

# **MATERIAIS DE ENGENHARIA**

## **- (SEM 5908) -**

*Aula 06 – Cerâmicas como Materiais de Engenharia*

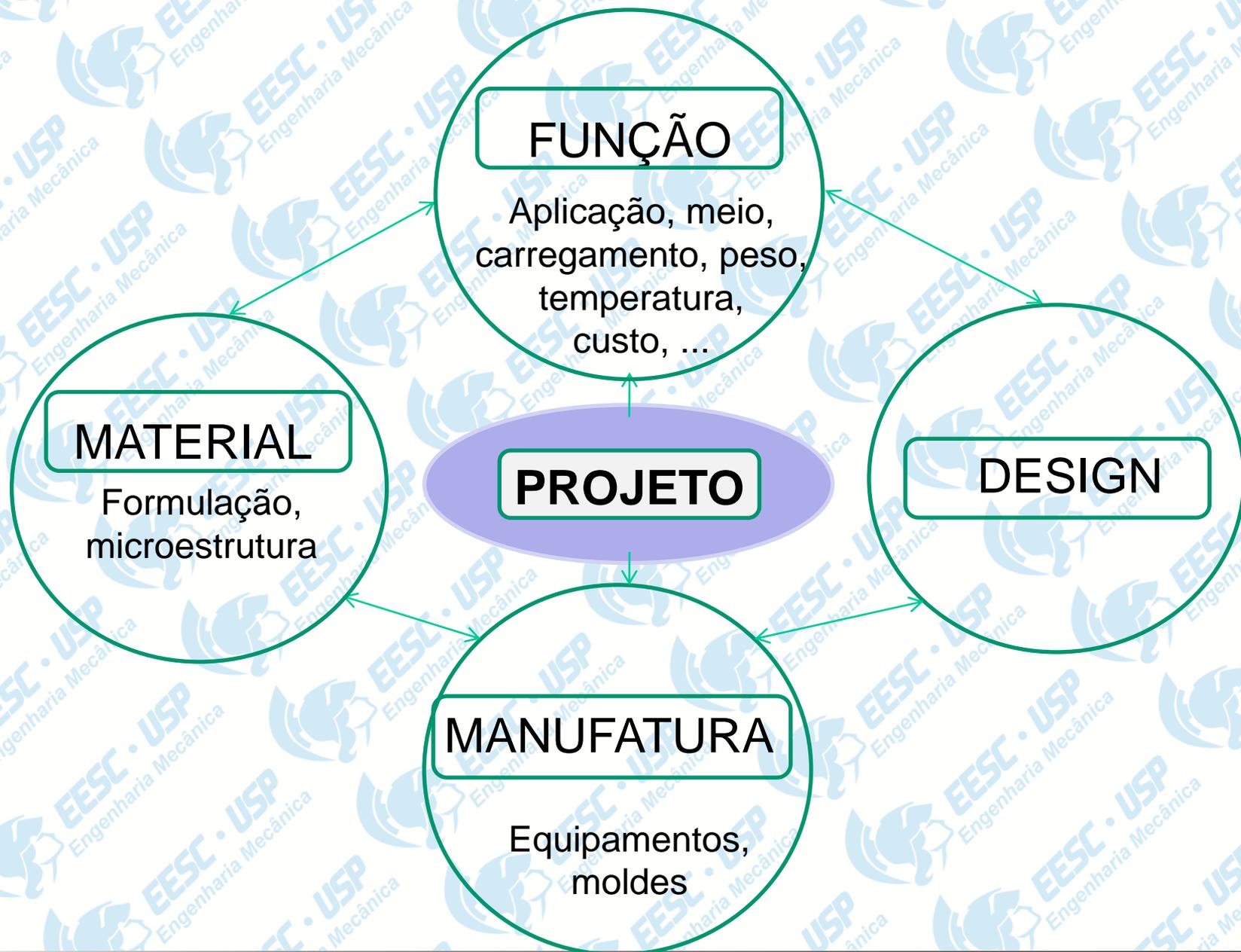
**Prof. Dr. João Manuel Domingos de Almeida Rollo**  
**Prof. Dr. Carlos Alberto Fortulan**



# OBJETIVOS DA AULA

- O que é um material cerâmico?
- Quais são suas propriedades?
- Quais são suas aplicações?
- Como fabricamos materiais cerâmicos?
- Como projetamos cerâmicas?





*APLICAÇÕES*

# Cerâmicas Sujeitas ao Desgaste

Pistões e camisas:

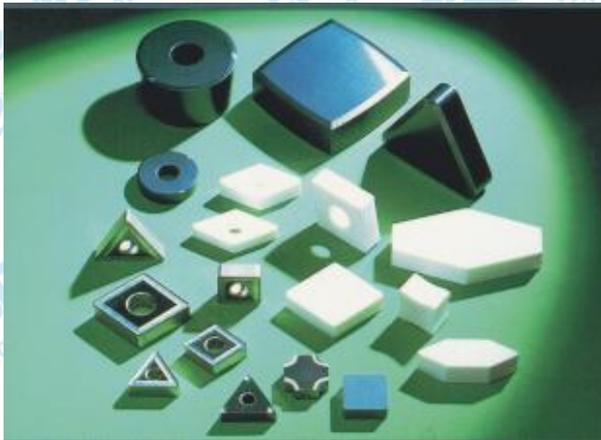


FELDMÜHLE AKTIENGESELLSCHAFT

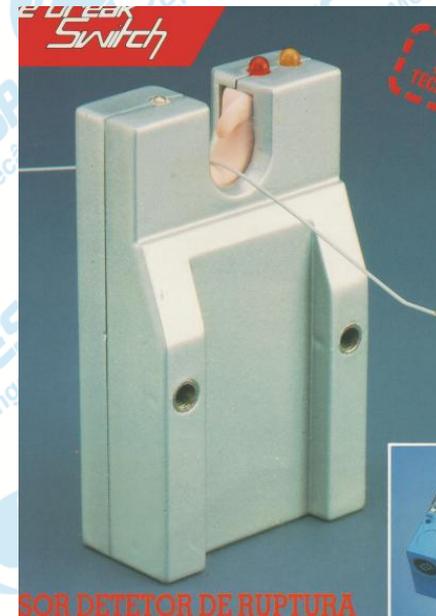


# Cerâmicas Sujeitas ao Desgaste

Ferramentas de usinagem



Guia fios



# Cerâmicas que requer dureza



# Cerâmicas: desgaste e ataque químico

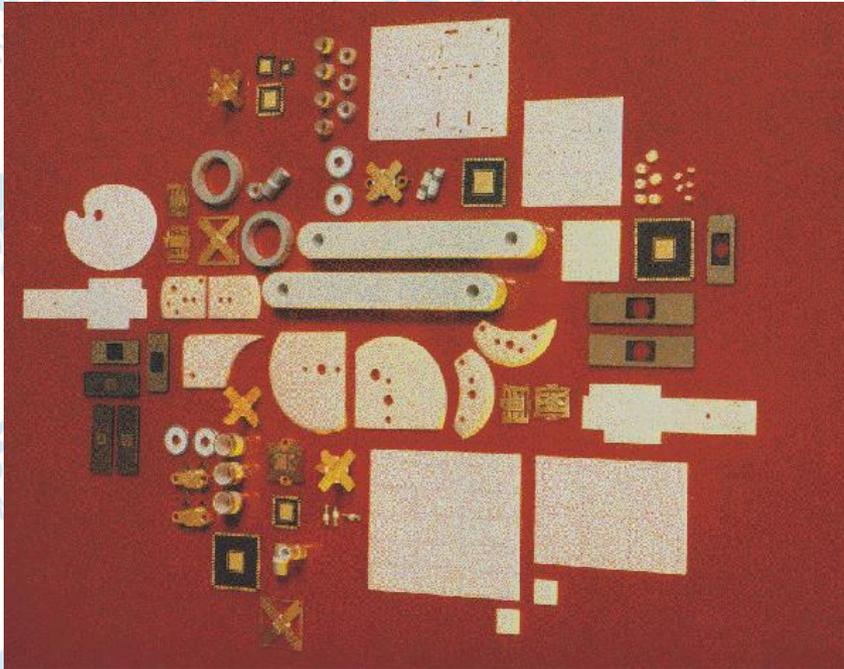
Válvulas e selos mecânicos:



FELDMÜHLE AKTIENGESELLSCHAFT



# Cerâmicas para uso Eletro - Eletrônica

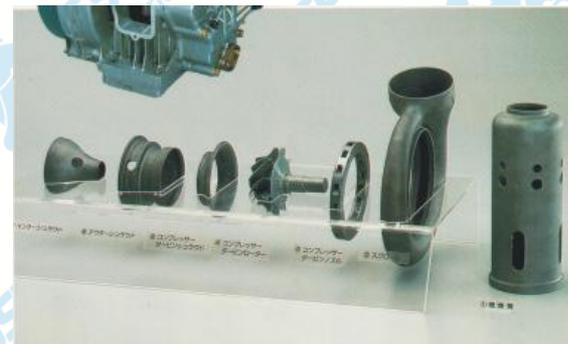


# Cerâmicas para uso automobilístico

Em motores:



NTK



# Cerâmicas - Componentes

Mancais:



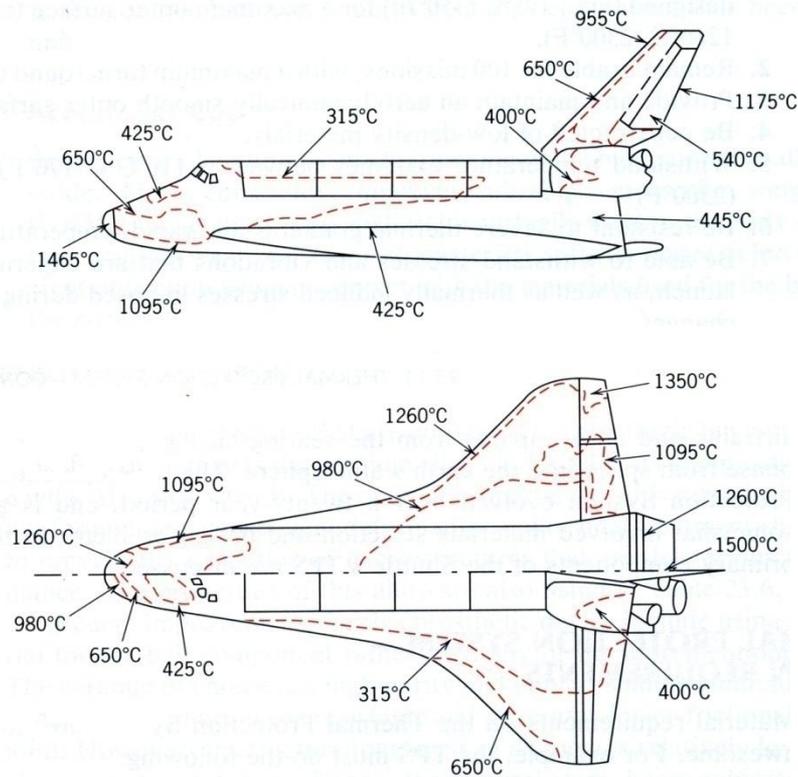
Componentes de bombas:



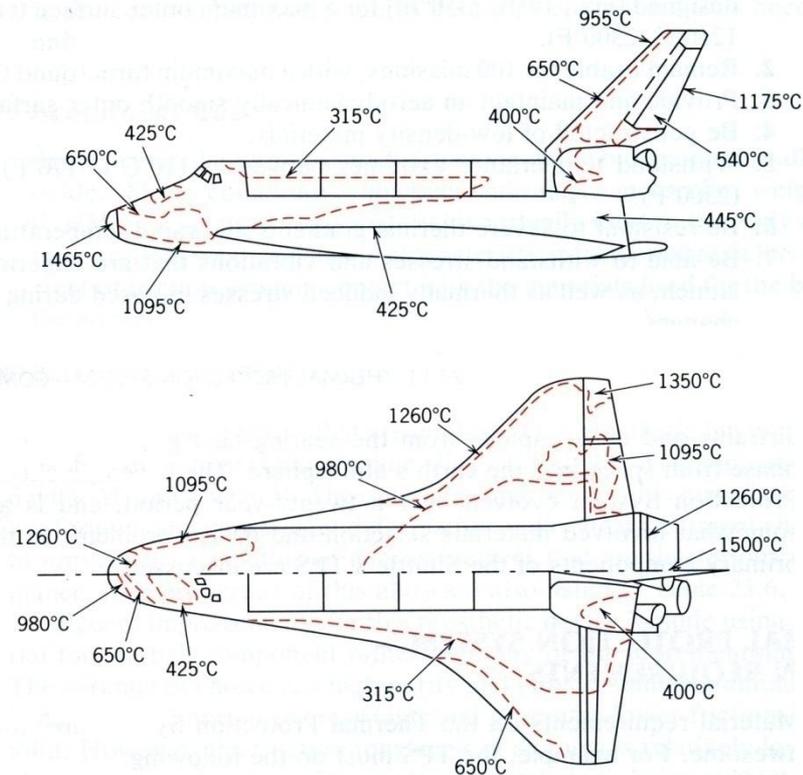
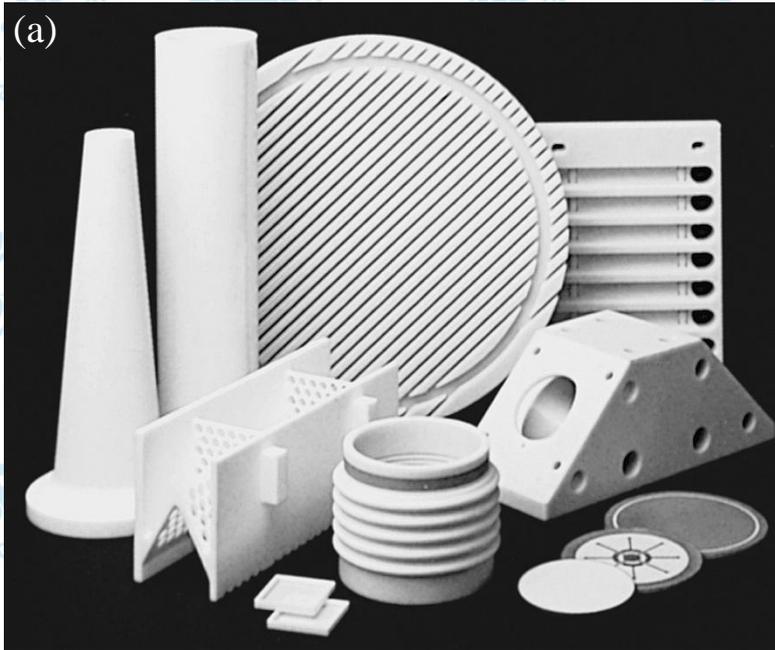
FELDMÜHLE AKTIENGESELLSCHAFT



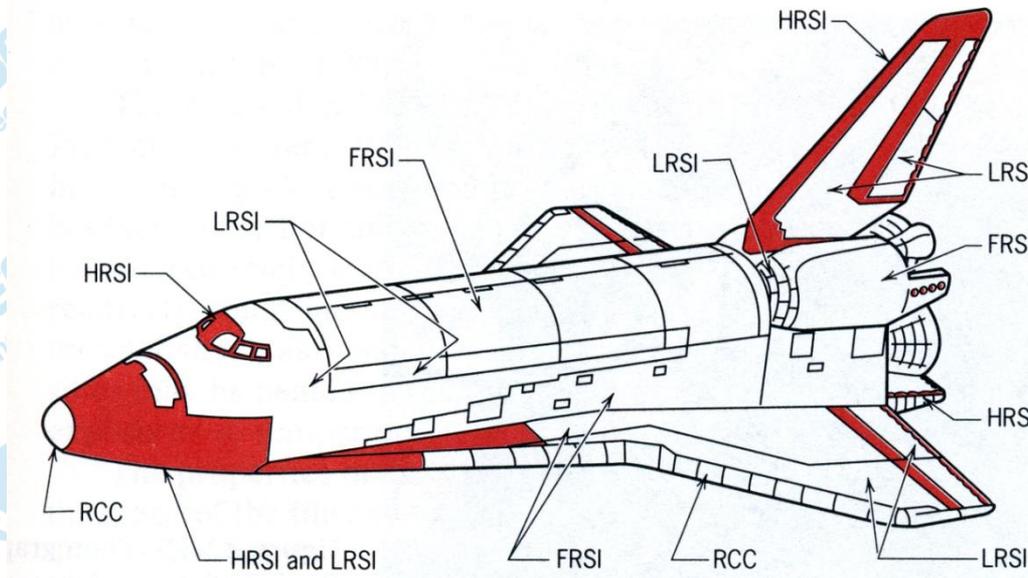
# Aeroespacial



# Produtos para alta temperatura



Fonte: Wesgo Div., GTE.



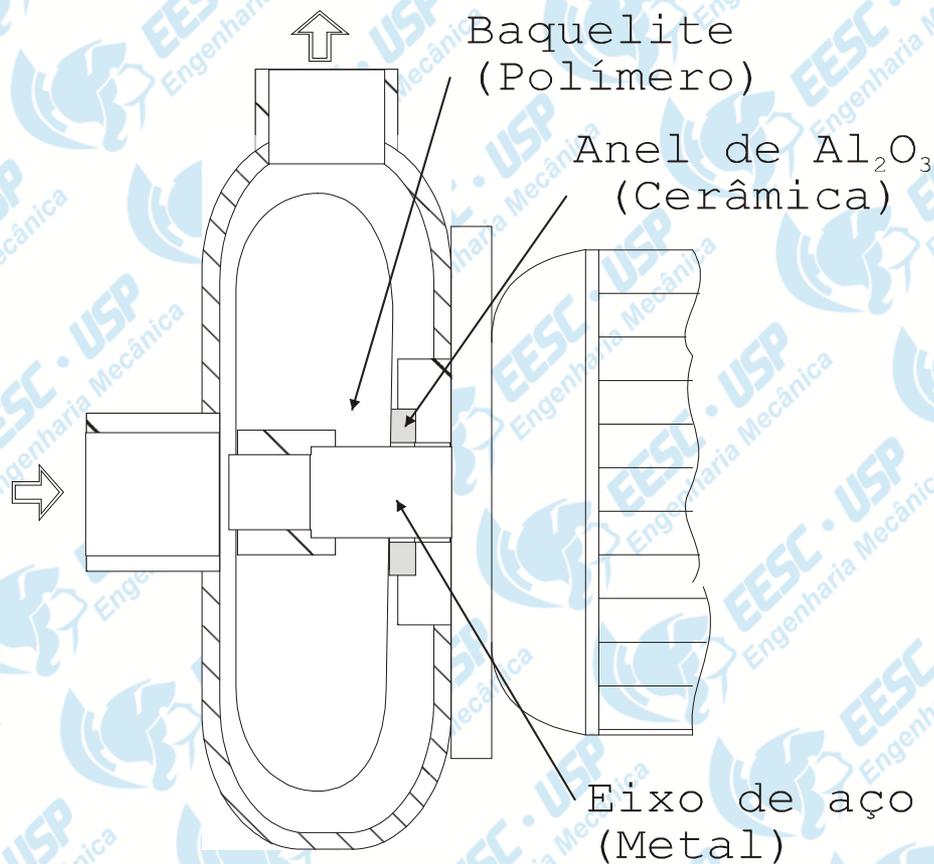
# Componentes de Grafite



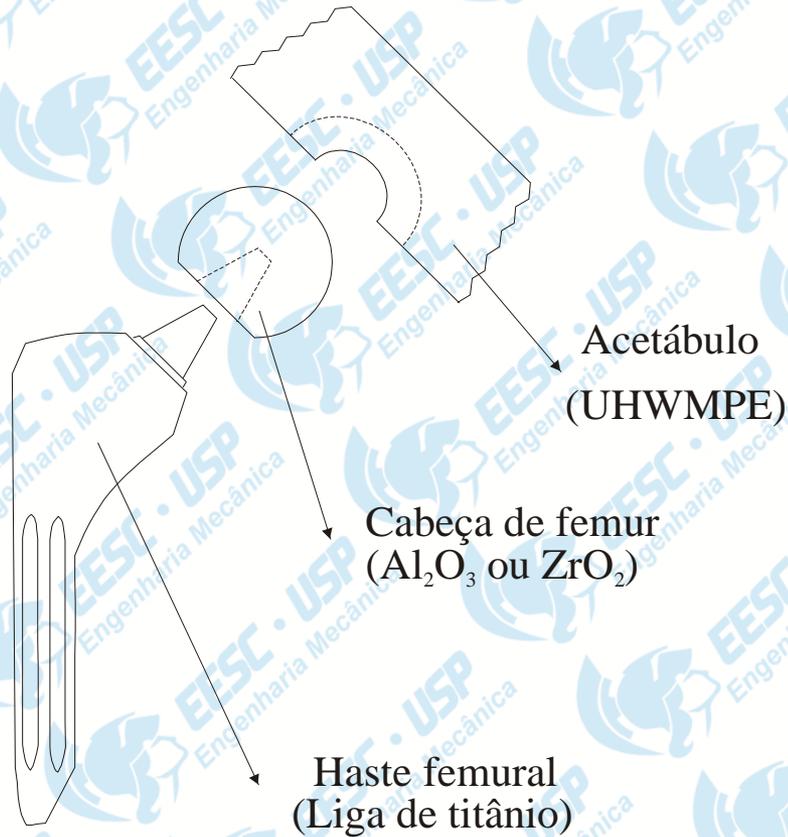
Fonte: Poco Graphite, Inc., a Unocal Co.



# Aplicações conjugadas - Bomba d'água



# Aplicações conjugadas - Implante de fêmur



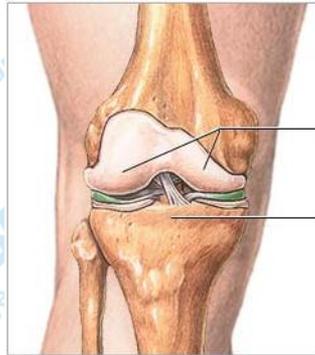
# Aplicações como biomateriais



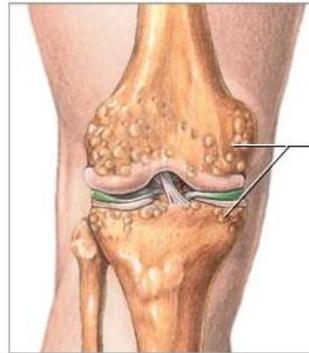
<http://sciencelearn.org.nz/Contexts/Ceramics/Sci-Media/Video/What-are-bioceramics-and-biomaterials>



# Aplicações como biomateriais



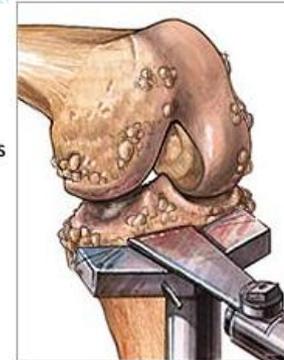
Femoral condyles  
Tibial plateau



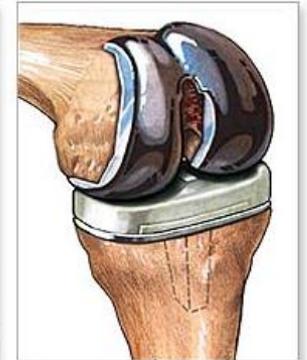
Osteoarthritis of the knee

ADAM.

Shaved head of tibia



Prosthesis in place



Before



After



ADAM.

