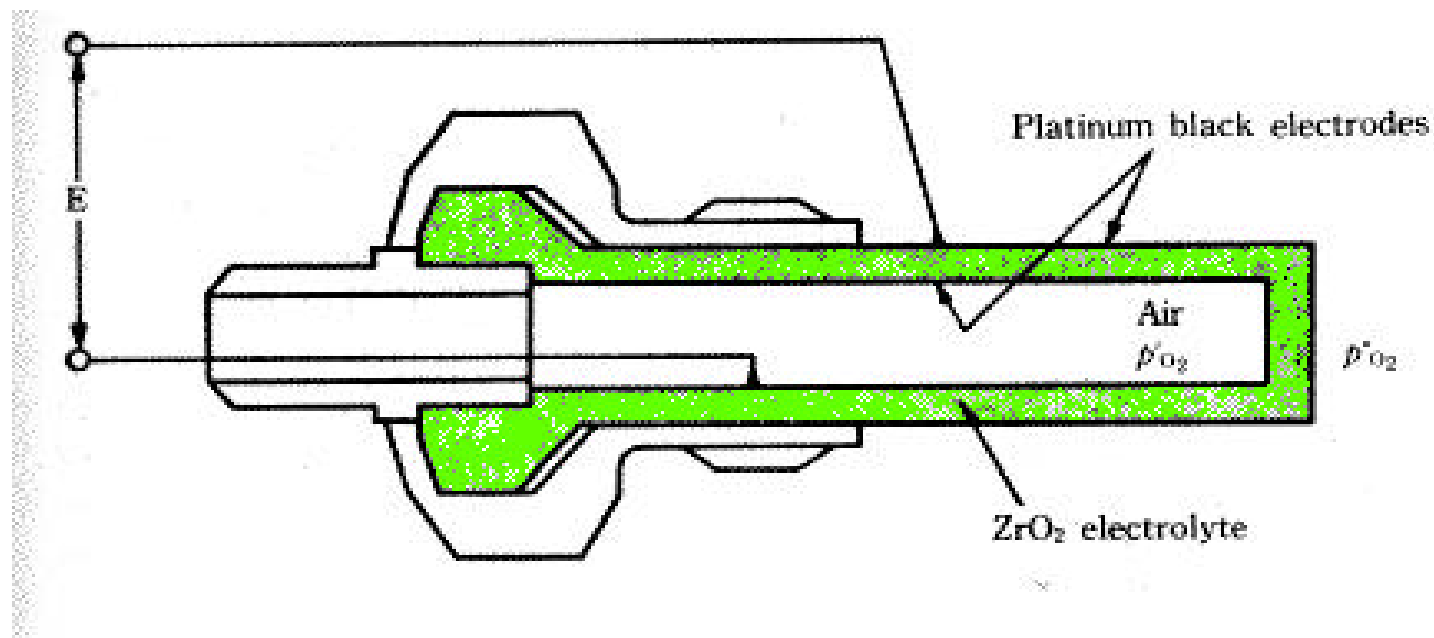


<i>Material Generic Name</i>	<i>Temperature Capability [°C (°F)]</i>	<i>Material Composition</i>	<i>Orbiter Locations</i>
Felt reusable surface insulation (FRSI)	To 400 (750)	Nylon felt, silicone rubber coating	Wing upper surface, upper sides, cargo bay doors
Low-temperature reusable surface insulation (LRSI) and high-temperature reusable insulation (HRSI)	LRSI—400–650 (750–1200) HRSI—650–1260 (1200–2300)	LRSI—Silica tiles, borosilicate glass coating HRSI—Silica tiles, borosilicate glass coating with SiB <sub>4</sub> added	LRSI—Upper wing surfaces, tail surfaces, upper vehicle sides HRSI—Lower surfaces and sides, tail leading and trailing edges
Reinforced carbon-carbon (RCC)	To 1650 (3000)	Pyrolyzed carbon-carbon, coated with SiC	Nose cap and wing leading edges

# Aplicações químicas

26

- sensores de gases
  - principais materiais:  $ZrO_2(O_2)$  ,  $ZnO$ ,  $SnO_2$ ,  $Fe_2O_3$  ( $H_2O$ )
  - alarme de vazamento de gases venenosos e hidrocarbonetos
  - sensor de oxigênio em veículos automotores
  - sensor de oxigênio na fabricação do aço



- Próteses e implantes
  - principais materiais:  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (bio-inerte) e hidroxiapatita (bio-ativa)
  - ossos artificiais, dentes e juntas



- Capítulos do Callister tratados nesta aula
  - Capítulo 13: seções 13.1 a 13.3; 13.5; 13.7; Resumo.
  - Capítulo 14: seções 14-1 até 14-8; 14.15; 14.18; Resumo.
  - Capítulo 23: seções 23-9 a 23-11 (aplicação do ônibus espacial).