<http://adam.about.com/encyclopedia/9494.htm?terms=knee+prostheses>



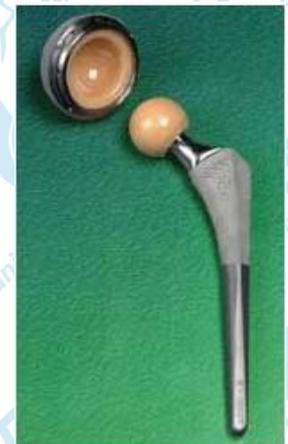
# Aplicações como biomateriais



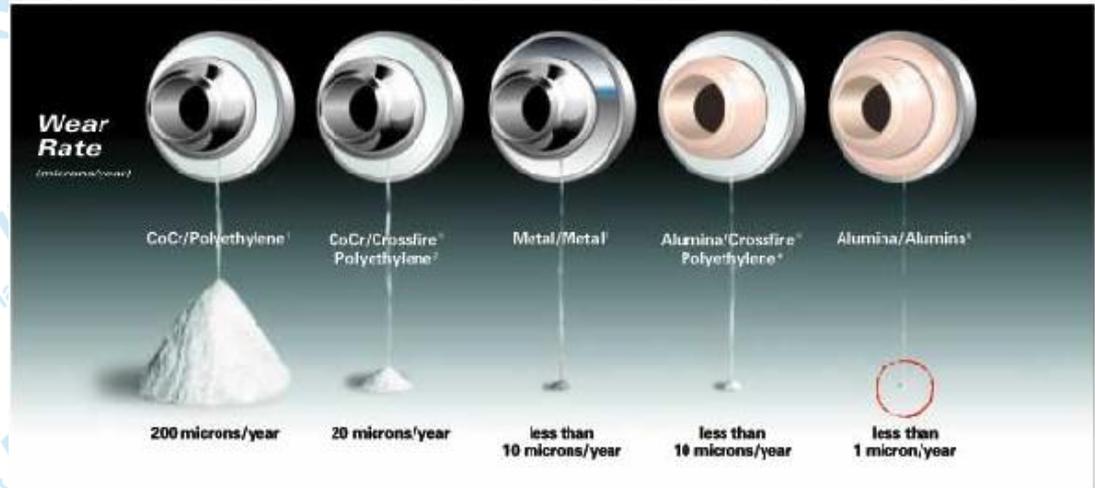
• Trident® Ceramic Hip



Conventional Implant



Ceramic Implant



<sup>1</sup> Wilman G, "Ceramics for Total Hip Replacement - What a Surgeon Should Know," Orthopedics, Vol. 1998, No. 2, February 1998.  
<sup>2</sup> Howmedica Osteonics White Paper, Literature No. LSA23.  
<sup>3</sup> Schmiedel T, et al, "Long-Duration Metal-on-Metal Total Hip Arthroplasties with Low Wear of the Articulating Surfaces," Journal of Arthroplasty Vol. 11 No. 3, 1996.  
<sup>4</sup> Data on file at Howmedica Osteonics.  
<sup>5</sup> Taylor SK, Serstari P, Manley M, "Wear Performance of a Contemporary Alumina: Alumina Bearing Couple Under Hip Joint Simulation," Trans. 46th Ann. Mtg. OAS, 31, 1998.



# Aplicações como biomateriais



[HEIMKE (1987)].

<http://www.z-systems.biz/index.php?id=119>  
02/10/2008

Time for zirconia

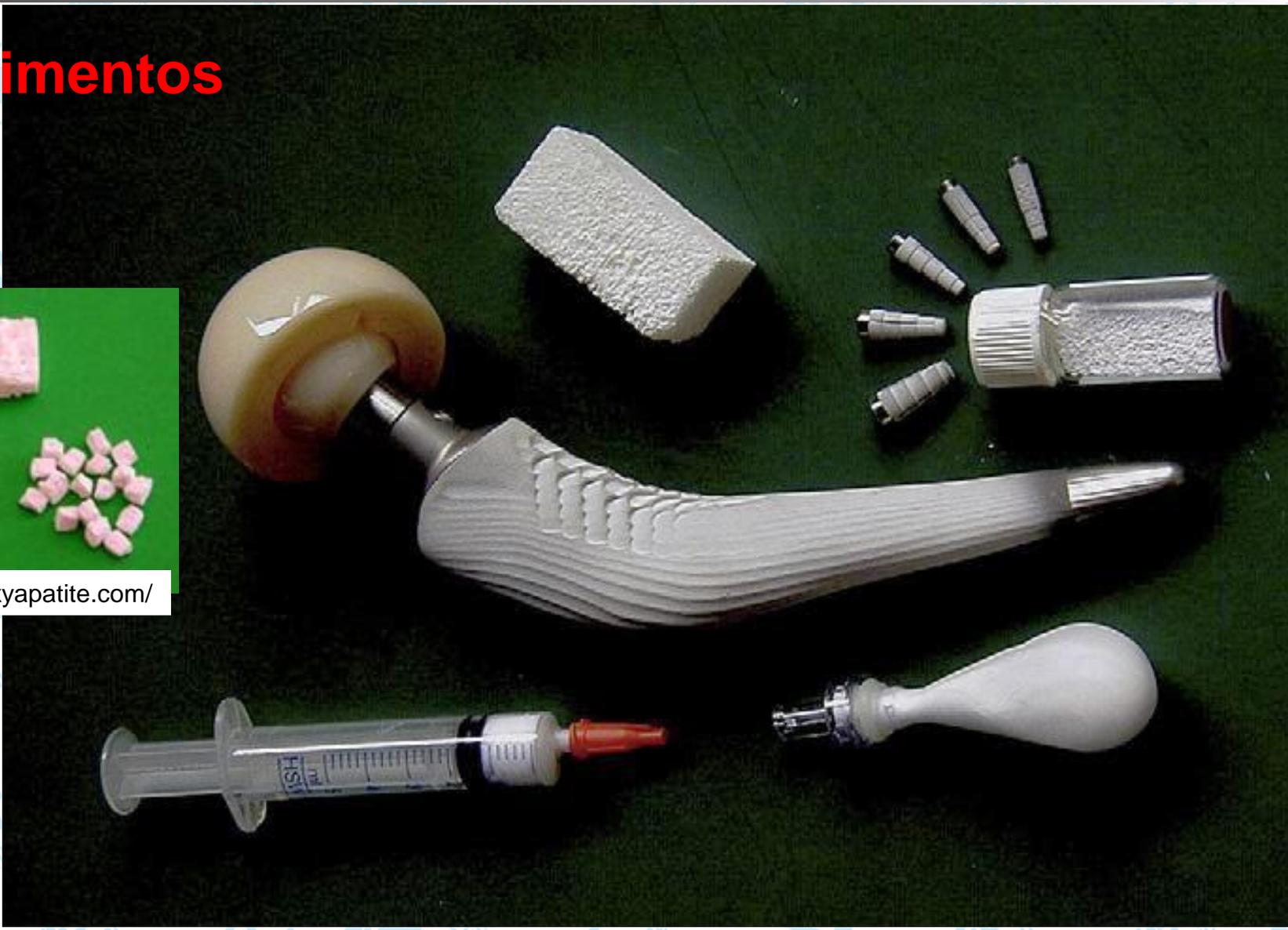
Metal-free dental aesthetics with Z-Systems



# Recobrimentos

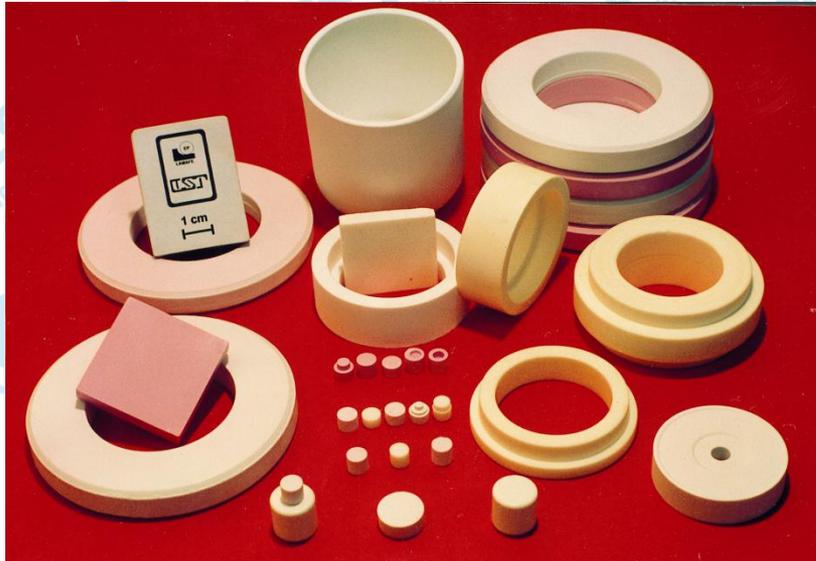


<http://www.hydroxyapatite.com/>



# LTC/USP – Aplicações

## Componentes



# *CIÊNCIA DOS MATERIAIS*

# Materiais

## METÁLICOS

São tenazes, resistentes, pesados e, de modo geral insuficientemente rígidos

## POLÍMEROS

São leves, de fácil processamento, mas não são resistentes nem estáveis com a temperatura.

## CERÂMICAS

Incluindo os vidros são duros, rígidos mas também frágeis

## COMPÓSITOS

São materiais que consistem de pelo menos, dois componentes: a matriz e o agente de reforço. O principal objetivo é o de melhorar determinadas propriedades da matriz com características complementares.



# LIGAÇÕES

LIGAÇÕES  
PRIMÁRIAS OU  
FORTES  
100 Kcal/mol

LIGAÇÕES  
SECUNDÁRIAS  
OU FRACAS  
10 Kcal/mol

Forças de  
Van-der-Waals

Ligação  
IÔNICA

Atração entre  
íons negativos  
e positivos.

Ligação  
METÁLICA

Elétrons  
Livres  
formando uma  
Nuvem  
eletrônica.

Ligação  
COVALENTE

Compartilhamento dos  
elétrons de valência.  
Apresentam  
características de  
direcionalidade



# Arranjos Atômicos

## Estruturas Cristalinas

Formação de cristais, isto é, arranjos ordenados e simétricos dos átomos no espaço.

Monocristais

Policristais

## Estruturas Amorfas ou Vítreas

Arranjos desordenados e assimétricos dos átomos, similares à estrutura no estado líquido, embora mais compacta.

## Estruturas Moleculares ou Poliméricas



# Classificação de Material Cerâmico?

- Cerâmica Tradicional
  - Produtos baseado em argila
- Cerâmica Estrutural
  - Uso visando as Propriedades Mecânicas
- Cerâmicas Funcionais
  - Uso visando outras propriedades: propriedades elétricas, óticas, magnéticas



# Classificação

CERÂMICAS

Engloba os materiais que contém a fase cristalina em proporção majoritária.

Materiais inorgânicos não cristalinos.  
Apresentam o fenômeno da transição vítrea.

VIDROS

VITRO-  
CERÂMICAS

Materiais policristalinos que contém fração minoritária de fase vítrea.

Cerâmicas fabricadas à partir de matérias primas naturais.

CERÂMICAS  
TRADICIONAIS

CERÂMICAS  
AVANÇADAS

Cerâmicas obtidas à partir de matérias primas sintéticas e com pureza controlada.

*Cerâmicas finas*

*Cerâmicas de alto desempenho*

*Cerâmicas especiais.*



*PROPRIEDADES*

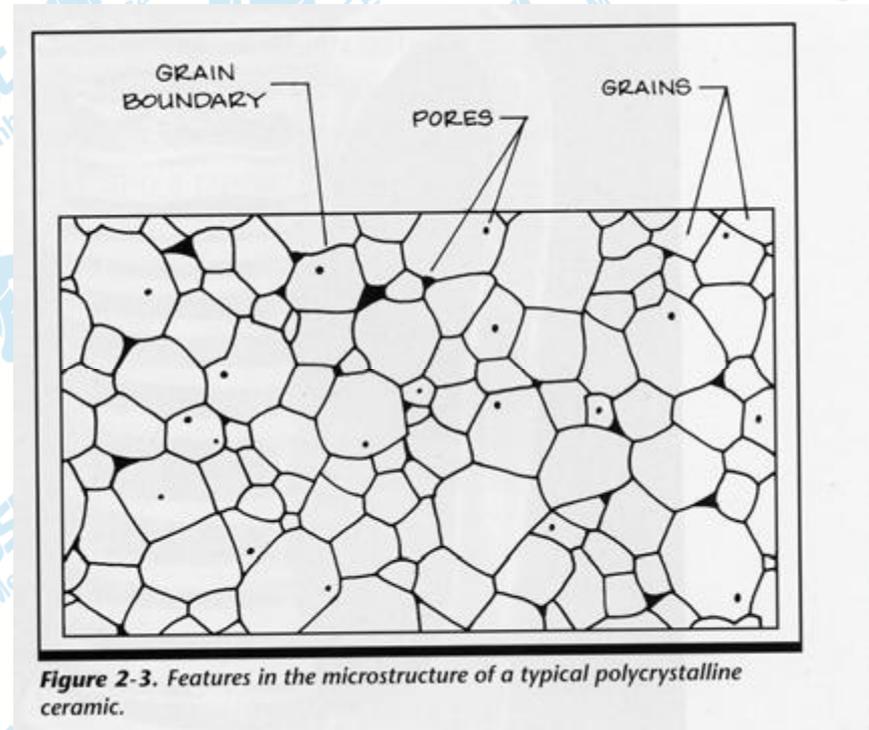
# Caraterísticas Gerais

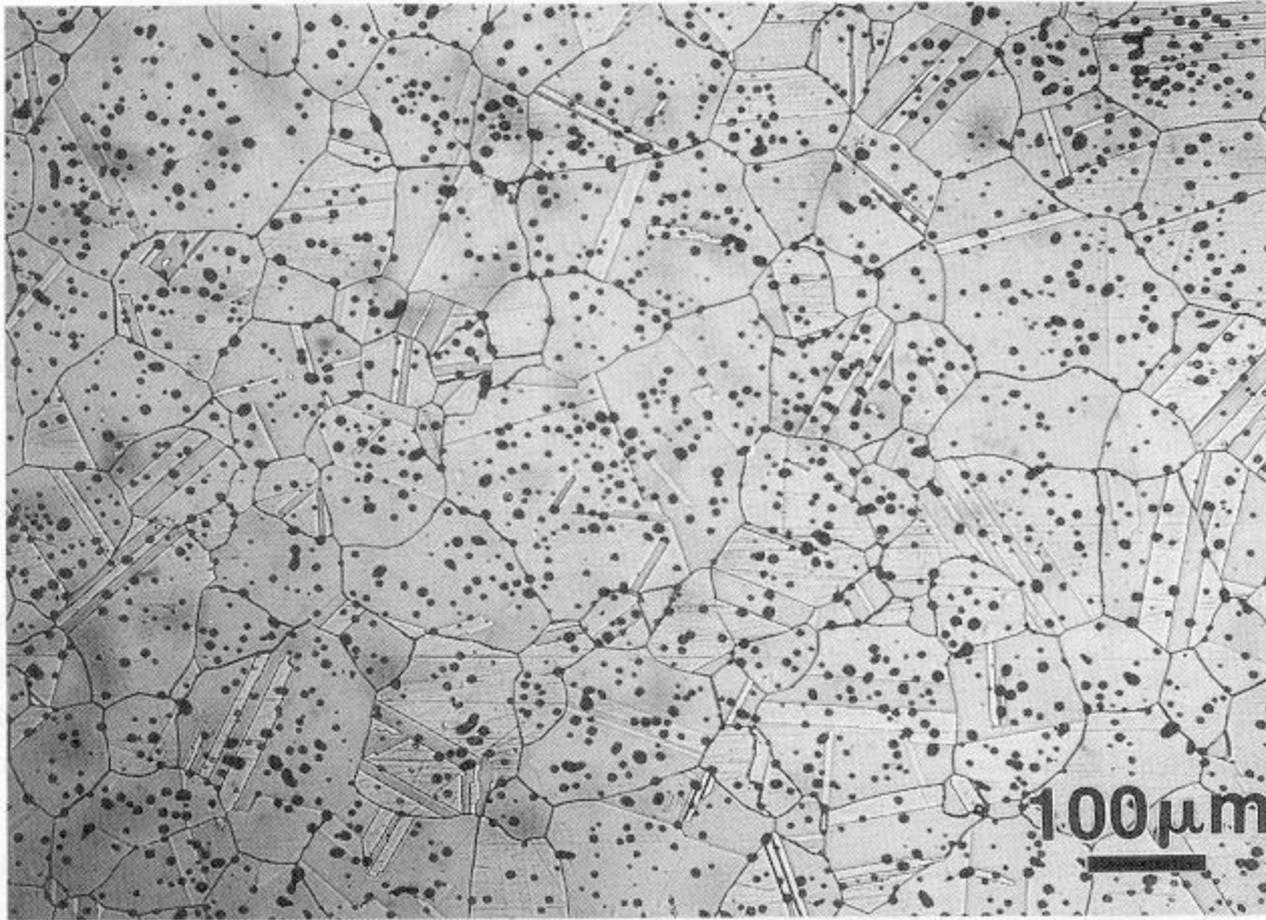
- ✓ Materiais inorgânicos não metálicos
- ✓ Compostos de fase cristalina e não cristalina;
- ✓ Estável termodinamicamente
- ✓ Inércia química
- ✓ Relativa baixa toxicidade
- ✓ Características Mecânicas
  - ✓ Resistente
  - ✓ Duro
  - ✓ Frágil
  - ✓ Porosidade

Os deslocamentos em cerâmicas são inexistentes ou desprezíveis. Devido a natureza rígida e direcional das ligações covalentes.

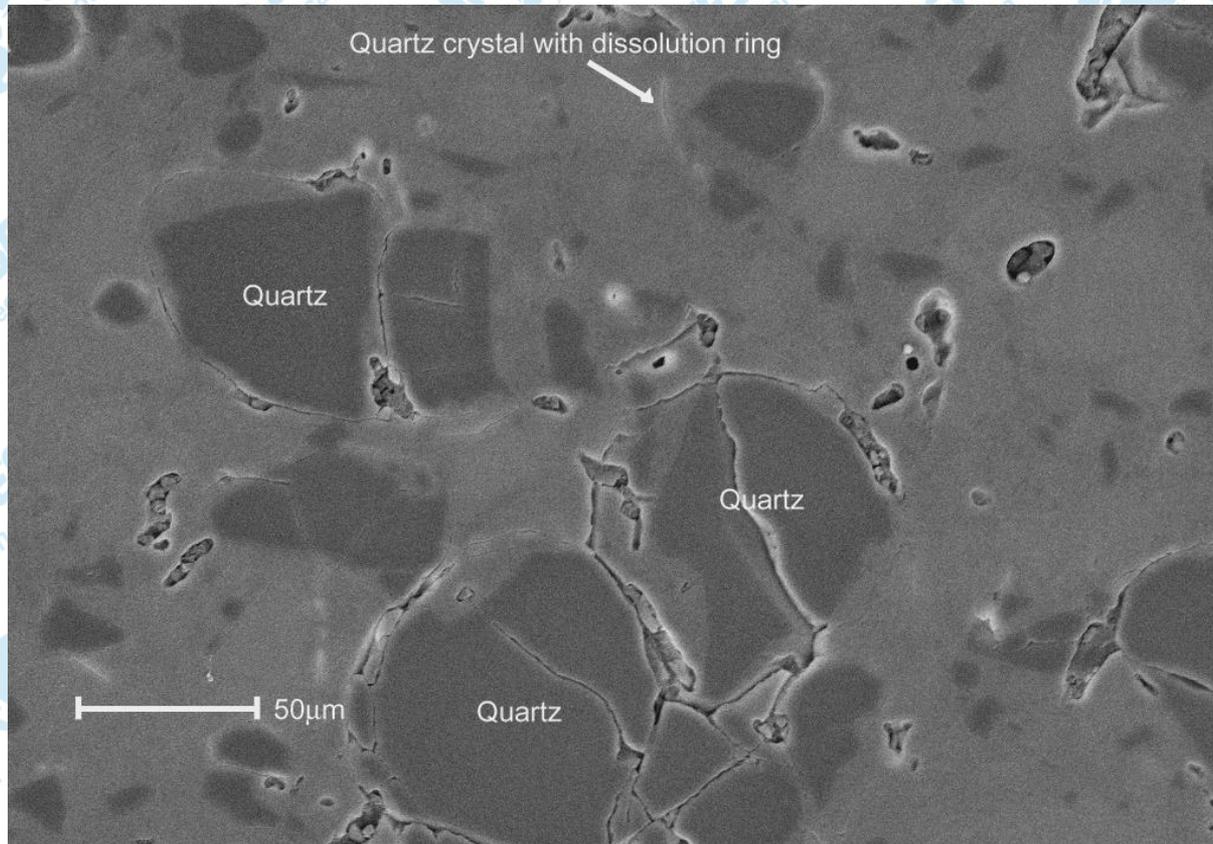
# O que irá determinar suas propriedades?

- Composição Química?
- Microestrutura/Nanoestrutura?
- Defeito estrutural?





# Porcelana

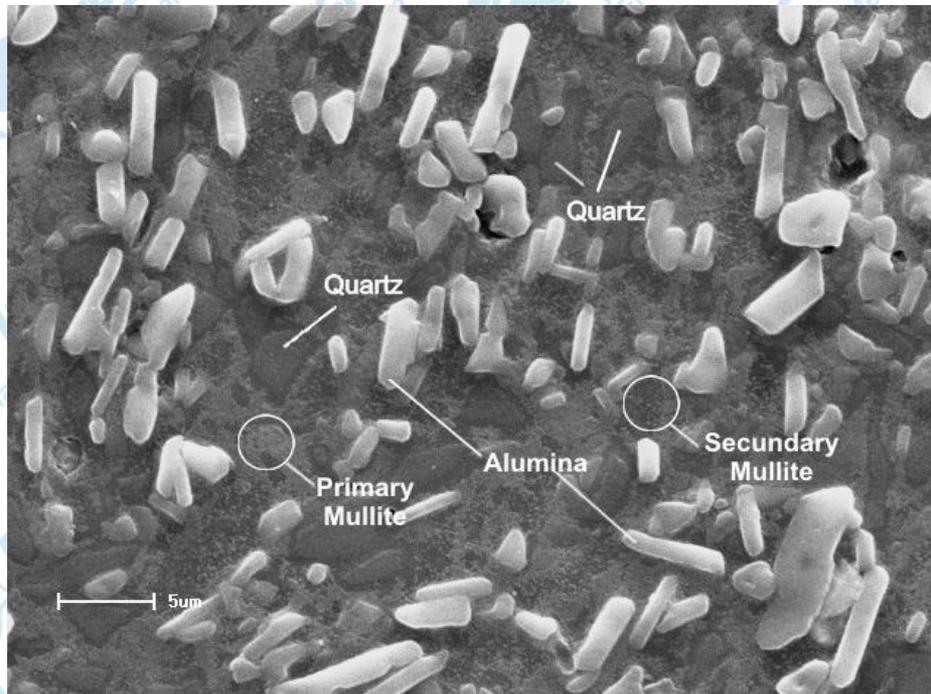


Fortulan et al. (2011) Influence of alumina content on green machined electrical porcelain. *Industrial Ceramics*.

47 MPa



# Porcelana de alta alumina 50 vol%



Fortulan et al. (2011) Influence of alumina content on green machined electrical porcelain. *Industrial Ceramics*.

185 MPa



# Porcelana de alta alumina 70 vol%



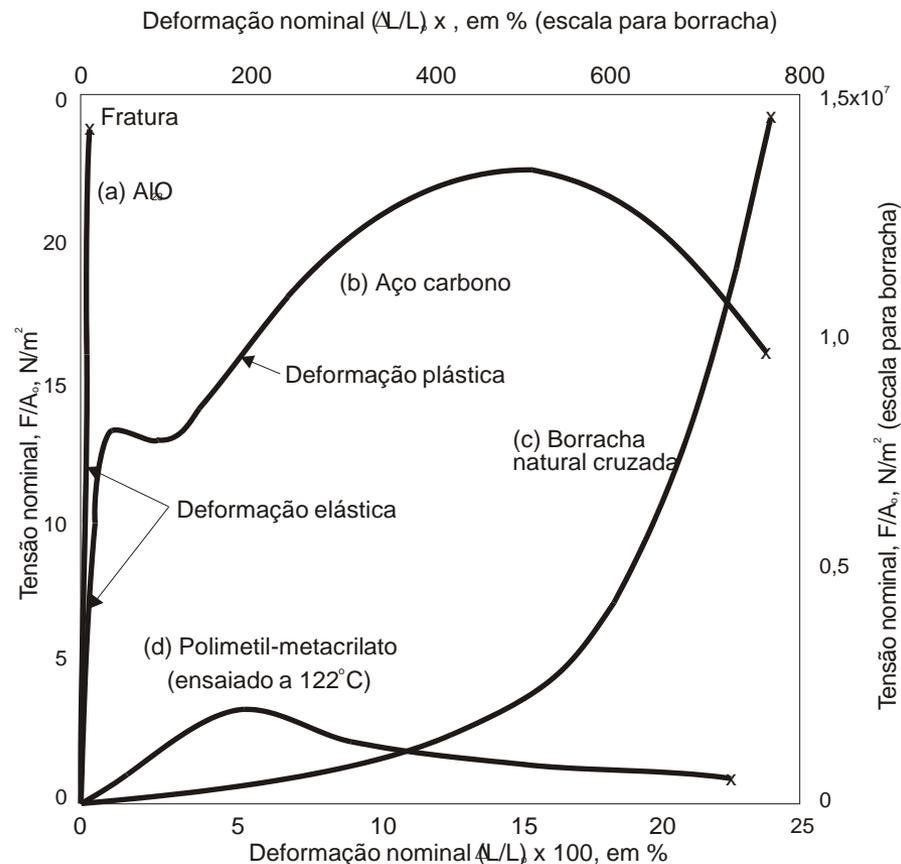
Fortulan et al. (2011) Influence of alumina content on green machined electrical porcelain. *Industrial Ceramics*.

200 MPa



# Efeitos da aplicação de cargas

“Fratura frágil”. É uma das características mais críticas que deve ser considerado em projetos de aplicações estruturais.



# Módulo de elasticidade

Cerâmicas policristalinas apresenta valores intermediários. Cerâmicas com predominância de ligações iônicas tem relativo baixo valor de E, ex: NaCl ~44,2 GPa, com predominância de ligações covalentes tem alto valor de E, ex. Diamante ~1035 GPa

NaCl.....	44,2	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> .....	304
SiO <sub>2</sub> fundida.....	69	Vidros em geral.....	69
MgO.....	207	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....	380
ZrO <sub>2</sub> .....	138	SiC.....	414
Mulita.....	145	TiC.....	462
BeO.....	311	Diamante.....	1035
Grafite.....	6,9	Espinélio.....	284



# Propriedades na temperatura ambiente

TABLE 8.2

Material	Symbol	Transverse rupture strength (MPa)	Compressive strength (MPa)	Elastic modulus (GPa)	Hardness (HK)	Poisson's ratio ( $\nu$ )	Density ( $\text{kg/m}^3$ )
Aluminum oxide	$\text{Al}_2\text{O}_3$	140–240	1000–2900	310–410	2000–3000	0.26	4000–4500
Cubic boron nitride	CBN	725	7000	850	4000–5000	—	3480
Diamond	—	1400	7000	830–1000	7000–8000	—	3500
Silica, fused	$\text{SiO}_2$	—	1300	70	550	0.25	—
Silicon carbide	$\text{SiC}$	100–750	700–3500	240–480	2100–3000	0.14	3100
Silicon nitride	$\text{Si}_3\text{N}_4$	480–600	—	300–310	2000–2500	0.24	3300
Titanium carbide	TiC	1400–1900	3100–3850	310–410	1800–3200	—	5500–5800
Tungsten carbide	WC	1030–2600	4100–5900	520–700	1800–2400	—	10,000–15,000
Partially stabilized zirconia	PSZ	620	—	200	1100	0.30	5800

*Note:* These properties vary widely depending on the condition of the material.



# Cerâmica - tensão de ruptura

Comparações das tensões máximas teóricas e reais

Material	E GPa	Tensão máx. teórica GPa	Medida da tensão máx. de fibras GPa	Medida da tensão máx. de amostras policristalinas GPa
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	380	38	16	0,4
SiC	440	44	21	0,7

A resistência ao carregamento de tração pode chegar a ser 15x menor que o de compressão.

Richerson, p170.



# Resistência teórica

$$\sigma_{th} = \left[ \frac{E \cdot \gamma}{a_0} \right]^{1/2}$$

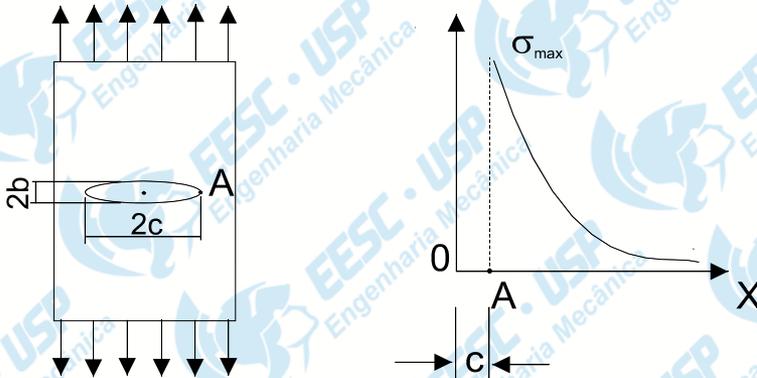
energia de fratura superficial

espaçamento atômico

Tipicamente a tensão a teórica para materiais cerâmicos ocupam 1/10 a 1/15 do módulo elástico.

# Teorias de Inglis, Griffith e Irwin

Para explicar a enorme discrepância entre a resistência teórica e a resistência real, sugeriu-se que as falhas internas ou superficiais atuam como amplificadores de tensão e que a separação das superfícies ocorre seqüencialmente ao invés de simultaneamente.



$$\sigma_{max} = \sigma \left[ 1 + 2 \left( \frac{c}{\rho} \right)^{1/2} \right] = \sigma \left( 1 + 2 \frac{c}{b} \right)$$

$$\rho = \frac{b^2}{c} \quad \text{Raio de curvatura na extremidade A.}$$

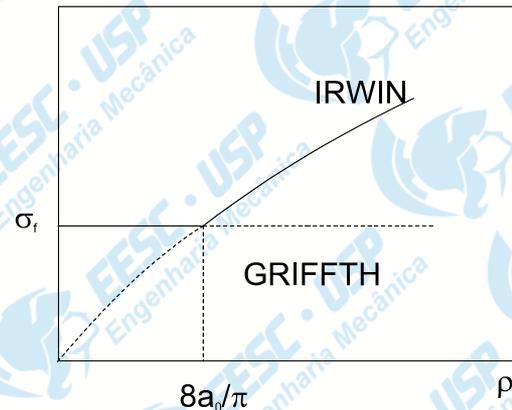
Quando a elipse é muito estreita, pode ser considerado uma boa aproximação de uma trinca e, nesse caso, se

$$\rho \ll c. \quad \sigma_{max} \approx 2\sigma \left( \frac{c}{\rho} \right)^{1/2}$$



GRIFFITH postulou que, quando o decréscimo da energia elástica excede o aumento da energia superficial associada à formação de duas novas superfícies

IRWIN estabeleceu que a ruptura ocorre quando o tensão aplicada se iguala a tensão teórica



O critério de GRIFFITH só pode ser aplicado à falhas muito estreitas, com curvatura máxima na extremidade da falha igual a 2,6 vezes a distância inter-atômica  $a_0$

para trincas elípticas

$$\frac{d}{dc} \left( \frac{\pi c^2 \sigma^2}{E} \right) = \frac{d}{dc} (4\gamma c)$$

ou

$$\sigma_f = \left( \frac{2E\gamma}{\pi c} \right)^{1/2} \approx \left( \frac{E\gamma}{c} \right)^{1/2}$$

$$\sigma_{max} = \sigma_{th}$$

$$\left( \frac{E\gamma}{a_0} \right)^{1/2} = 2\sigma \left( \frac{c}{\rho} \right)^{1/2}$$

$$\sigma_f = \left( \frac{E\gamma\rho}{4a_0c} \right)^{1/2}$$



# Tamanho da amostra

Para uma probabilidade constante de fratura o relação do tamanho da amostra deve ser considerada.

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_2} = \left( \frac{L_1}{L_2} \right)^{1/m}$$

onde L1 e L2 representam comprimentos, área ou volume.



Ex 6-01: Na fabricação de placas de vidro são introduzidas trincas superficiais em escala atômica. (Considere que o raio da ponta das trincas sejam  $\sim \text{O}^{-2}$ ) Dado que a trinca tem  $1\mu\text{m}$  de extensão e a resistência teórica do vidro sem defeito é de  $7,0\text{ GPa}$ , calcule a resistência à fratura da chapa (a)

$$\text{Dado: } r_{\text{O}^{-2}} = 0,132\text{nm}$$

Suponha que um acidente cause uma trinca interna (mesmo raio de curvatura da ponta) porém com  $5000\mu\text{m}$  de extensão, calcule a nova resistência do vidro (b); e (c) faça furos nas extremidades da trinca com diâmetro de  $0,5\text{mm}$  e recalcule a resistência do vidro.



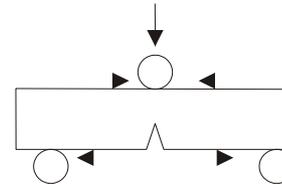
# Tenacidade à fratura - exemplos

	$\sigma_f$ (MPa)	$K_{IC}$ (MPa.m <sup>1/2</sup> )
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	600	5,0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	500	4,0
ZrO <sub>2</sub> -c	180	2,4
Mulita	150	1,8
Cordierita	120	1,4
Aços para reatores		200
PMMA		1,7



# Tenacidade à fratura

$$K_{IC} = \frac{Y}{Z} \sigma_F C^{1/2}$$



$\sigma_F$  = tensão crítica de fratura

$c$  = profundidade da trinca

$Y, Z$  = fatores geométricos

$$\sigma_f = \frac{Z}{Y} \cdot \frac{K_{IC}}{\sqrt{c}}$$

propriedade do material ( $\gamma_e$ )

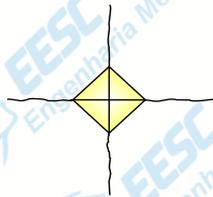
tamanho do defeito crítico



# Tenacidade à fratura

Variação do tradicional método da barra entalhada. Nela, o entalhe inicial é obtido através de uma impressão Vickers frágil.

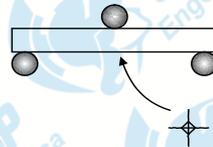
Impressão Vickers de fratura (IF)



Impressão Vickers em uma superfície polida;

Medida dos comprimentos das trincas.

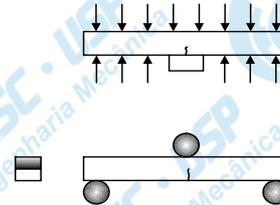
Flexão de barra impressa (IS)



Impressão Vickers de uma amostra;

Fratura da amostra por flexão.

Flexão de barra pré trincada (SEPB)



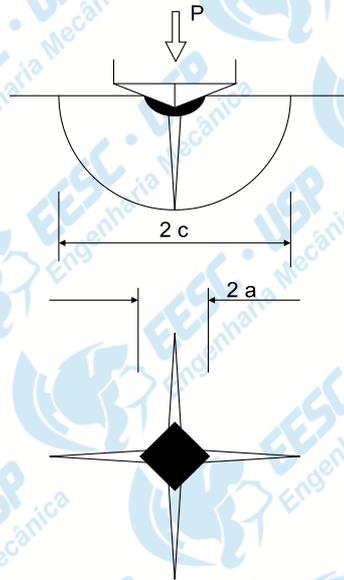
Impressão Vickers ou corte de uma amostra;

Carregamento compressivo sobre cabeçotes guias até observado o ruído sêco do pré-trincamento;

Fratura da amostra por flexão.



# Tenacidade à fratura - indentação



$$H = \frac{2P}{2a^2}$$

$$H_V = \frac{1,854P}{(2a)^2}$$

$$K_{IC} = 0,59(E/H)^{1/8} (\sigma_c P^{1/3})^{3/4}$$

$K_{IC}$  é a tenacidade à fratura;

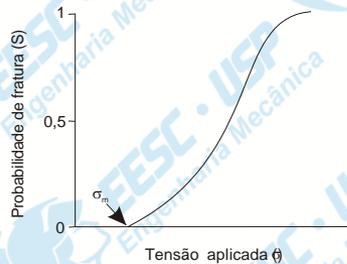
$E$  é o módulo elástico; e

$\sigma_c$  é a tensão de fratura à flexão



# Estatística de Weibull

## Resultado da função distribuição

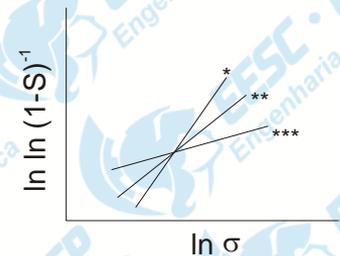
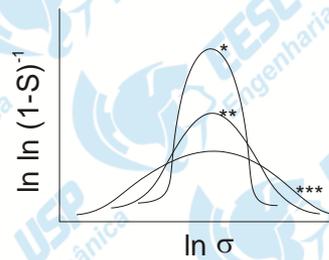
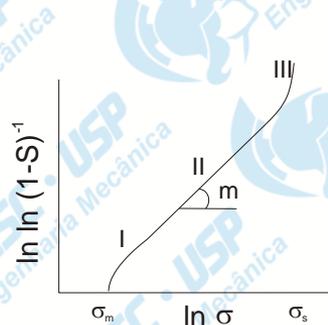
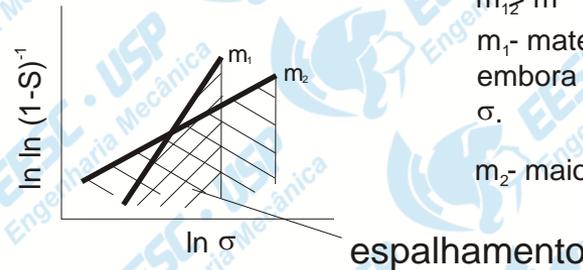


## Interpretação dos valores de m

$$m_1 > m_2$$

$m_1$  - material de maior confiabilidade embora possa apresentar o mesmo  $\sigma$ .

$m_2$  - maior espalhamento de valores

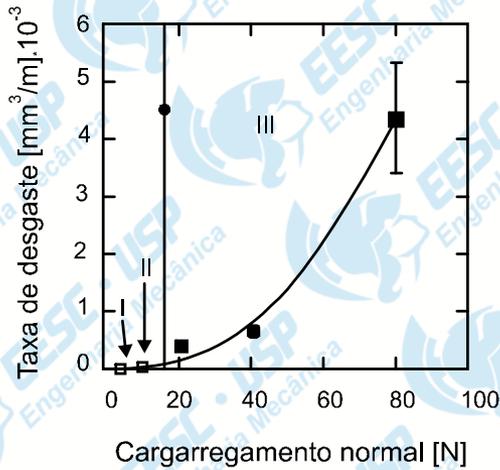


## Valores de m

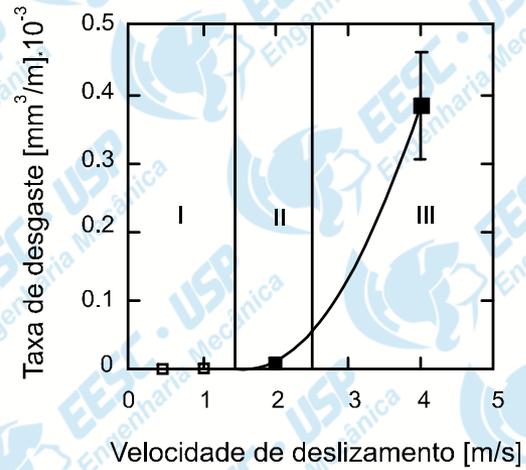
Tipicamente materiais cerâmicos policristalinos ocupam valores na faixa de  $3 < m < 5$ , valores surpreendentemente altos são relatados em literatura ocupando a faixa de  $26 < m < 34$



# Desgaste



a)



b)



# Modelagem

$$V = \alpha \frac{W^{9/8}}{K_c^{1/2} H^{5/8}} \left(\frac{E}{H}\right)^{4/5} l$$

KATO (2003)

$$V = \alpha \frac{1}{k_{IC}^{3/4} H^{1/2}}$$

Wayne et. al (1994)

$V$ , volume desgastado;

$W$  carga normal;

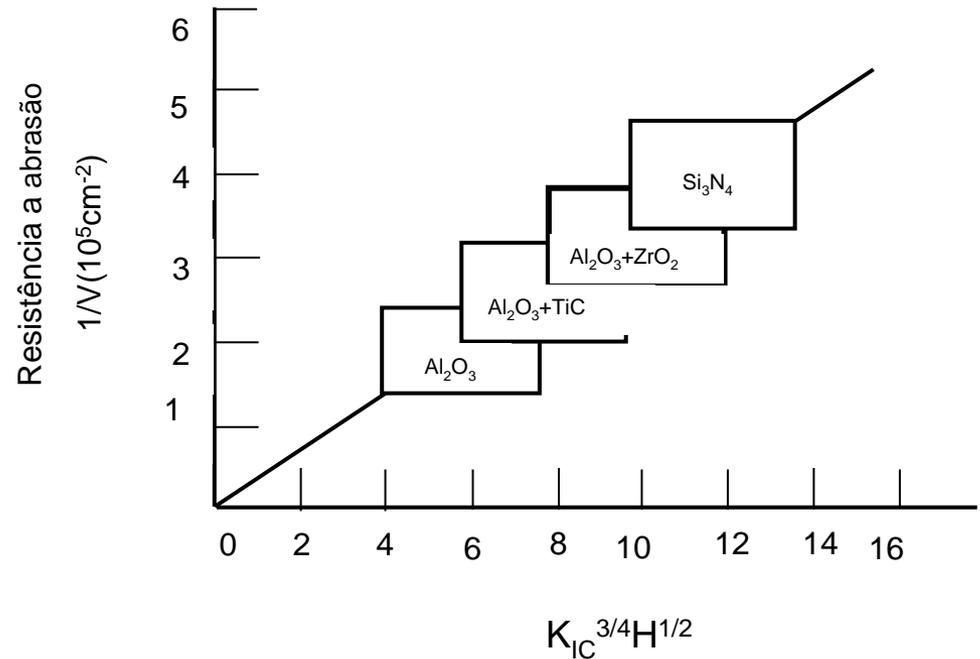
$H$  é a dureza;

$K_c$  tenacidade;

$E$  módulo elástico;

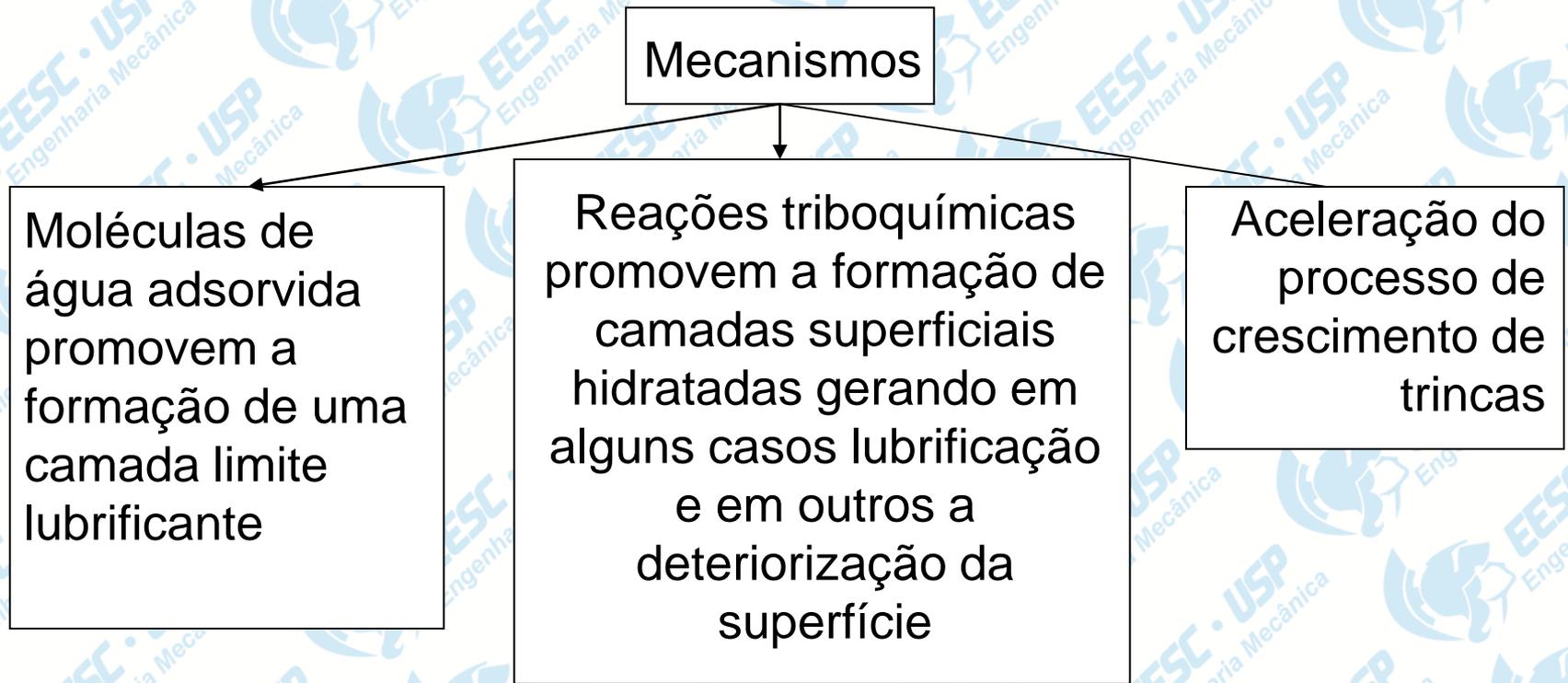
$l$  distância percorrida; e

$\alpha$  constante independente do material



# Desgaste – influência da umidade atmosférica

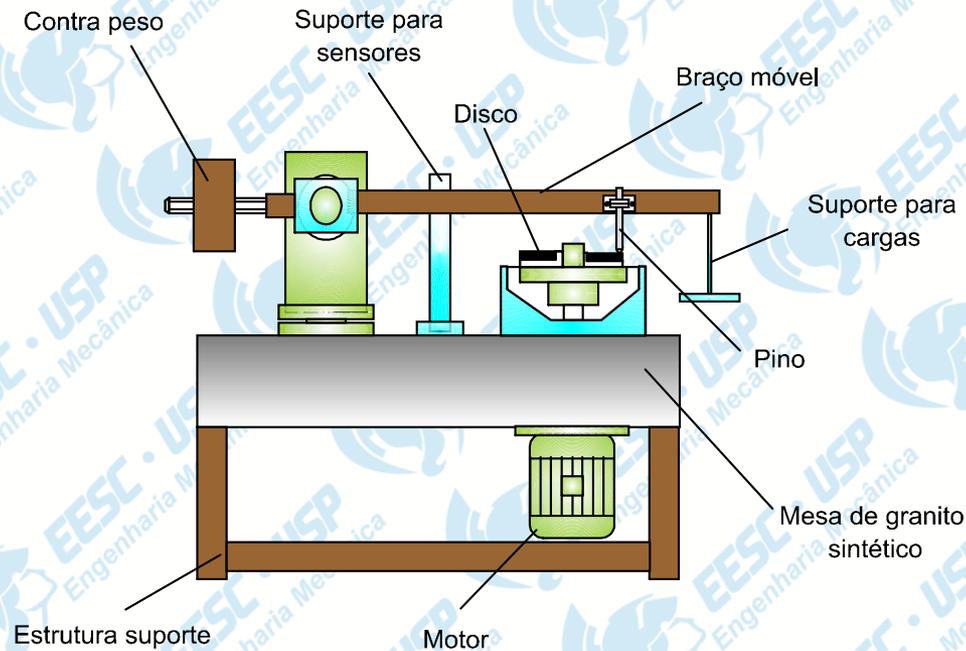
Em algumas ocasiões a umidade relativa aumenta o coeficiente de atrito e o coeficiente de desgaste, já em outras pode ocorrer o contrário



Estes mecanismos podem ocorrer simultaneamente em diversas combinações, depende sobretudo, da cerâmica envolvida



# Ensaio de desgaste – “pin-on-disc”



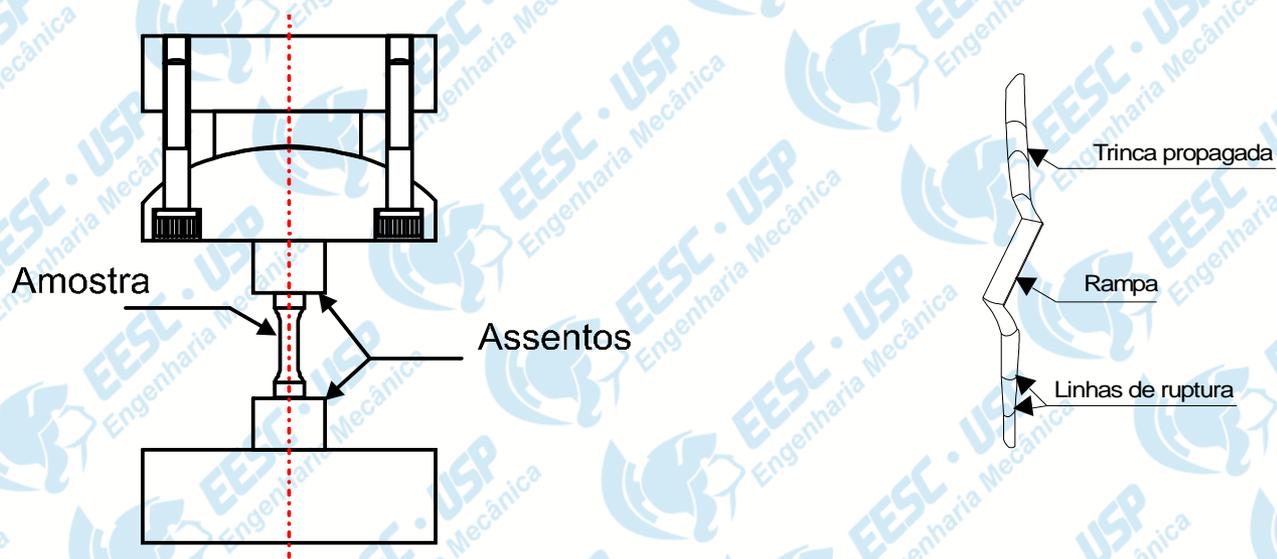
# Coeficientes de atrito

## MATERIAIS

	$\mu$
PTFE - PTFE	0,04
PTFE - AÇO	0,04
GRAFITE - GRAFITE	0,1
GRAFITE - AÇO	0,1
POLIETILENO-POLIETILENO	0,2
NYLON - NYLON	0,2
POLIETILENO - AÇO	0,2
CROMO - CROMO	0,4
AÇO - AÇO	0,8
VIDRO - AÇO	0,6
VIDRO - VIDRO	0,6
ALUMINA - ALUMINA *	0,5 - 0,7

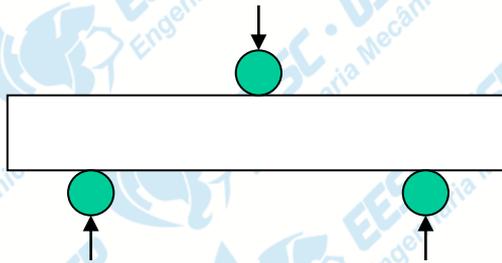


# Ensaio de compressão

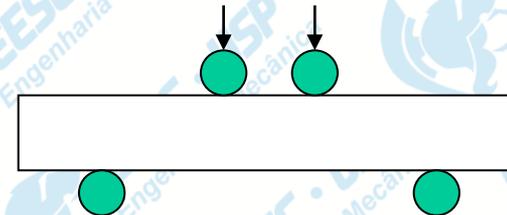


# Resistência à Flexão

Tensão máxima desenvolvida na superfície de uma barra quando sujeita à curvatura ou dobramento. Aplica-se a materiais rígidos, isto é, aqueles que não vergam excessivamente sob a ação da carga.



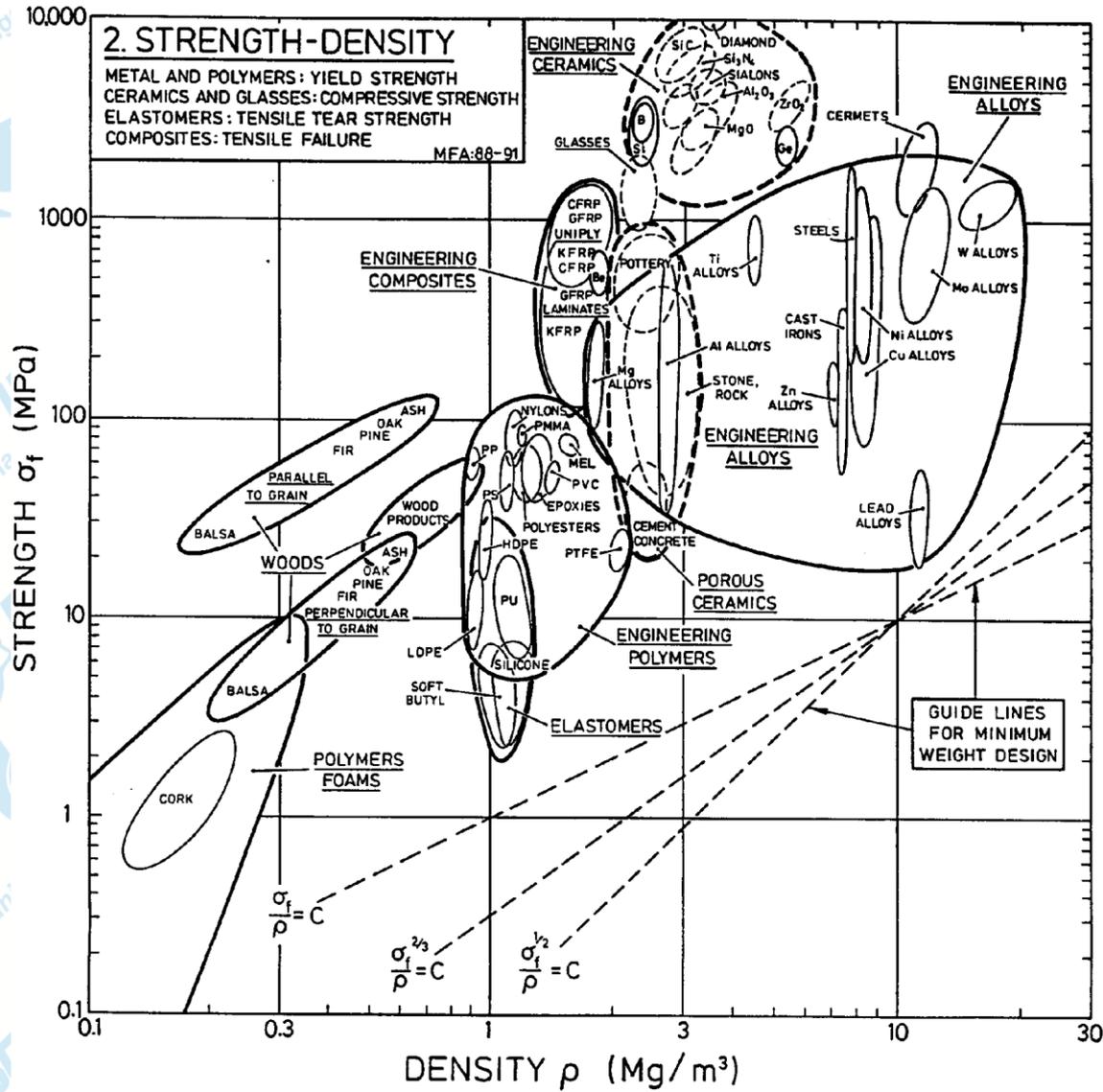
Flexão 3 pontos

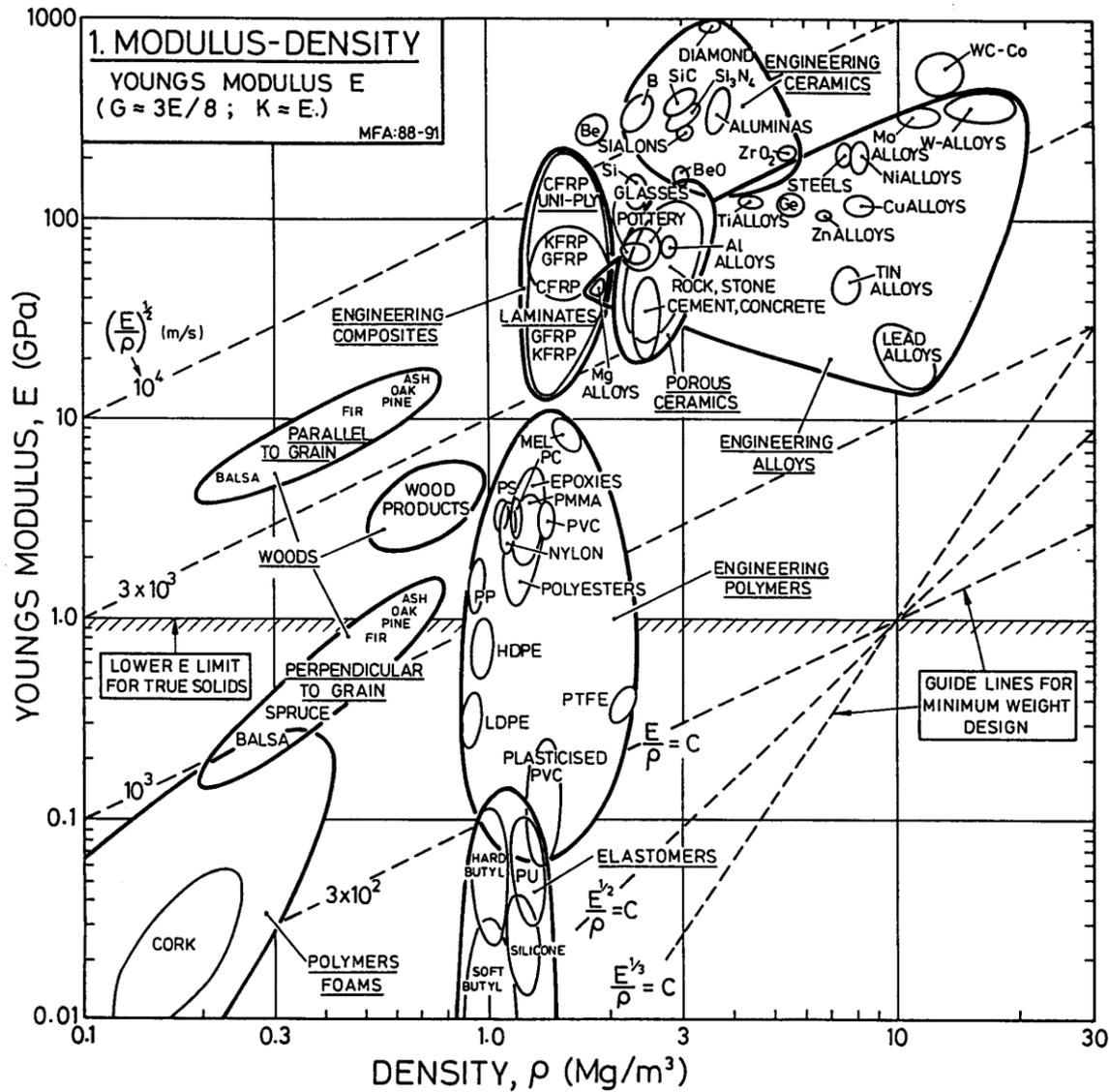


Flexão 4 pontos

ASTM C 1161-02c – Flexural Strength of advanced ceramics at ambient temperature







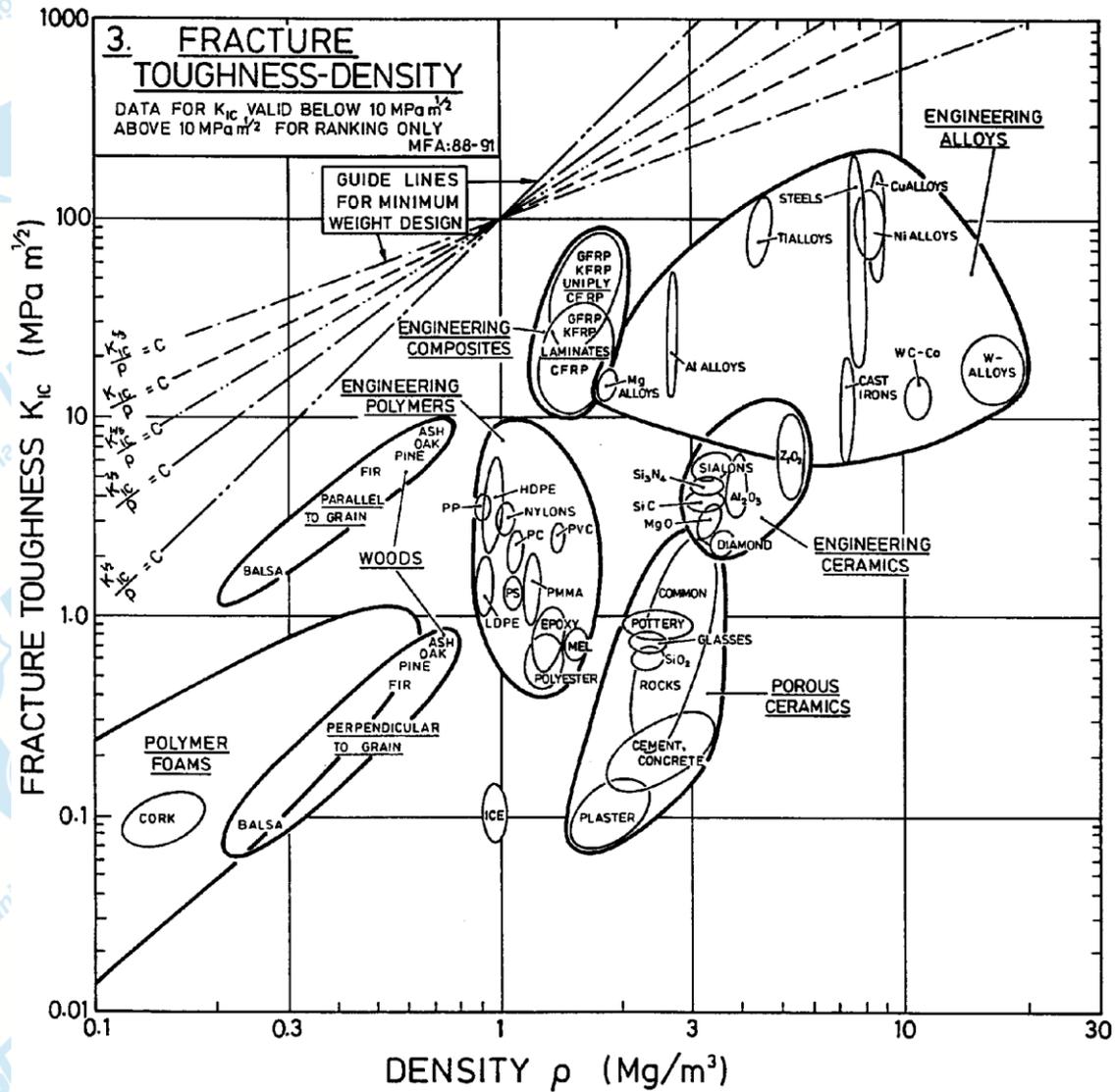
# Coeficiente de Poisson

Para cerâmicas monocristalinas e policristalinas

$$E = 2G (1 + \nu)$$

Material	Coeficiente de Poisson aproximado
SiC	0,14
MoSi <sub>2</sub>	0,17
Concreto	0,20
Si <sub>3</sub> Ni <sub>4</sub>	0,24
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,26
Aços	0,25 - 0,30
Metais em geral	0,33





# Dureza

Materiais

Dureza Vickers

kgf/mm<sup>2</sup>

Alumina

2370

BeO

1140

NaCl

21

Diamante

9000

Sílica fundida

540



# Densidade

As cerâmicas ocupam valores intermediários entre os metais e polímeros.

ASTM C373-88 (reapproved 1999) –Water absorption, bulk density, apparent porosity, and apparent specific gravity of fired whiteware products



# Propriedades Elétricas

## Rigidez Dielétrica

Indica em que grau um material é isolante.

Cerâmicas e polímeros - 10-40 V/mm.

Metais - não se aplica por serem condutores.

## Resistividade Volumétrica

É a resistência dos materiais isolantes à passagem de corrente elétrica entre as faces de uma unidade cúbica. Polímeros/cerâmica – 10 cm Metais -- 10 cm (condutividade)'

## Constante dielétrica

Esta relacionada com o armazenamento de energia eletrostática em material dielétrico. (Capacitor)



# Propriedades químicas

## Resistência à Oxidação

Polímeros > macromoléculas saturadas < macromoléculas insaturadas

Cerâmicas são bastante resistentes

Metais tem tendência a se oxidarem superficialmente

## Resistência da Degradação Térmica

De interesse aos polímeros, são responsáveis pela sua degradação quando expostos ao ar e calor.

## Res. à Radiações de Ultravioleta

Também de interesse aos polímeros, quando exposto a luz solar. (fissuras ou rachaduras)

## Resistência à Água

Polímeros - absorção de umidade

Cerâmicas - propagação de microtrincas



# Propriedades Térmicas

## Calor Específico

Energia térmica para elevar em 1° a unidade de massa do material.  
Polímeros ~ 0,2 - 0,5 cal/g°C Metais ~ 0,1 cal/g°C.

## Expansão Térmica

Volume adicional necessário para acomodar os átomos e moléculas por estarem vibrando mais rápido e com maior amplitude, em geral:

## Condutividade Térmica

Mede a quantidade de calor, na unidade de tempo, por unidade de área, através de uma espessura unitária, sendo 1° a diferença de temperatura entre as faces. Polímeros são maus condutores Metais são bons condutores



**Expansão térmica**, variações na temperatura provocam deformações dos materiais, volume adicional necessário para acomodar os átomos e moléculas por estarem vibrando mais rápido e com maior amplitude. Em materiais isotrópicos homogêneos uma variação de  $\Delta T$  K ( $^{\circ}$  C) causa a deformação expressa por:

$$\varepsilon_x = \varepsilon_y = \varepsilon_z = \alpha \cdot \Delta T$$

$\alpha$  = coeficiente de expansão térmica

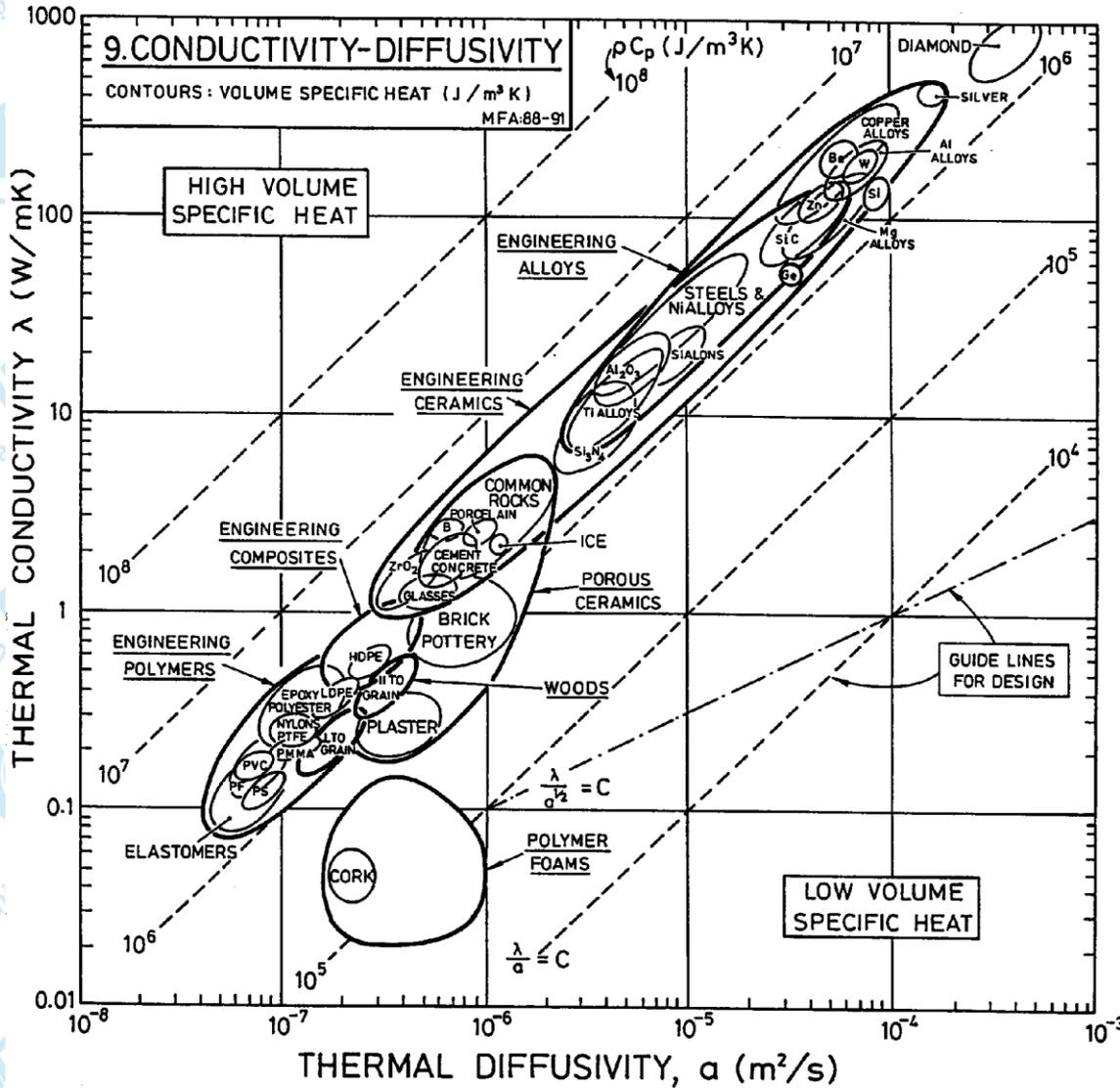
Para materiais isotrópicos a variação da temperatura não causa deformações angulares.

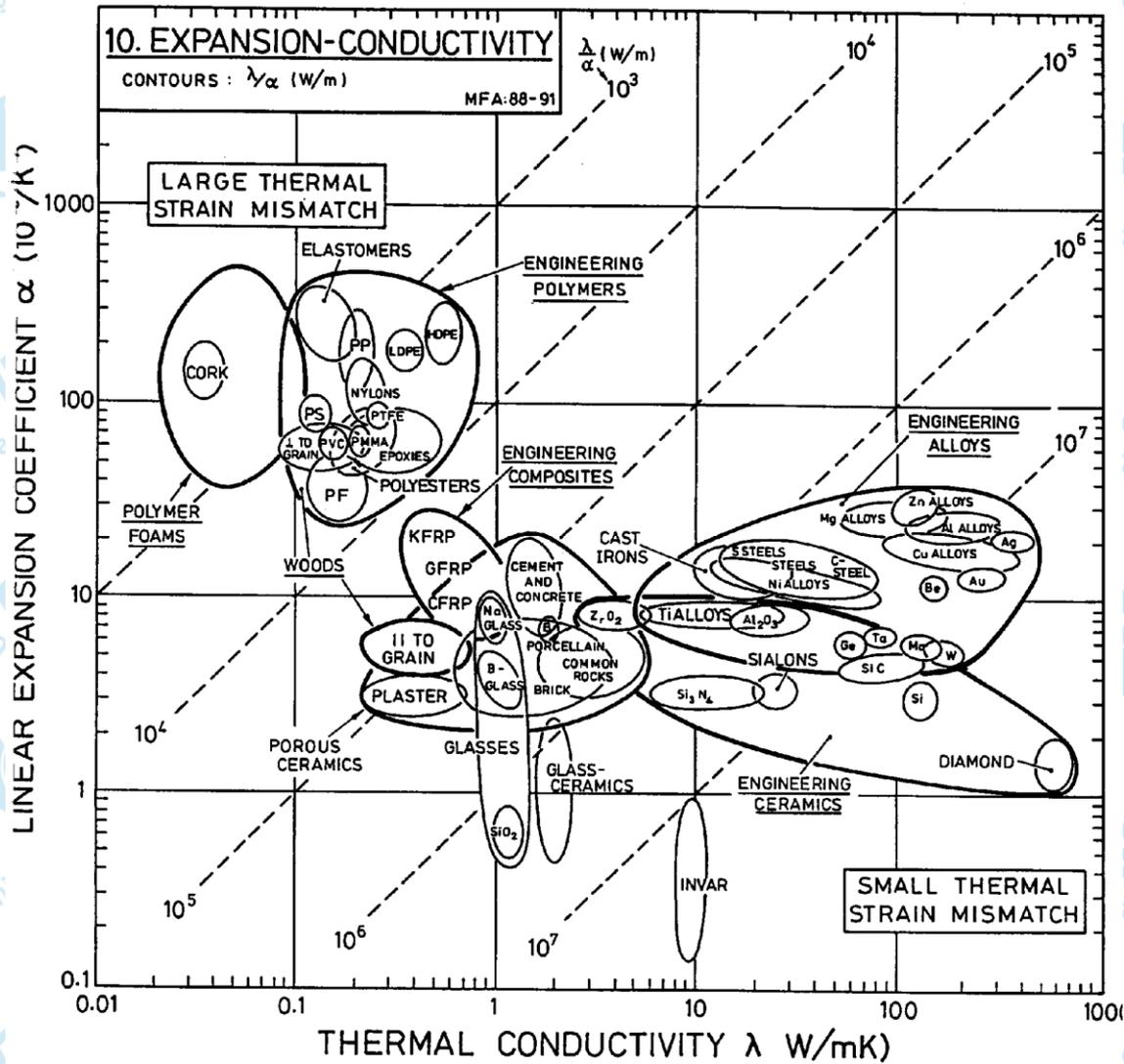
Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 99,9%

20-400 $^{\circ}$ C

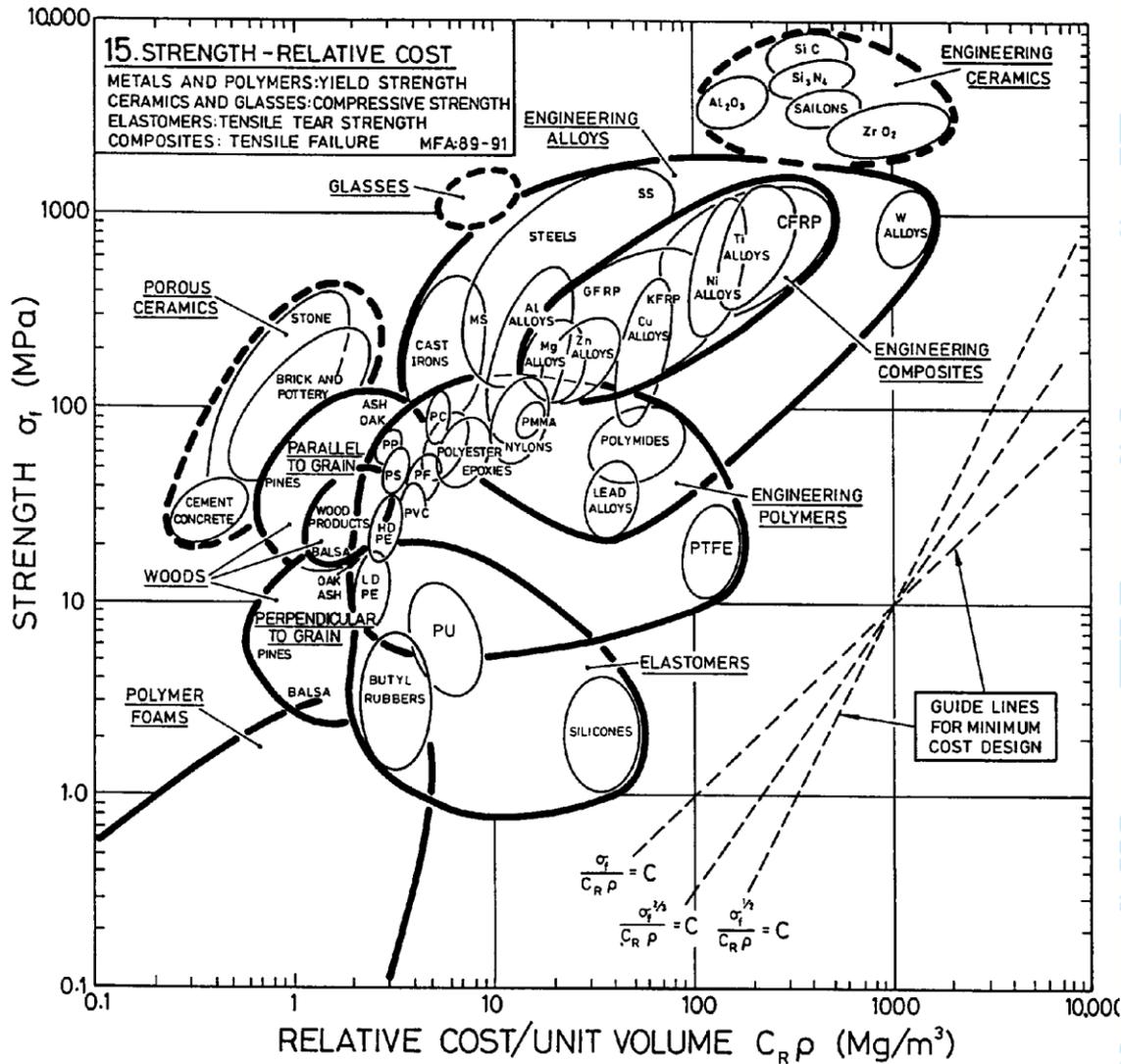
7,4x10<sup>-6</sup> m/m. $^{\circ}$ C







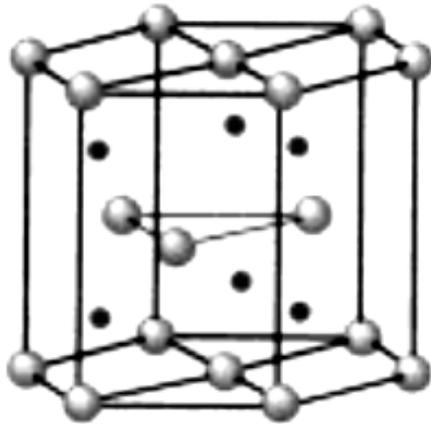




# *ALGUMAS CERÂMICAS*

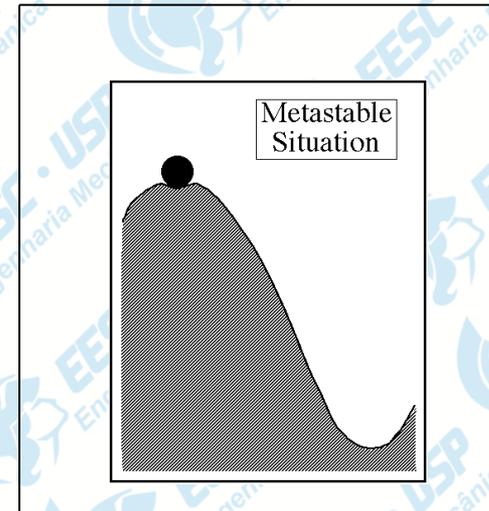
# Alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )

- ✓ Trata-se de uma cerâmica considerada UNIVERSAL
- ✓ Tem várias fases cristalográficas, mas exceto a  $\alpha$ , todas são fases metaestáveis



- $\text{O}^{2-}$  atoms
- Octahedral sites
- $\frac{2}{3}$  occupied by  $\text{Al}^{3+}$

$\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\alpha$  Célula unitária: hexagonal compacta



O óxido de alumínio, alumina -  $\alpha$  ou alumina, cristaliza na estrutura coríndon para formar monocristais de safira. A safira pura é branca, quando acrescida de  $Ti^{+4}$  torna-se azul e quando com  $Cr^{+3}$  torna-se vermelha (Rubi)



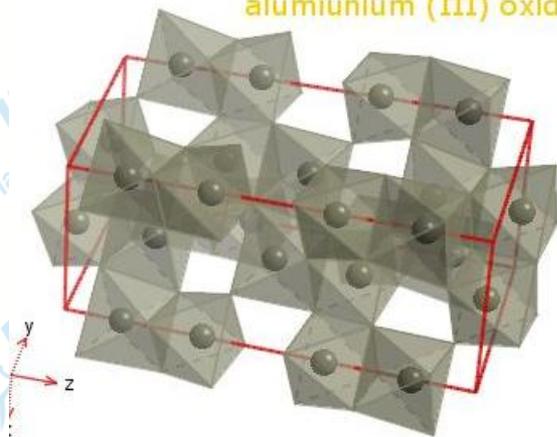
<http://neomagnet.en.made-in-china.com/offer/rMbuqTQdbiWS/Sell-Sapphire-Ruby-Jewel-Bearing.html>

A variedade alfa ( $Al_2O_3-\alpha$ ), é a variedade estável, mas a preparação da alumina pode envolver diversas variedades metaestáveis: aluminas hidratadas e aluminas de transição.

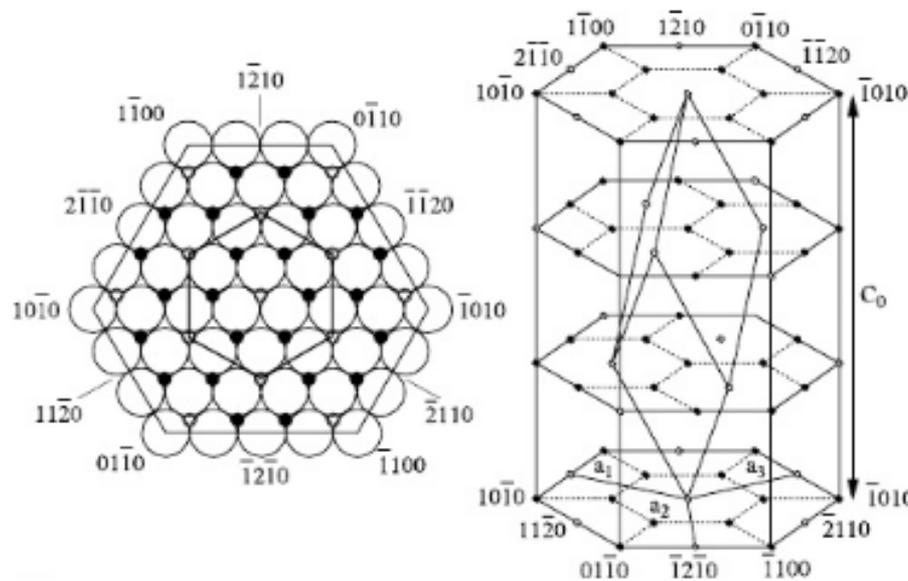


# Alumina- $\alpha$

aluminium (III) oxide



Octaedro  
NC=6

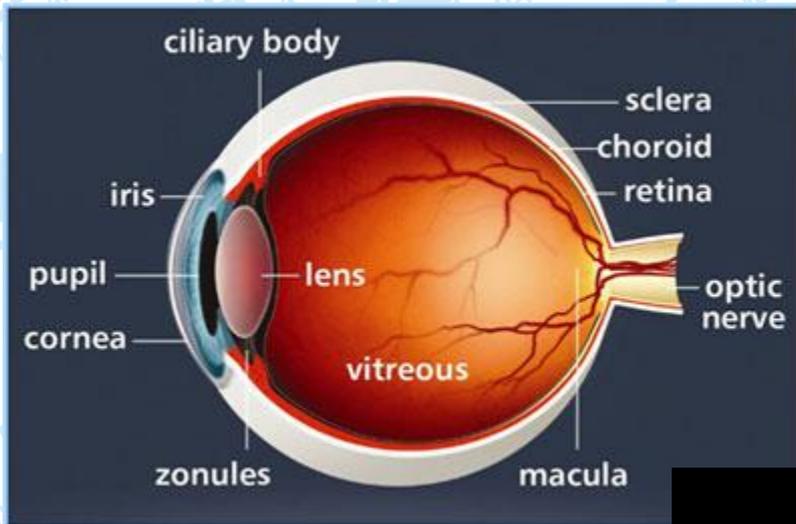


**Figure 6.1.** Structure of  $\alpha$  alumina. On the left, seen in the base plan: the large circles represent the anions, the small full circles the cations, the small empty circles the vacant octahedral interstices. On the right, the view of the cation sublattice: the full circles represent the full cations and the circles the vacant sites [KRO 57]

Boch, et al. 2007, pp201



# Safira – monocristais de $\alpha$ -alumina



<http://www.sapphire-eyecare.co.uk/cataract/understanding.htm>



<http://www.guildoptics.com/optical-lenses/sapphire-lens/>



# Alumina

- ✓ Produção: Prensagem de pós e sinterização a  $\sim 1600^{\circ}\text{C}$ ;
- ✓ Pureza e tamanho de grão são importantes – afetam a resistência mecânica, resistência a fadiga, resistência a fratura e tenacidade de fratura;
- ✓  $< 0.5\%$  MgO é adicionado como aditivo para limitar o crescimento do grão durante a sinterização;
- ✓  $< 0.1\%$   $\text{SiO}_2$  + oxides alcalinos: Eles promovem o crescimento de grão;
- ✓ Resistência Mecânica, resistência a fadiga, resistência a fratura e tenacidade de fratura =  $f(\text{pureza, tamanho de grão, densidade})$

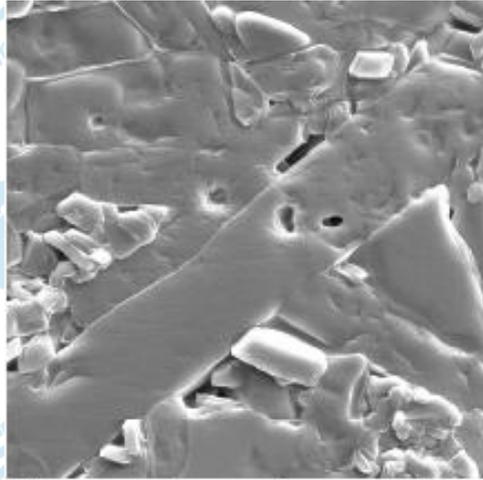


# Tribologia (Atrito e desgaste)

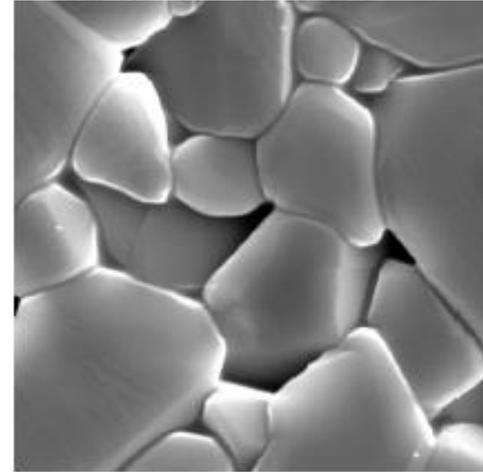
- ✓ Excelentes propriedades tribológicas;
- ✓ Requer pequeno tamanho de grão ( $<4 \mu\text{m}$  com estreita distribuição);
- ✓ Baixa rugosidade superficial ( $R_a \leq 0.02 \mu\text{m}$ );



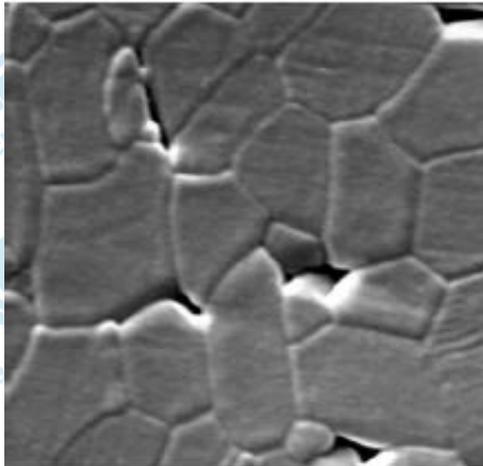
# Microestrutura



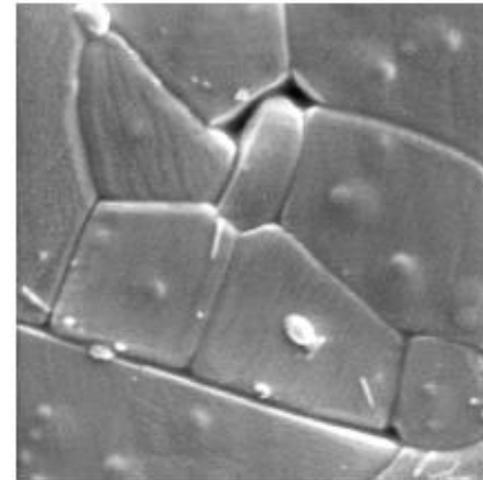
Alumina 96% - Alumina Técnica Comercial



Alumina 99 - Obtida por Injeção

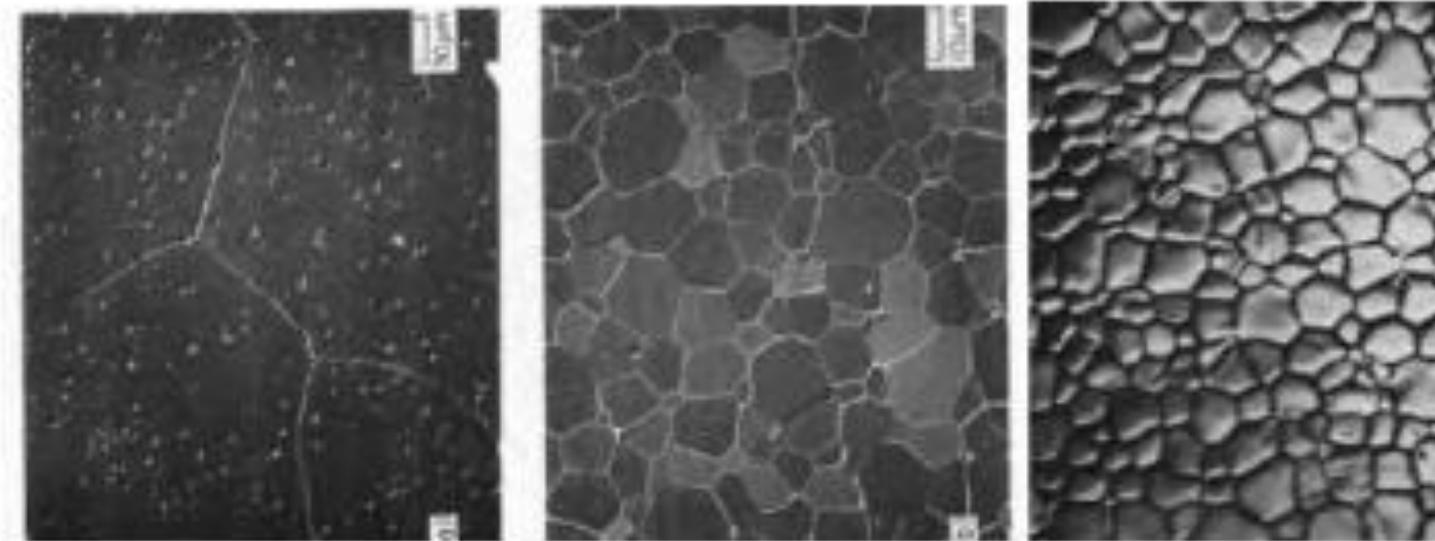


Alumina 99,9 - Dureza, Inércia Química



Alumina 99 - Obtida por Prensagem Isostática





**Figure 6.3.** Microstructures of sintered aluminas: on the left "pure"  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ; in the middle and right,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  doped with  $\approx 500$  ppm  $\text{MgO}$  [RHO 91]

Boch, et all 2007, pp. 212



# Zircônia $ZrO_2$

Material polimórfico e pode ter uma de três estruturas cristalográficas:

- na  $T_{amb}$  é monoclinica ( $m$ ),
- $T_{1170^{\circ}C} \rightarrow$  tetragonal ( $t$ )
- $T_{2370^{\circ}C} \rightarrow$  cúbica ( $c$ ) nas temperaturas de e, respectiva
- No resfriamento a sequência de transformação é inversa.

A transformação de fase  $t \rightarrow m$  é de natureza martensítica e vem acompanhada de uma forte e anisotrópica expansão térmica sendo linear em 4% e desvios de distensão de cisalhamento de 16%. Esta característica, impede a fabricação de produtos cerâmicos obtidos à partir de  $ZrO_2$  puro, pois, a este nível de variação dimensional o produto sinterizado fragmenta-se no seu resfriamento pós sinterização. A solução para este problema consiste na estabilização parcial ou integral de uma das fases da zircônia, isto é possível com a substituição sólida na estrutura de  $ZrO_2$ , o que, geralmente é obtida com  $CaO$ ,  $MgO$  e  $Y_2O_3$

[KARIHALOO et al. (1996); MACDONALD (1987), SUBBARAO (1981)].



O controle da transformação  $t \rightarrow m$  propicia a obtenção do grupo cerâmico denominado ZTC (zirconia-toughened ceramics), este grupo subdivide-se em outros três subgrupos: o PSZ (partially stabilized zirconia), o TZP (tetragonal zirconia polycrystals) e o DZC (dispersed zirconia ceramics)

KARIHALOO et al. (1996)].



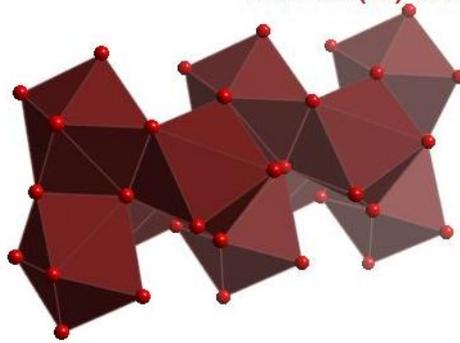
## Zircônia

- ✓ Inércia devido a estabilidade termodinâmica;
  - ✓ Prensada em sinterizada  $\sim 1400^{\circ}\text{C}$ ;
  - ✓ Menor módulo elástico comparada com Alumina
- 
- ✓ Bola de articulação em prótese total de quadril



# Zircônia

zirconium(IV) oxide



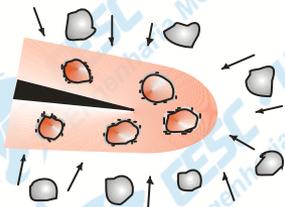
## MECANISMOS DE REFORÇO

- Intrínseco
- Extrínseco

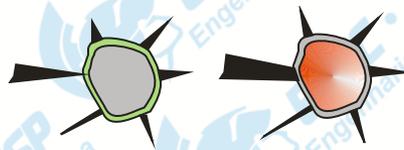
$$K_{1c} = K_m + \Delta K_i$$

$$\Delta K_i = \Delta K_T + \Delta K_{mc} + \Delta K_{cb} + \Delta K_s + \Delta K_{cb}$$

Reforço por transformação



Reforço por microtrincamento



Crack bridging

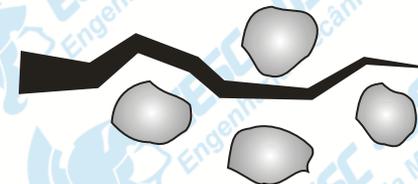
Reforço ponte

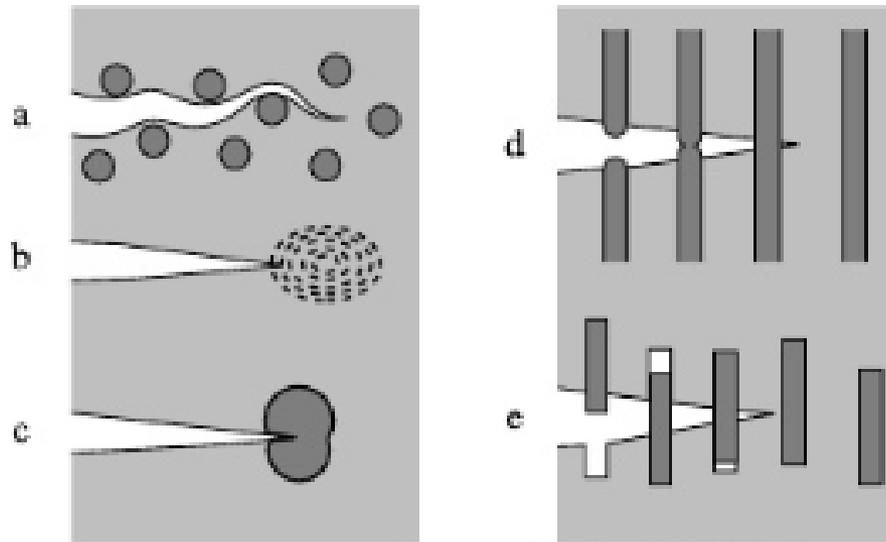


Atrito de deslocamento



Deflexão e ziz-zag do trincamento



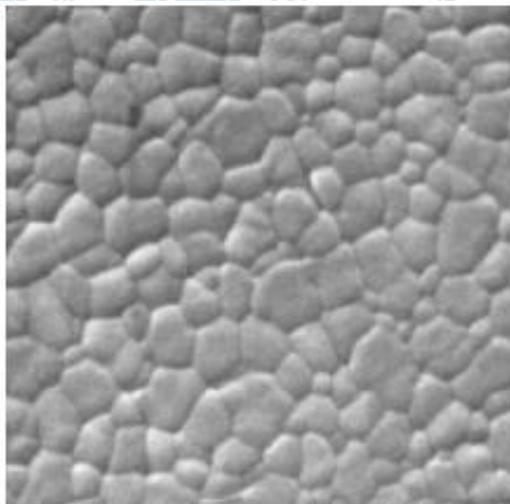


**Figure 8.7.** Types of microstructures producing R-curve effect: a) dispersion of hard particles; b) microstructure causing multicracking; c) phase transformation inducing compressive stresses at crack tip (case of partially stabilized zirconia); d) reinforcement of the matrix by ductile fibers and e) reinforcement of the matrix by high resistance fibers [MEN 92]

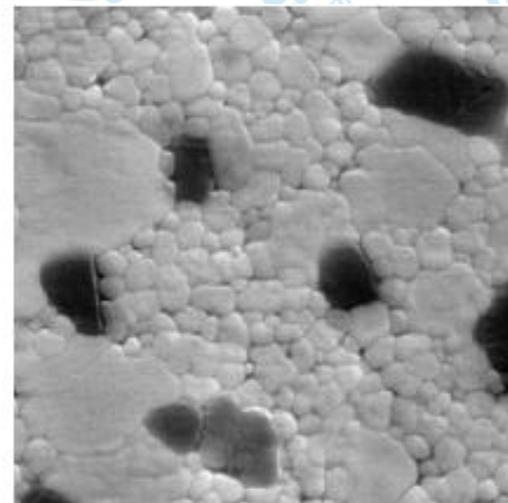
Boch, et all 2007, pp274



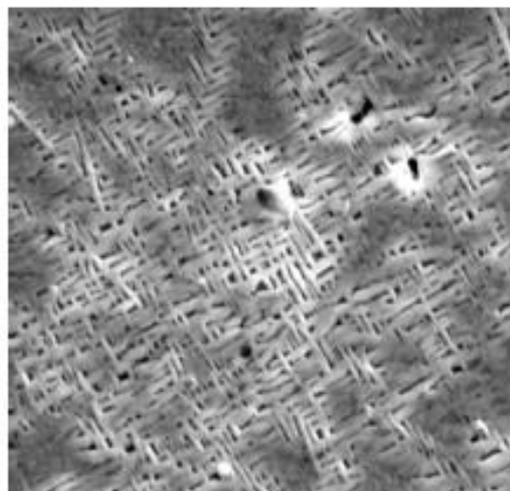
# Zircônia



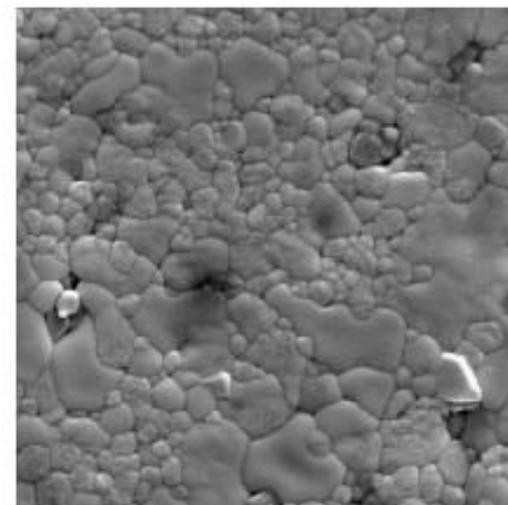
Zircônia 3Y ~ 100% tetragonal - Tenacidade



Zircônia 8Y - para sensor Lâmbda - Choque Térmico



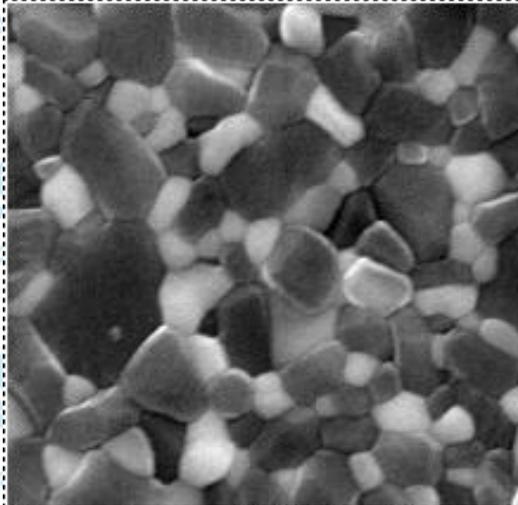
Zircônia - sensor de oxigênio - Siderurgia  
Choque Térmico



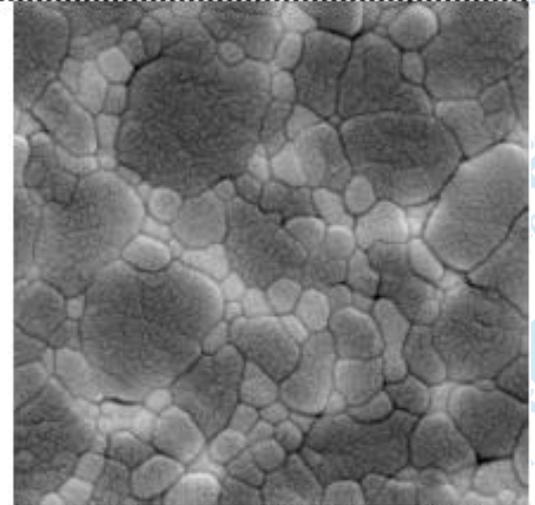
Zircônia 8Y - Sensor de Oxigênio - Sonda Lambda



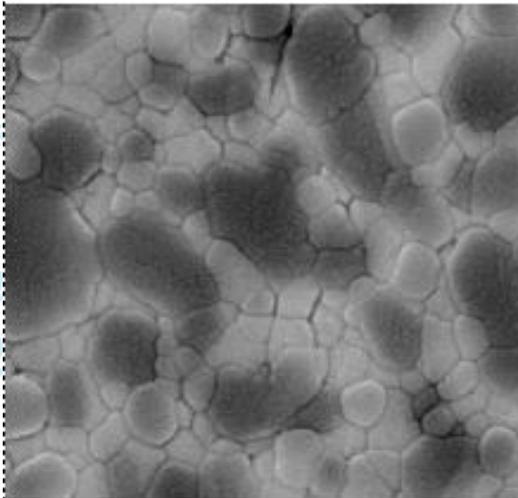
# ATZ



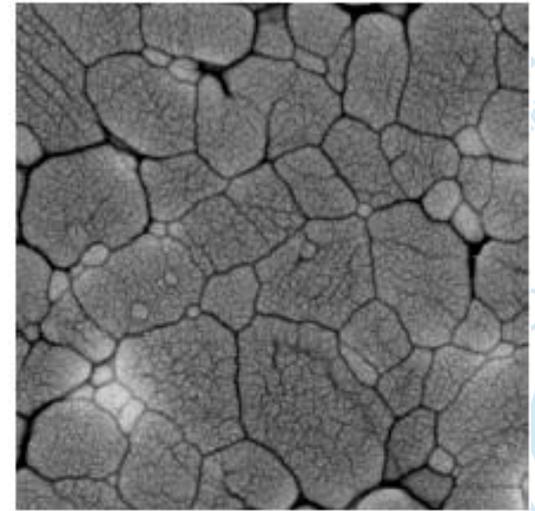
Alumina Reforçada com Zircônia Monoclínica - Tenacidade



Alumina Reforçada com Zircônia Tetragonal (3Y)

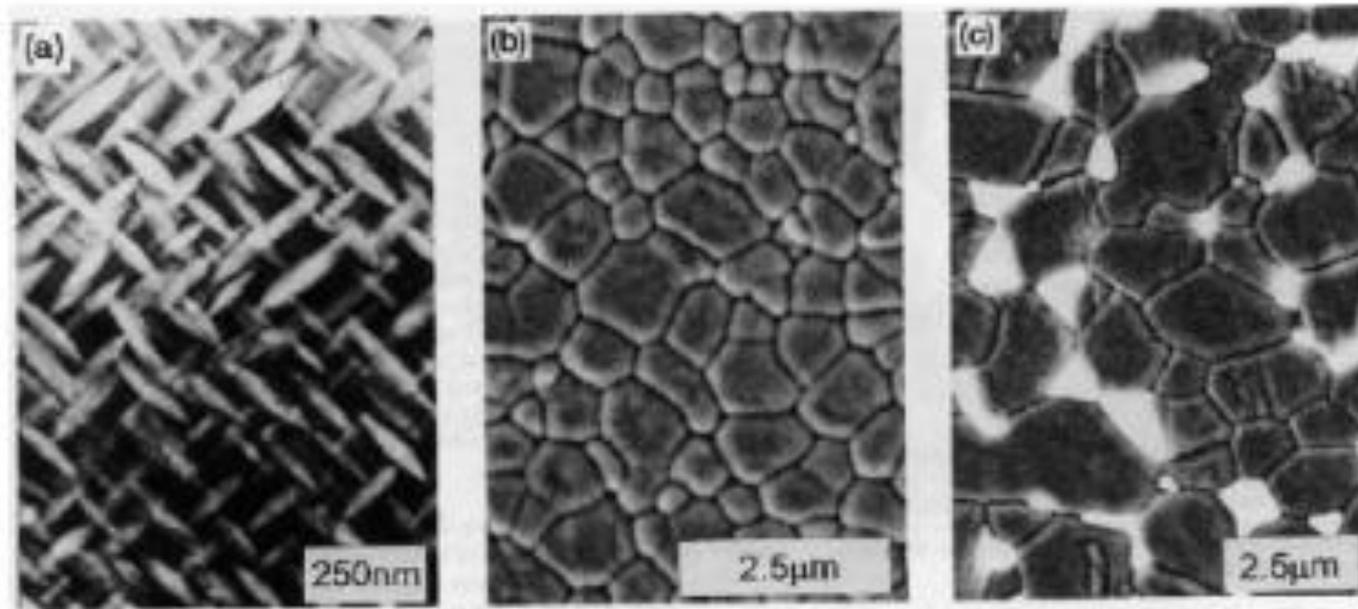


Alumina/Zircônia (ZrO<sub>2</sub> (3Y)) 50%x50%



Alumina Reforçada com t-ZrO<sub>2</sub> (3Y)

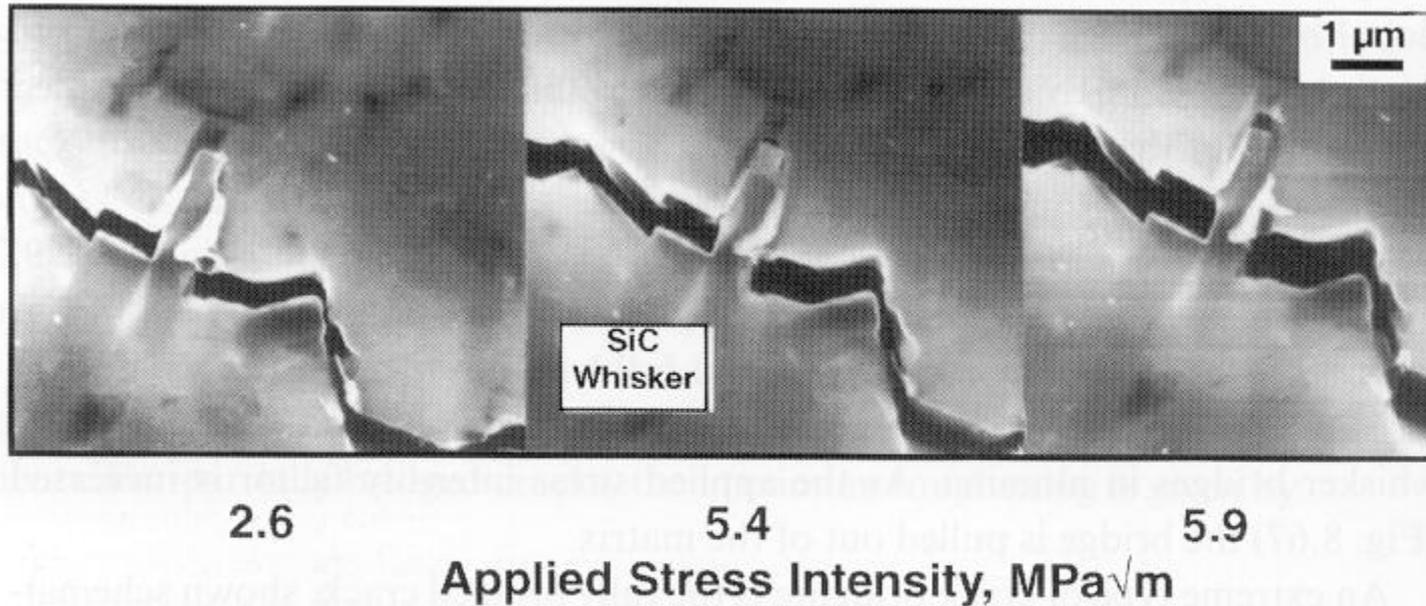




**Figure 6.8.** Typical microstructures of three materials toughened by zirconia: (a) Mg-PSZ, (b) Y-TZP, (c) ZTA. The transformable precipitates in Mg-PSZ are lenticular in form; TZP is monophased, with very fine grains [HAN 00]

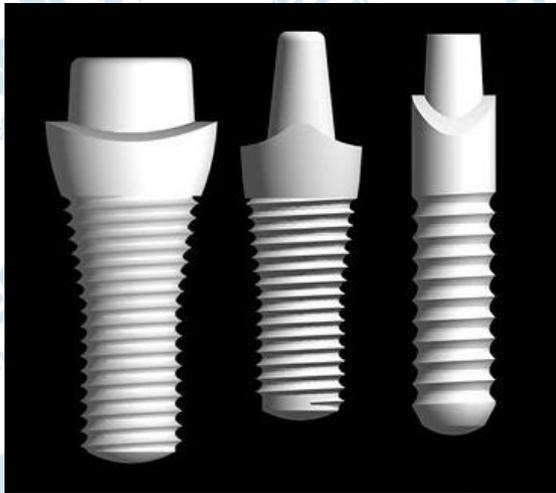
Boch, et all 2007, pp223





**Figure 8.67** Series of scanning electron micrographs showing a silicon carbide whisker bridge being pulled out of an alumina matrix as the applied stress intensity factor is increased. (From P. Becher *et al.*, 1996, reproduced courtesy of The American Ceramic Society, Westerville, OH.)





<http://www.ceraroot.com/>



<http://www.torth.com/uslesion06.htm>

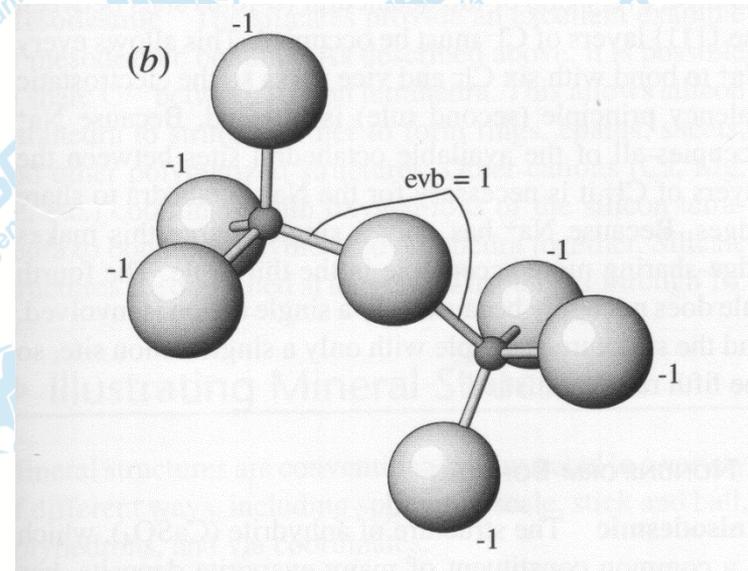
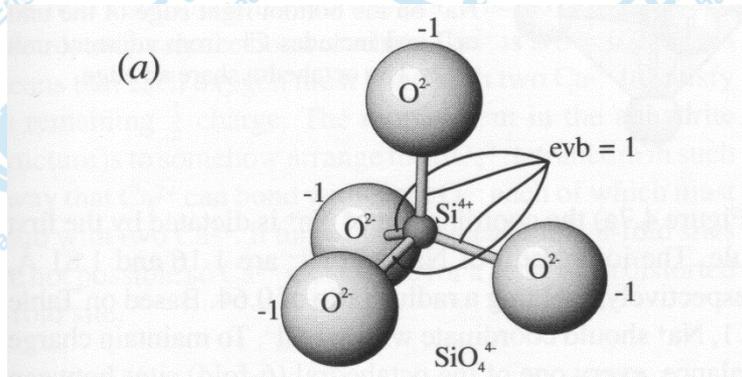


<http://www.z-systems.biz/index.php?id=119>  
02/10/2008



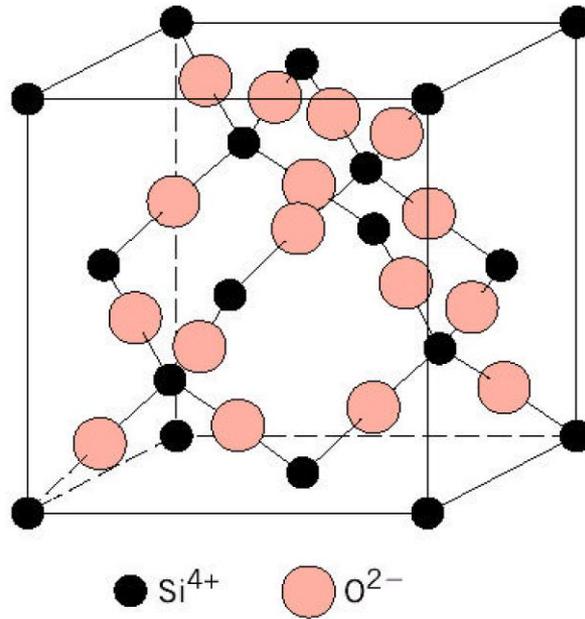
# Sílica - $\text{SiO}_2$

- ✓ cada átomo de oxigênio é compartilhado com um tetraedro adjacente;
- ✓ a sílica pode ser cristalina (ex., quartzo) ou amorfa, (fundida ou sílica vítrea);



**Polimorfismo do  $\text{SiO}_2$**  -  $\alpha$  quartzo,  $\beta$  quartzo,  $\alpha$  e  $\beta$  tridimita, cristobalita, coesita, e stishovita



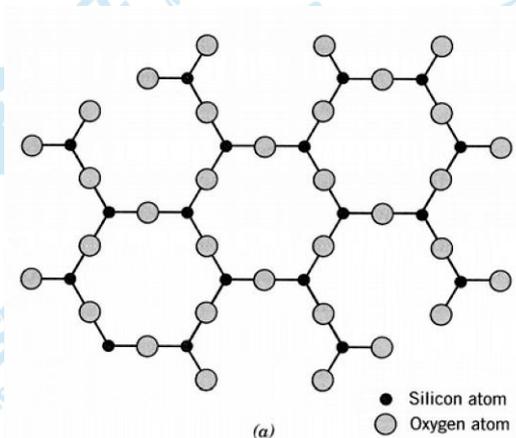


Rede 3D da SiO<sub>4</sub> tetraédrica da cristobalita, elevada temperatura de fusão - 1710 °C

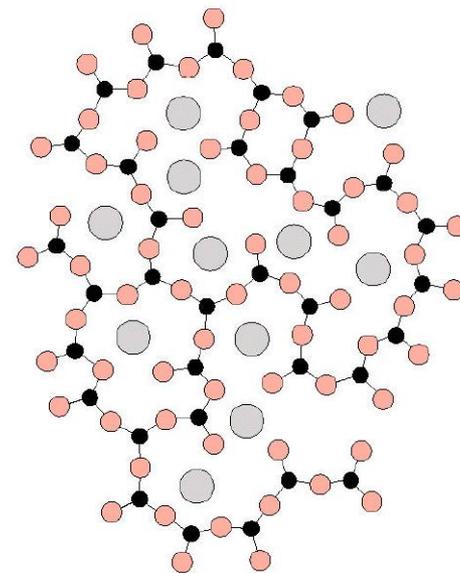


# Vidro de janela

A maioria dos vidros de janela são produzidos pela adição de outros óxidos (ex:  $\text{CaO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ) dos quais seus cátions são incorporados na rede  $\text{SiO}_4$ . Estes cátions quebram a rede tetraédrica e funde o vidro em temperatura menor que a sílica amorfa. Um menor ponto de fusão facilita a fabricação do vidro. Alguns outros óxidos ( $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) substituem o silício e tornam-se parte da rede.



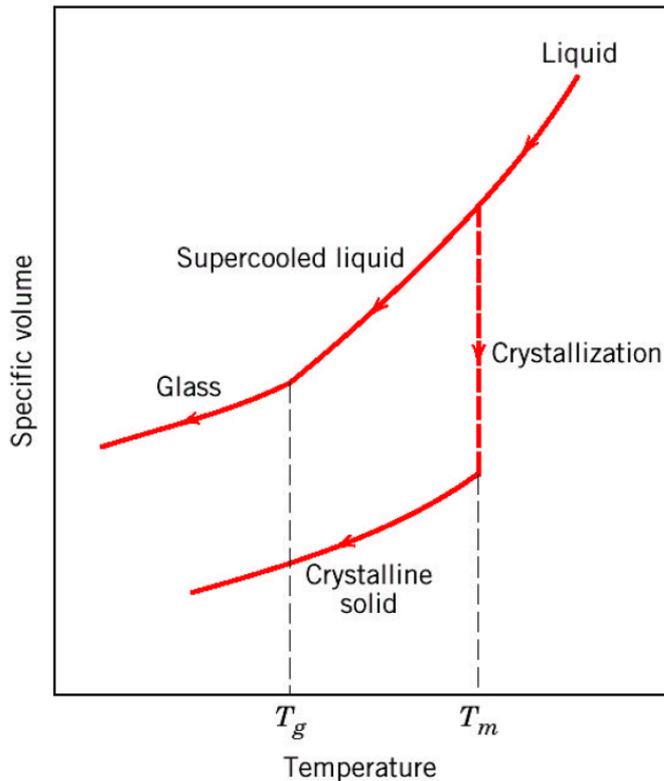
$\text{SiO}_2$  - cristalina



Estrutura com modificada com  $\text{Na}^+$



# Resfriamento de vidros



Tratamento térmico de vidros:

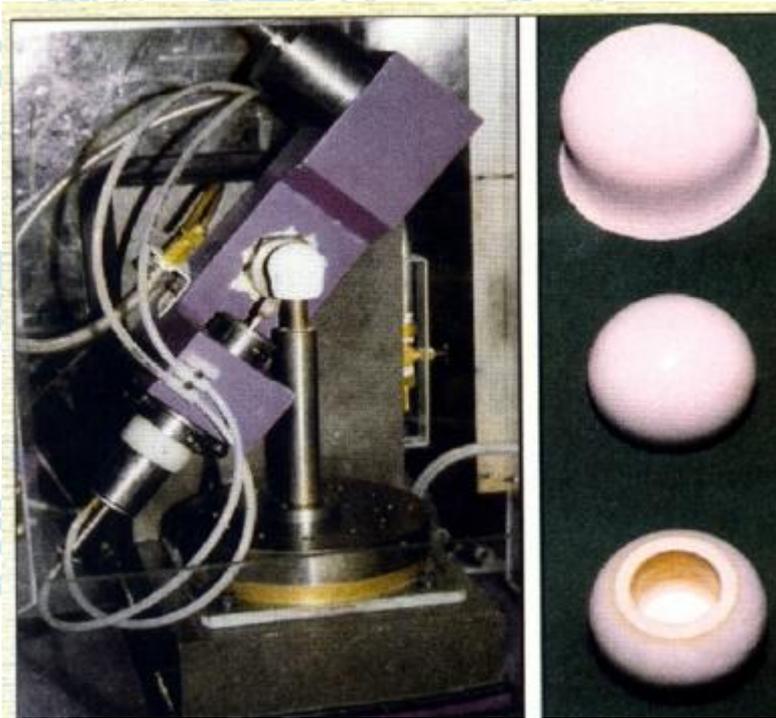
✓ recozimento;

✓ têmpera

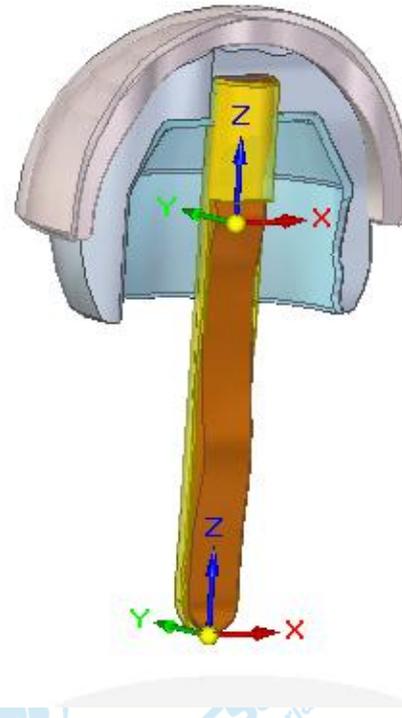


# *TRABALHOS do LTC*

# Spheres Implant



2001 – Wrege PS



BR 10 2013 006808-0





2001 – Wrege PS



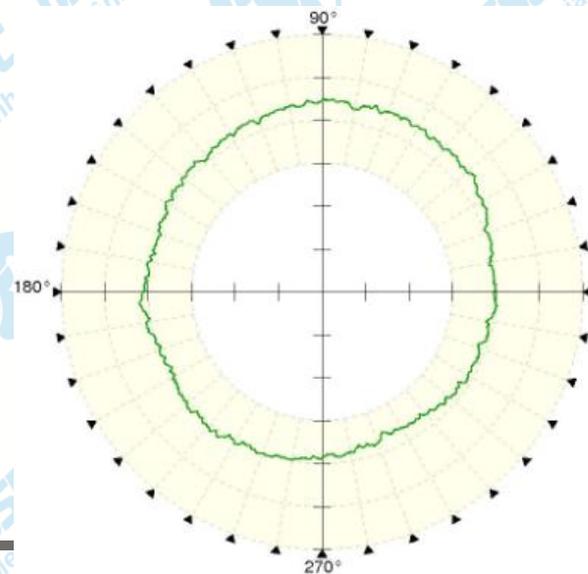
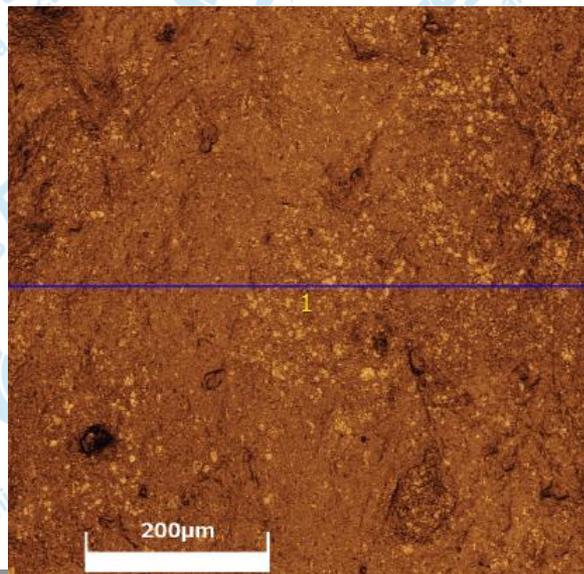
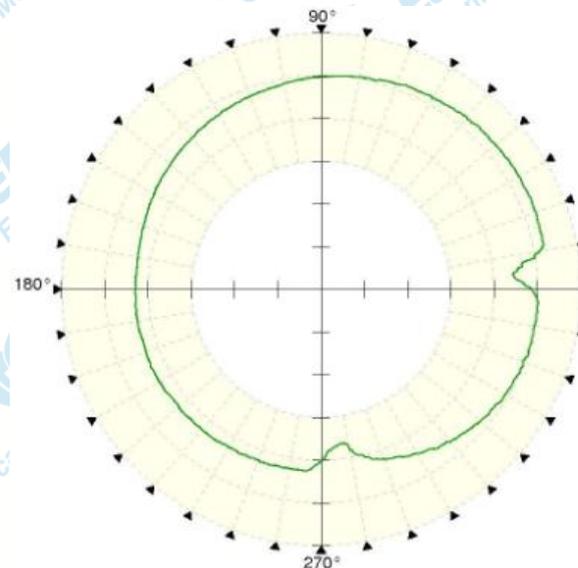
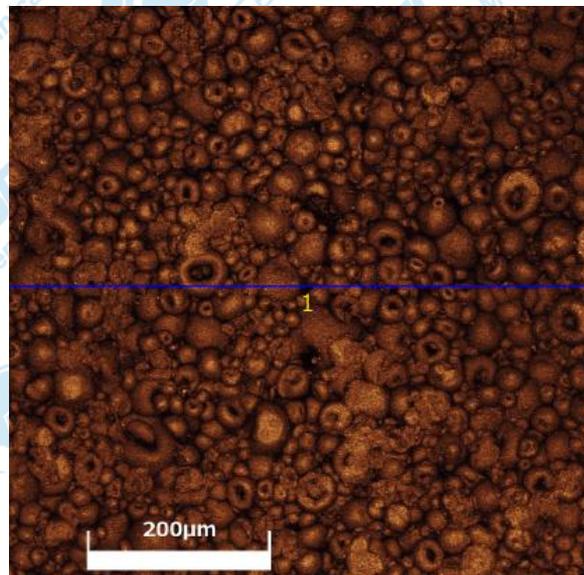
# Rabbits Spheres Implant - resurfacing



Benedito de Moraes Purquerio: adviser  
Thiago Francisco de Moraes: student

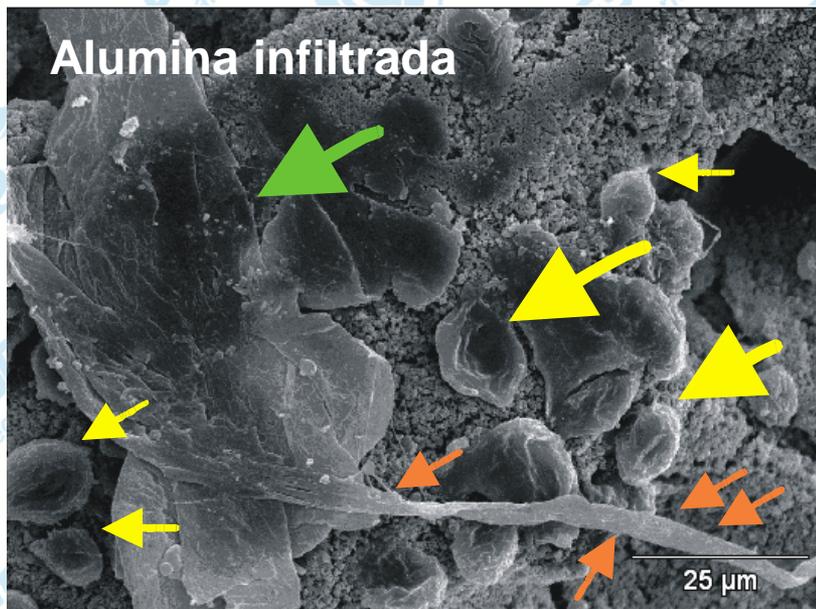
BR 10 2013 006808-0



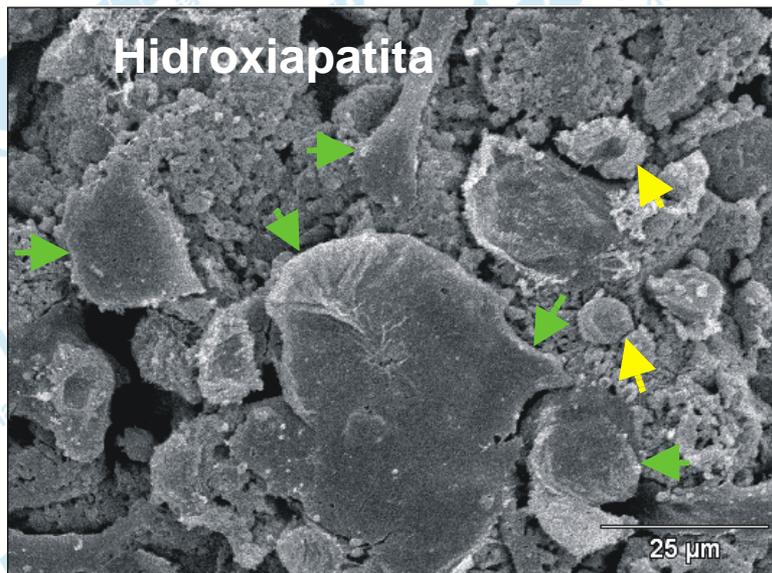




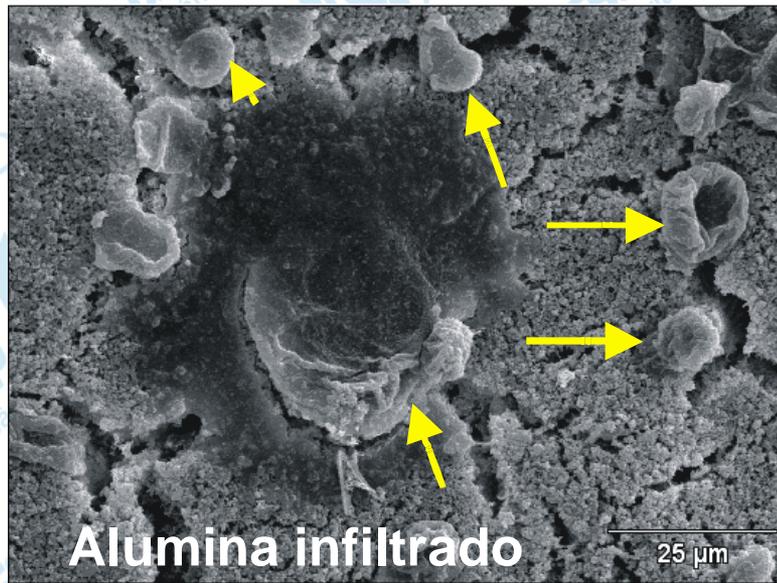
# Interação scafolde/célula



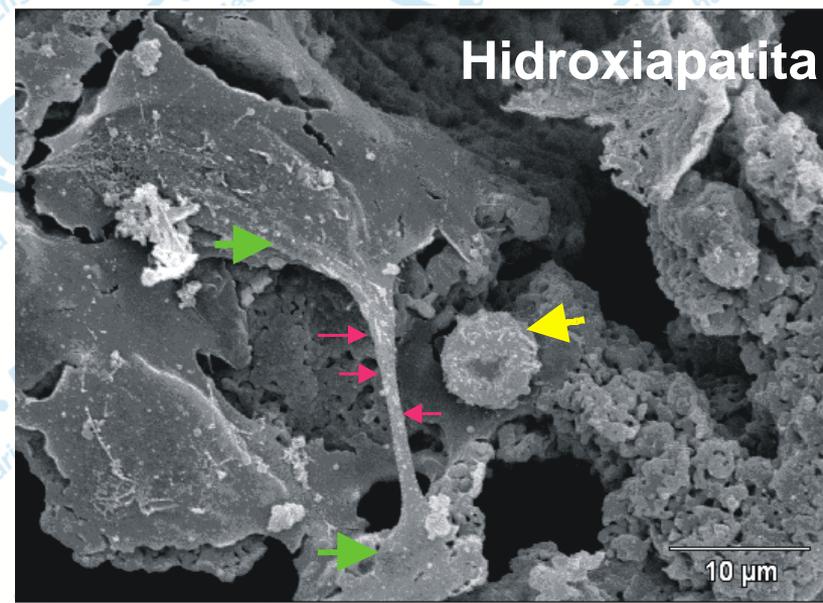
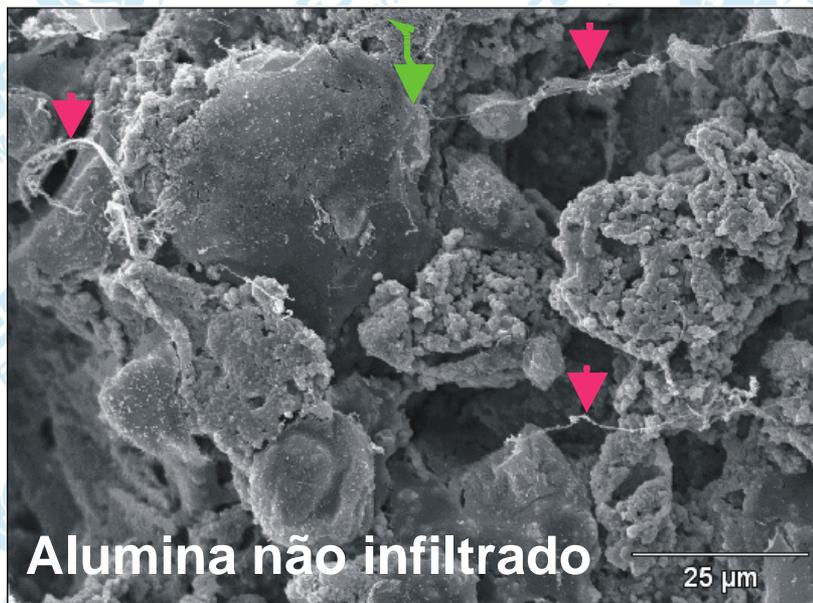
- ▬ Aglomerado de células alongadas
- ▬ Células em espalhamento
- ▬ Células espalhadas
- ▬ Células Arredondadas

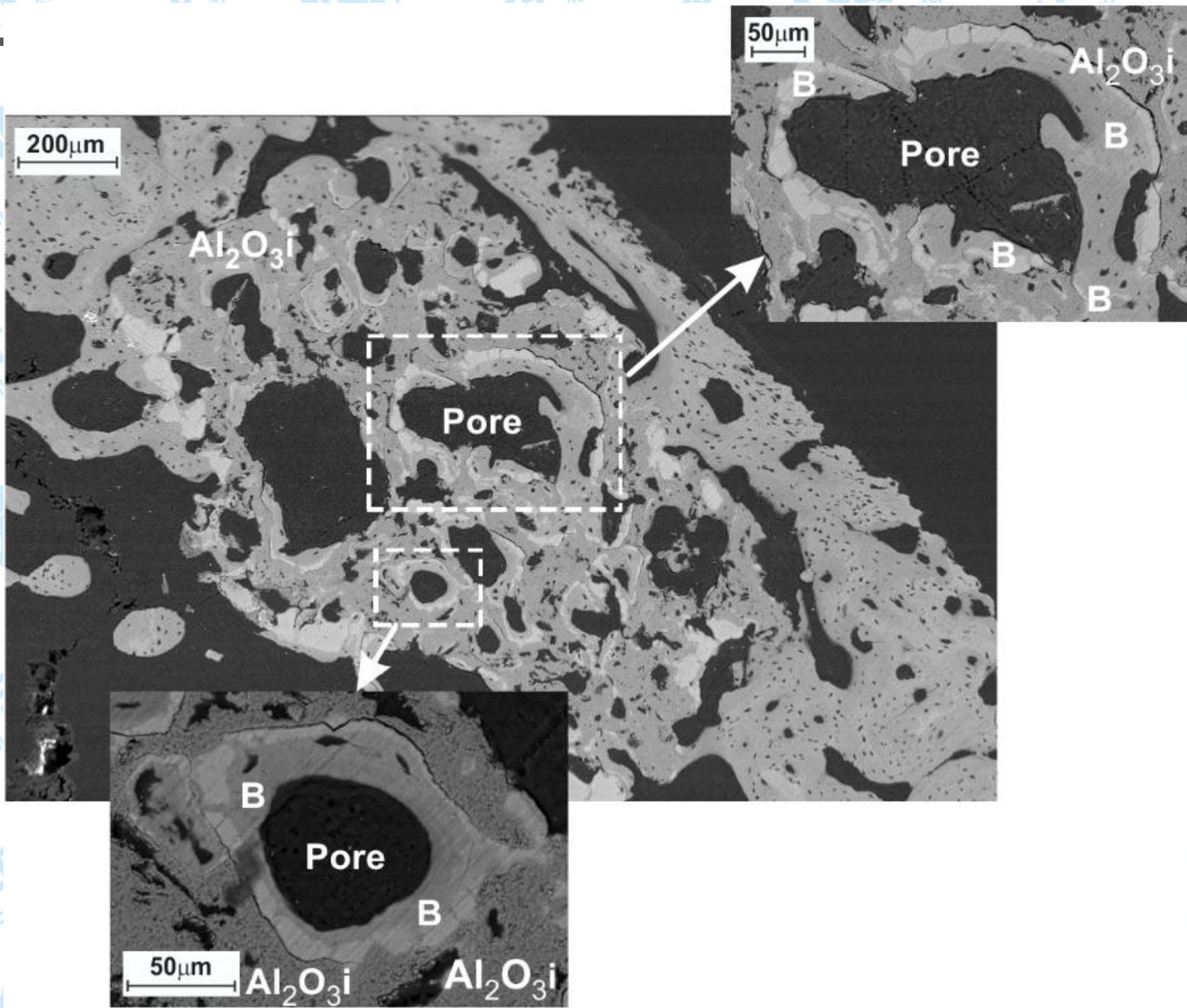


# Interação escafolde/célula

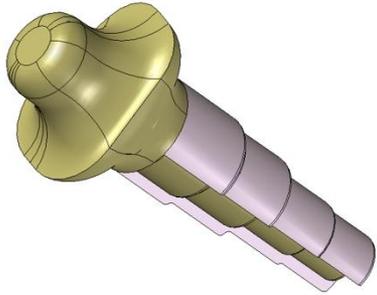


- Finos prolongamnetos
- Células espalhadas
- Células Arredondadas

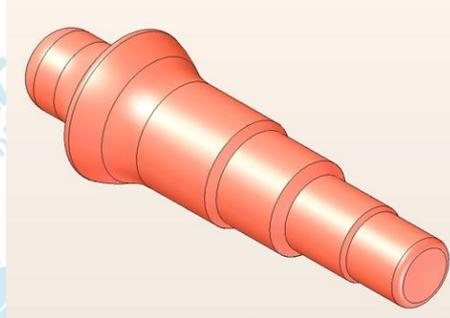




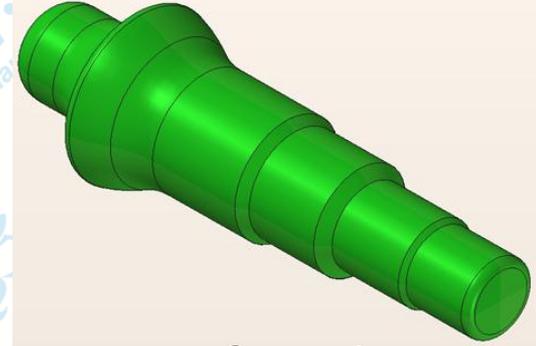
# Dental implant concept



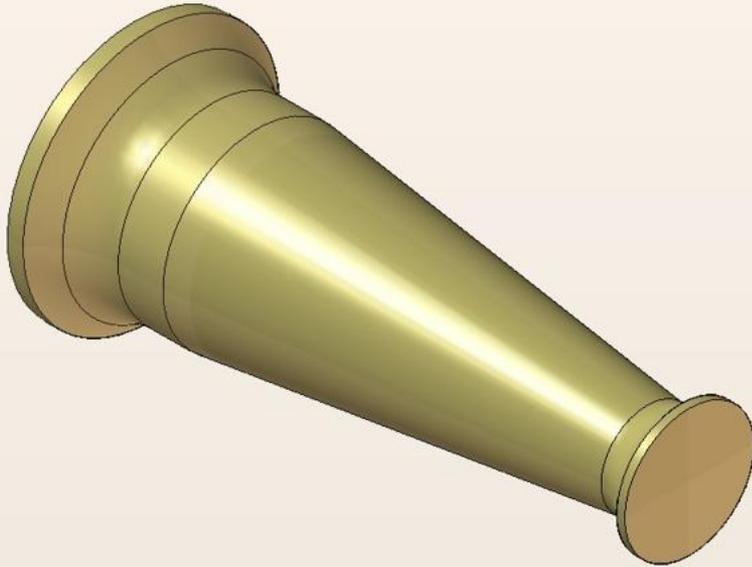
Pin covered with poros layer



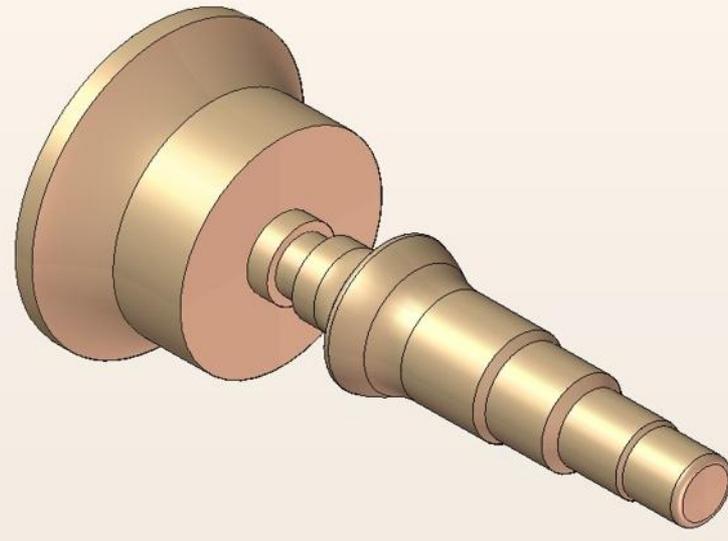
Sintered pin



Green pin



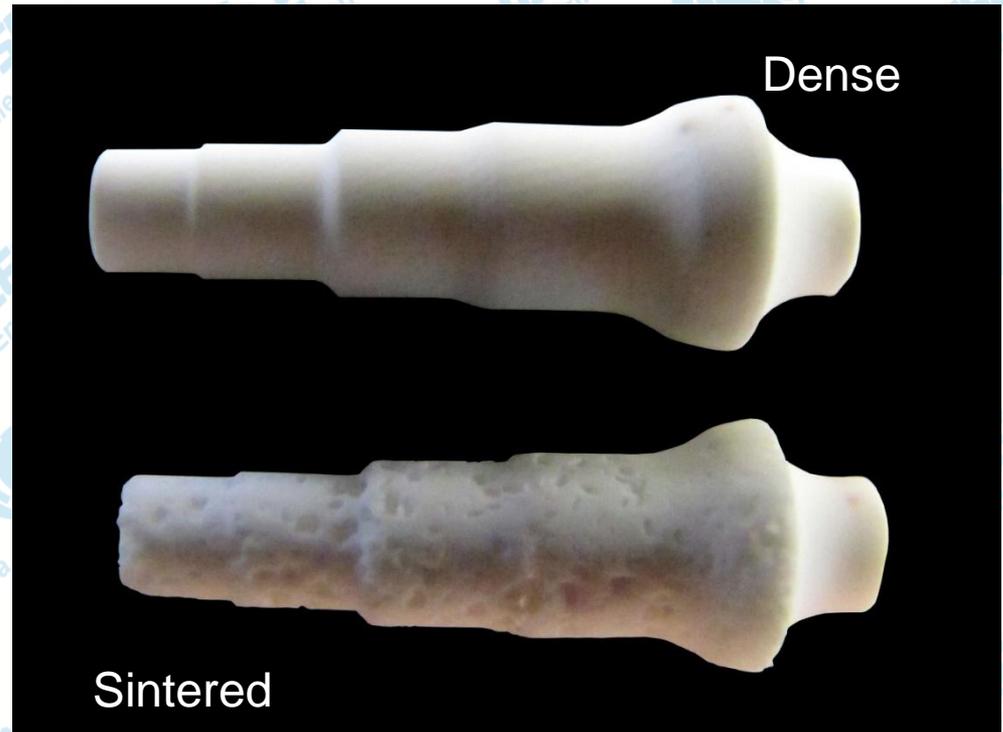
Blank pressed



Blank after machining



# Dental implant



Alexandre Margarido: autor  
Claudia Cristiane Camilo: autora  
Carlos Alberto Fortulan: orientador



# ZAS - ZIRCÔNIA – ALUMINA - SÍLICA

Objetivo: obter de maneira econômica e simples o sistema: mulita - zircônia

Zr SiO<sub>4</sub>: Zirconita

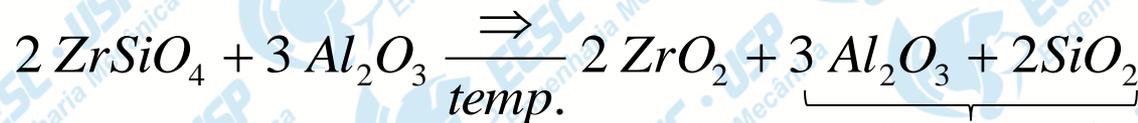
Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: Alumina

ZrO<sub>2</sub>: Zircônia

SiO<sub>2</sub>: Sílica

Alumina + Sílica = Mulita

Zircônia + Mulita = ZAS



Mulita



## Alumina reforçada com zircônia ATZ

Objetivo: obter cerâmicas duras e tenazes

$\text{Al}_2\text{O}_3$ : Alumina  
 $(\text{ZrO}_2\text{-}3\text{Y})_t$ : Zircônia



Etapa 01= Estado da arte (propriedades, mecanismo de reforço, aplicação)

Etapa 02= fazer composição química em peso de zirconita e alumina

Etapa 03= pesar composição para 300 ml de barbotina a 70vol%

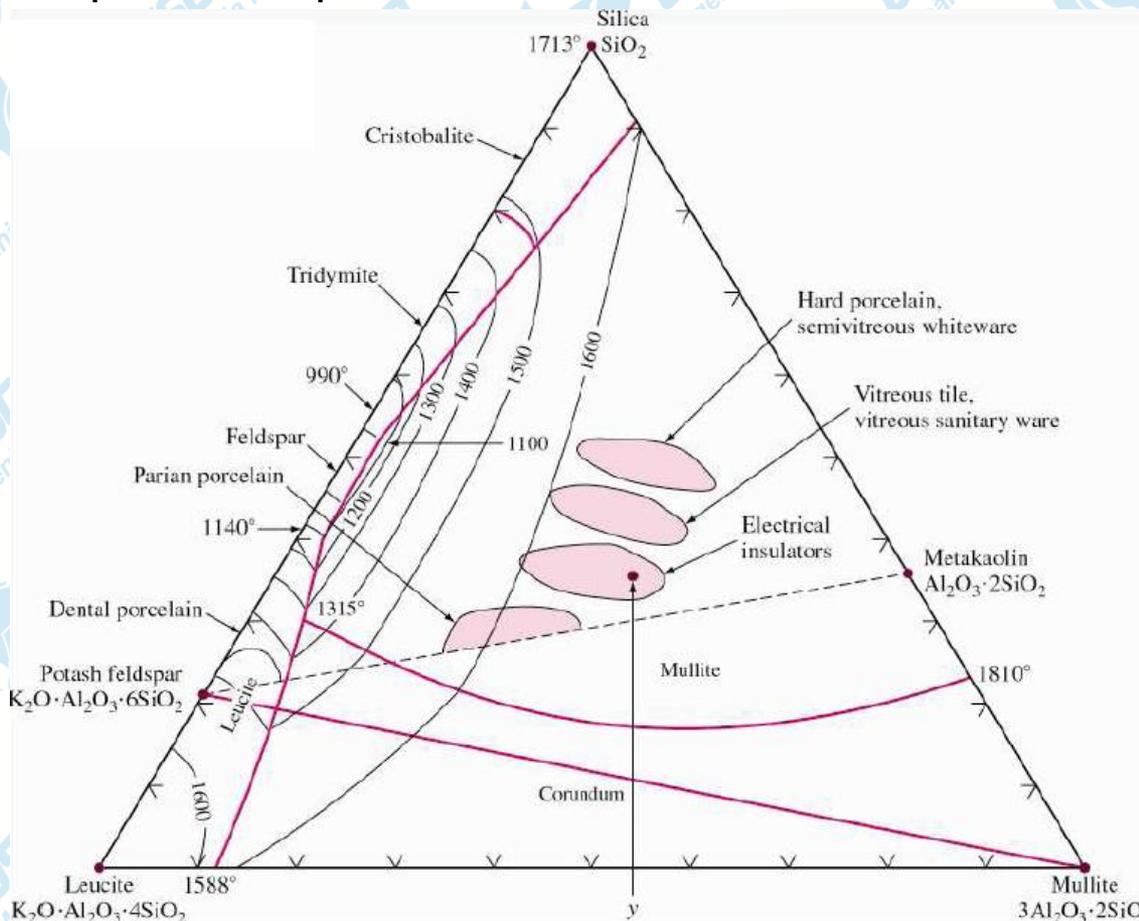
Etapa 04= moagem e conformação de pinos e tarugos por colagem de barbotina e prensagem isostática + green machining.

Etapa 05= ensaios mecânicos de desgaste (*pin-on-disc*); resistência mecânica e microscopia óptica e varredura; microdureza.

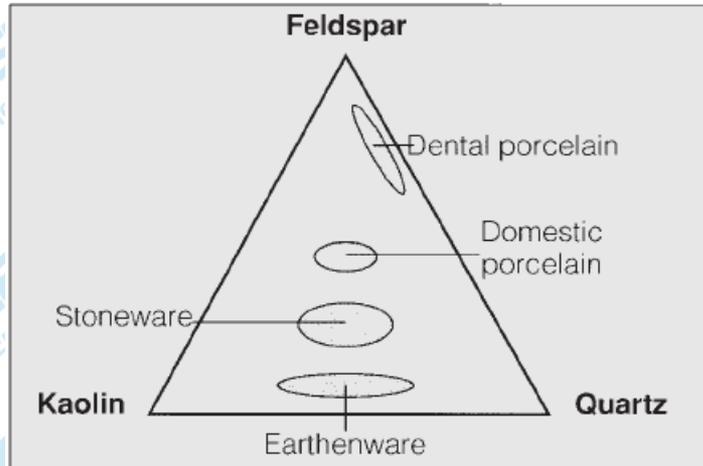


# Porcelana dentária

Objetivo: formular e processar porcelana dentária



# PORCELANA DENTÁRIA



<i>Material</i>	<i>wt %</i>
Silica	63
Alumina	17
Boric oxide	7
Potash (K <sub>2</sub> O)	7
Soda (Na <sub>2</sub> O)	4
Other oxides	2

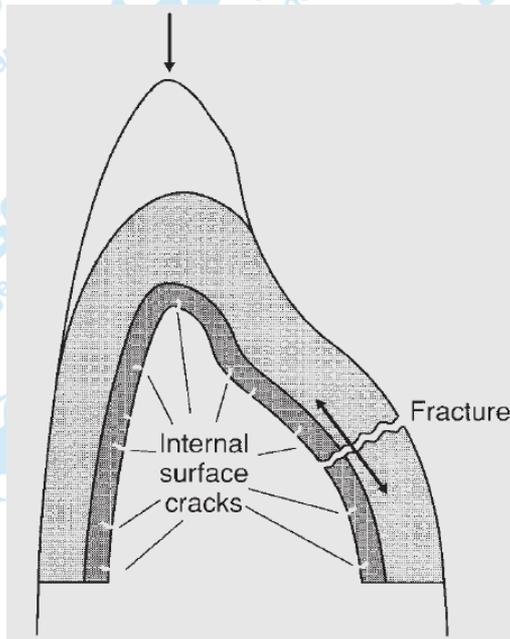
<i>Porcelain</i>	<i>% Kaolin</i>	<i>% Quartz</i>	<i>% Feldspar</i>
Household	50	20–25	25–30
Dental	0	25	65

## PROPRIEDADES

- ✓ estável quimicamente;
- ✓ estética (brilhante e vítrea) e não deteriora com o tempo;
- ✓ condutividade térmica e coeficiente de expansão térmica similar ao esmalte e dentina;
- ✓ resistência a compressão ~ (350–550MPa);
- ✓ resistência a tração ~ (20–60MPa) (muito baixa);
- ✓ resistência a flexão 20 – 30 MPa, ou 50-60 MPa sint. sob vácuo.



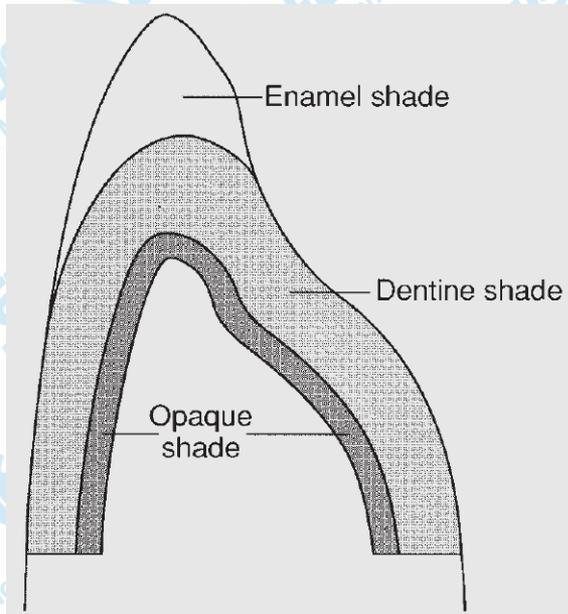
## Porcelana dentária - problemas



- ✓ presença de microtrincas (fadiga térmica);
- ✓ Núcleo metálico – acoplamento térmico;



## Projetos



- ✓ Porcelana reforçada com alumina;
- ✓ Fabricação do opaque shade em alumina\*;
- ✓ infiltração do núcleo de alumina com vidro\*\*;
- ✓ Vitro-cerâmica

✓ p.ex: leucite -  $\text{KAlSi}_2\text{O}_6$ \*\*\*

Dissilicato de lítio -  $\text{Li}_2\text{Si}_2\text{O}_5$  \*\*\*\*

Orthofosfato de lítio -  $\text{Li}_3\text{PO}_4$

### Resistência a flexão

\* 120-150MPa

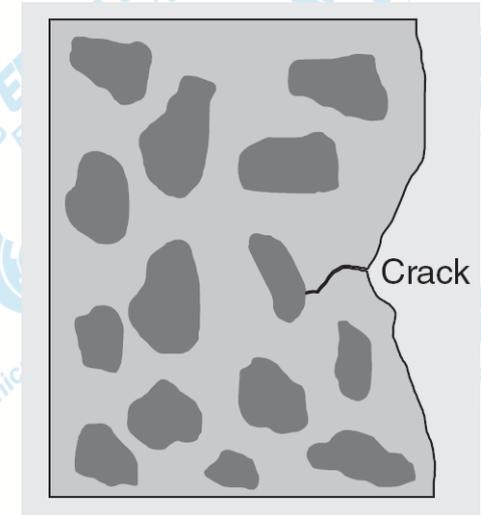
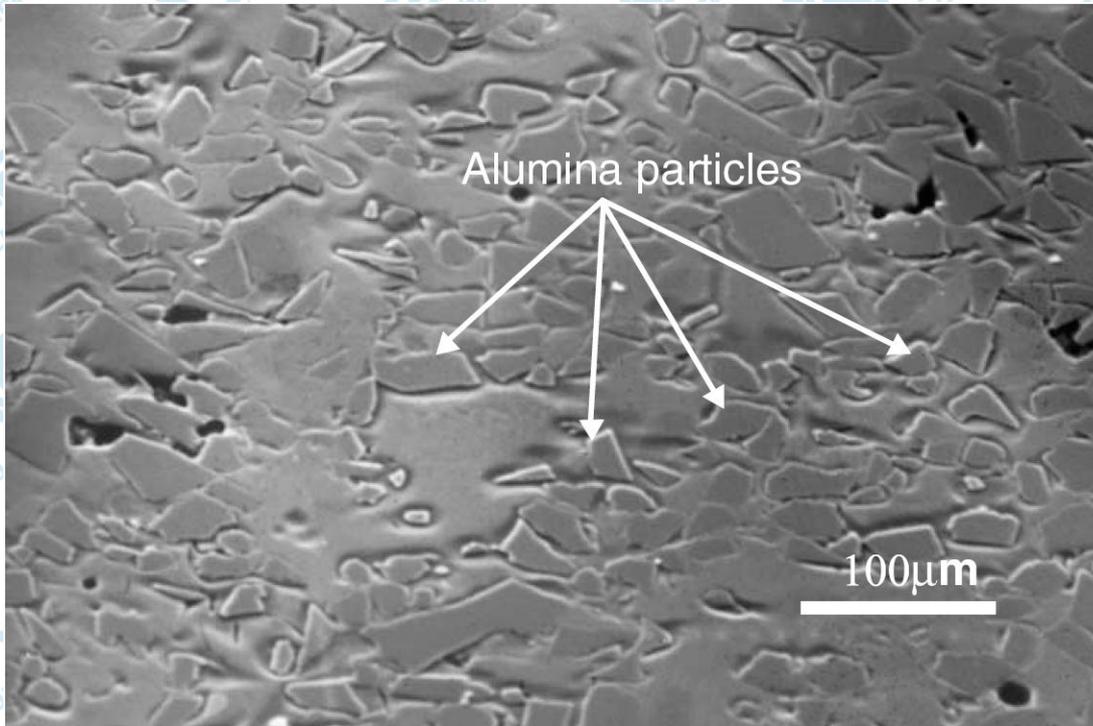
\*\* 350-500MPa

\*\*\* > 120MPa

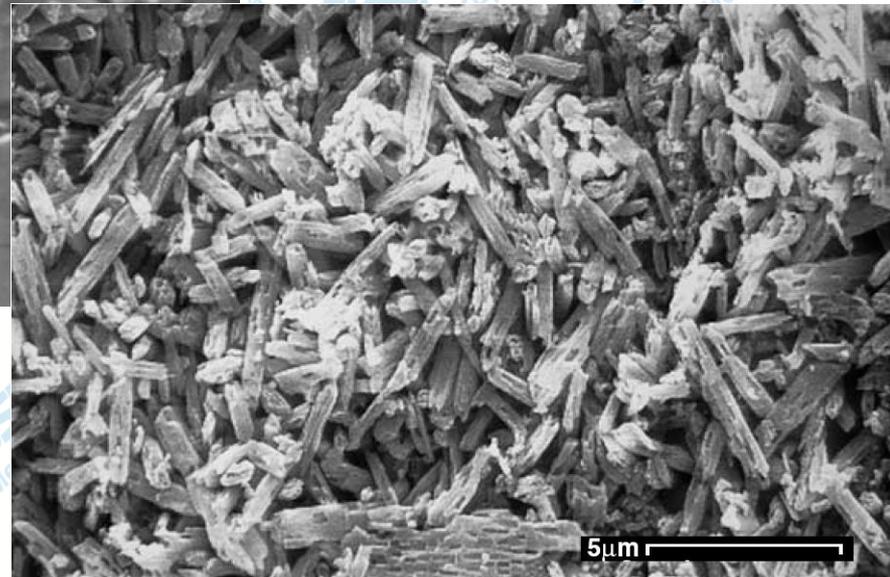
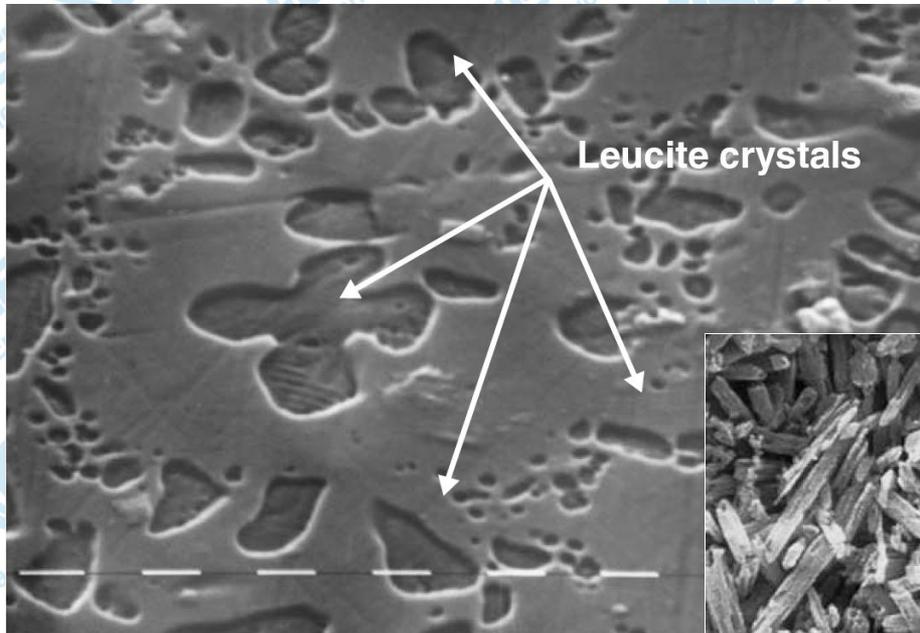
\*\*\*\* 350-450MPa



## Reforço pela adição de partículas de alumina



## Vitro cerâmicas



Dissilicato de lítio – cristais aciculares entrelaçados.



## Cerâmica Tradicional

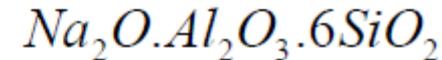
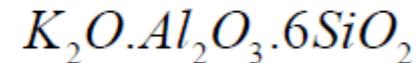
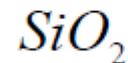
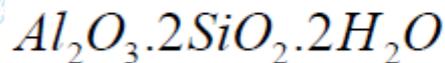
Clay

+

Silica

+

Feldspar



Temperature (°C)	Reactions
Up to 100	Loss of moisture
100–200	Removal of absorbed water
450	Dehydroxylation
500	Oxidation of organic matter
573	Quartz inversion to high form. Little overall volume damage
980	Spinel forms from clay. Start of shrinkage
1000	Primary mullite forms
1050–1100	Glass forms from feldspar, mullite grows, shrinkage continues
1200	More glass, mullite grows, pores closing, some quartz solution
1250	60% glass, 21% mullite, 19% quartz, pores at minimum

Source: F. Norton, *Elements of Ceramics*, 2nd ed., Addison-Wesley, 1974, p. 140.



Type body	China clay	Ball clay	Feldspar	Flint	Other
Hard porcelain	40	10	25	25	
Electrical insulation ware	27	14	26	33	
Vitreous sanitary ware	30	20	34	18	
Electrical insulation	23	25	34	18	
Vitreous tile	26	30	32	12	
Semivitreous whiteware	23	30	25	21	
Bone china	25	...	15	22	38 bone ash
Hotel china	31	10	22	35	2 CaCO <sub>3</sub>
Dental porcelain	5	...	95		



**Barbotina**

Volume correspondente de 70% de líquido e água e 30% de sólidos.

**Densidade****Dados da mistura**

**ARGILA SÃO SIMÃO**

SiO <sub>2</sub> %	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	CaO ppm	MgO %	Na <sub>2</sub> O ppm	K <sub>2</sub> O %	TiO <sub>2</sub> %	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> %	Mn O %	PF-% 900°C
49,5	28,5	1,08	730	0,16	750	0,46	0,8	0,05	0,01	18,81
61,33	35,31	1,34	0,09	0,20	0,09	0,57	0,99	0,06	0,01	**

\*\* Multiplicar por 1,23 o total na formulação para compensar a perda ao fogo.

**FELDSPATO POTÁSSICO (Ortoclásio) K(AlSi<sub>3</sub>O<sub>8</sub>)**

SiO <sub>2</sub> %	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O %	K <sub>2</sub> O %	PF-% 900°C
65,70	18,7	0,03	traços	traços	750	13,36	0,86

Multiplicar por 1,01 no total da formulação para compensar a perda ao fogo.

**CAULIM BRANCO COLOIDAL**

Granulometria: #325 mesh

Procedência: MINASOLO

Densidade Real: 2,60 g/cm<sup>3</sup>

Densidade Aparente: 2,50 g/cm<sup>3</sup>

PH: 4,5-5,5

Lote: MCP-325

Data (USP) 12/93

Preço em 02/12/93: CR\$ 112,00 o Kg

Quantidade: 50Kg

Análise Química

SiO <sub>2</sub> %	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	Na <sub>2</sub> O %	K <sub>2</sub> O %	TiO <sub>2</sub> %	PF-% 900°C
45,18	38,76	0,08 0,45	0,05 0,20	0,19 0,29	traços	13,60
46,00	39,60					14,00
45,59	39,18	0,27	0,13	0,24	----	14,80
53,38	45,87	0,32	0,15	0,28	----	----**

\*\* Multiplicar por 1,17 o total na formulação para compensar a perda ao fogo.



Etapa 01= Estado da arte (propriedades, mecanismo de reforço, aplicação)

Etapa 02= fazer composição química em peso ponderado

Etapa 03= pesar composição para 300 ml de barbotina a 70vol%

Etapa 04= moagem e conformação de peças.

Etapa 05= ensaios mecânicos de propriedades físicas (densidade,...)

