

MATERIAIS DE ENGENHARIA - (SEM 5908) -

Aula 05 – Cerâmicas como Materiais de Engenharia

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

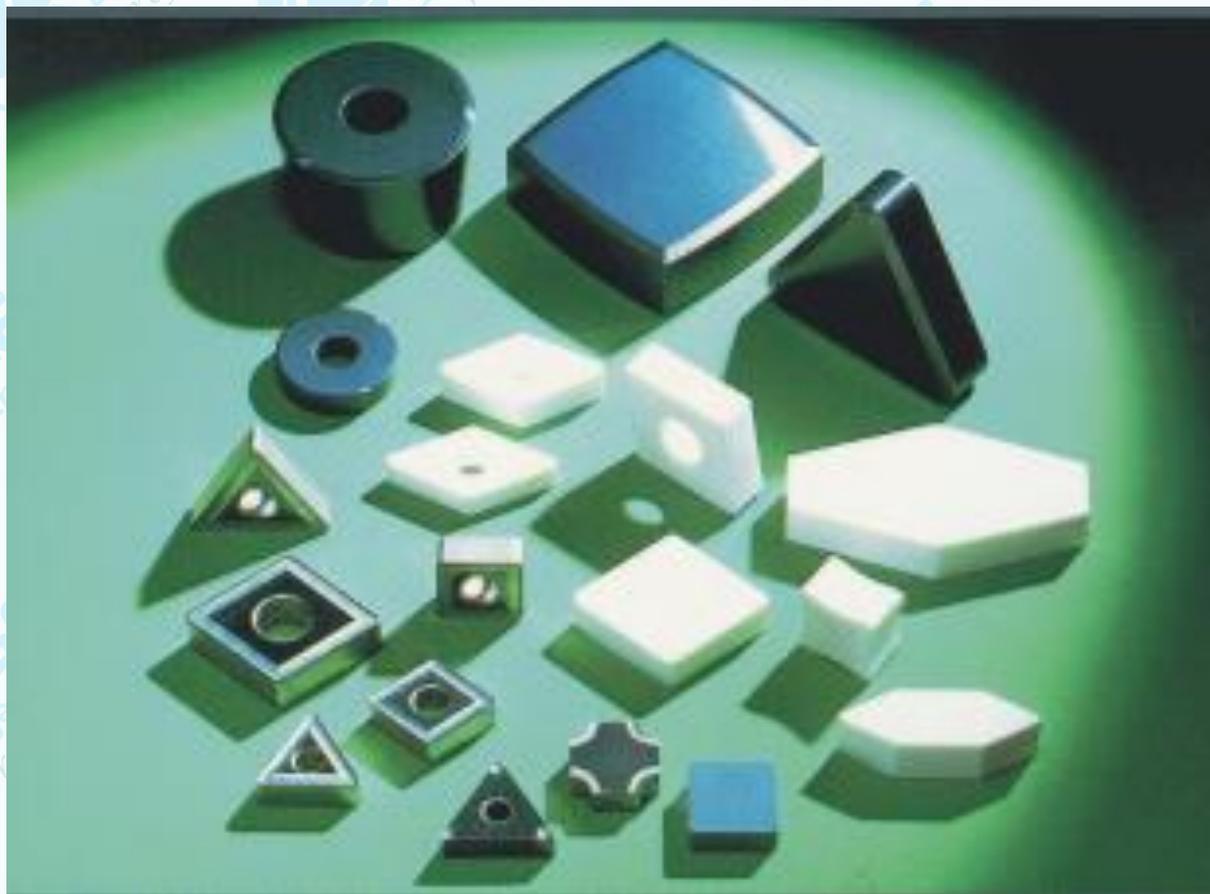
Pistões e camisas:



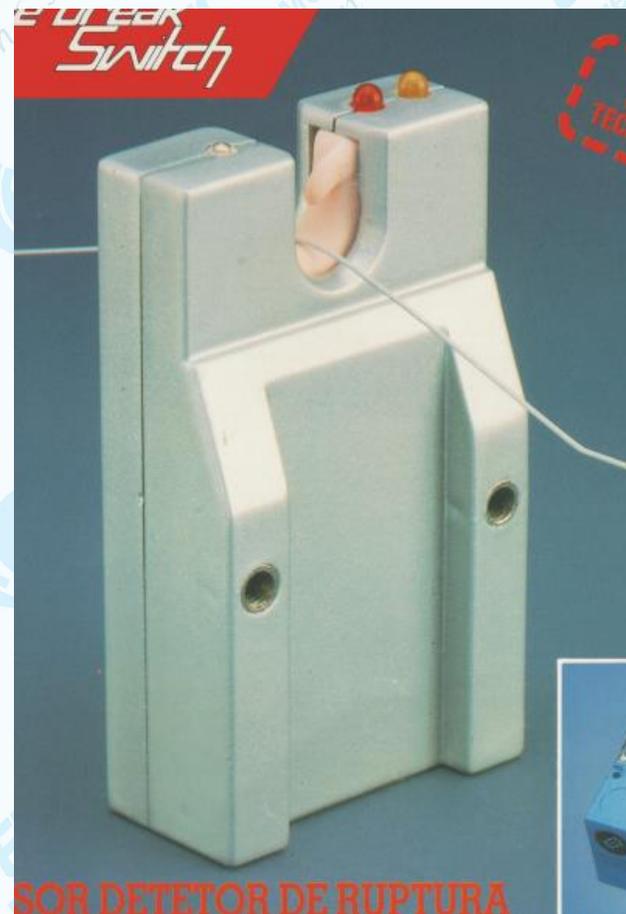
FELDMÜHLE AKTIENGESELLSCHAFT

Cerâmicas Sujeitas ao Desgaste

Ferramentas de usinagem



Guia fios



Cerâmicas que requer dureza



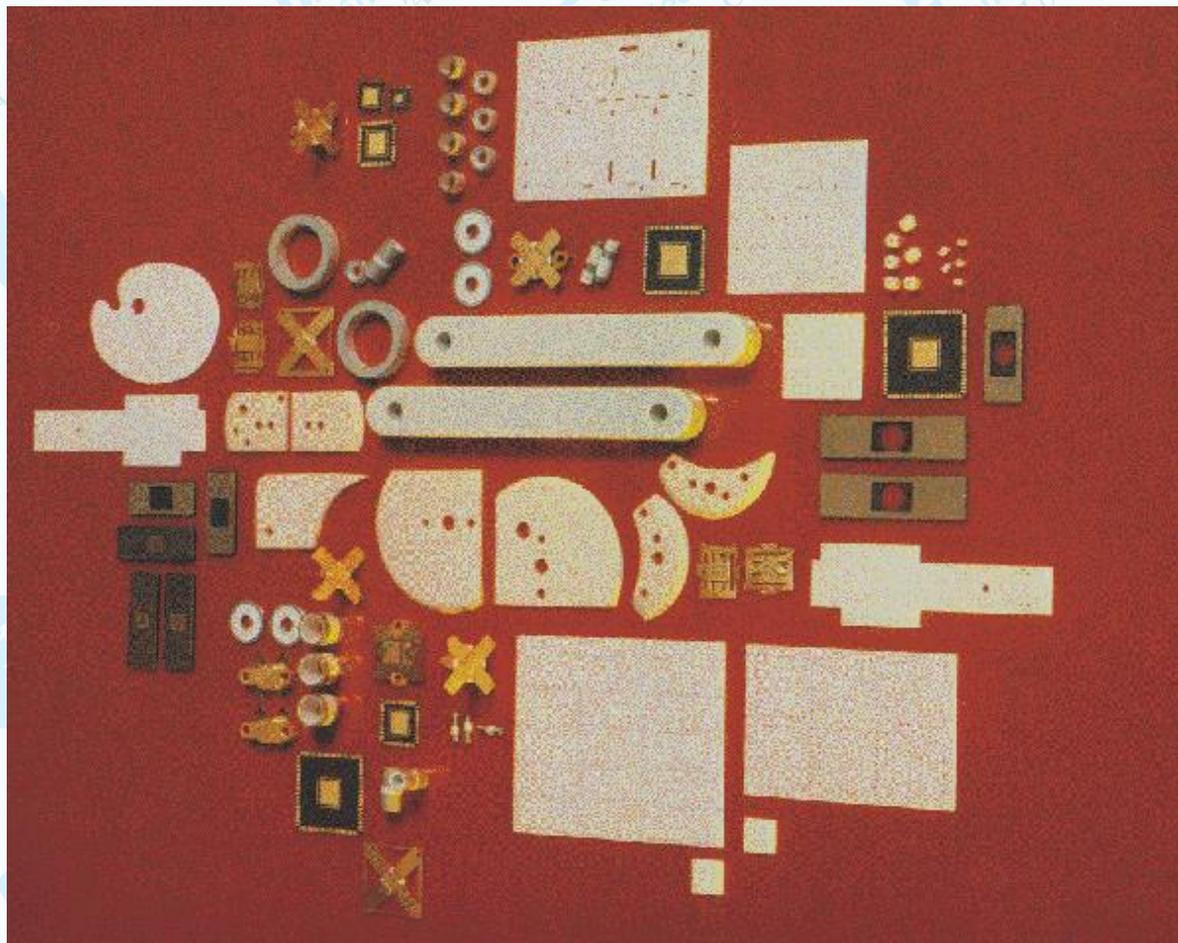
Cerâmicas: desgaste e ataque químico

Válvulas e selos mecânicos:



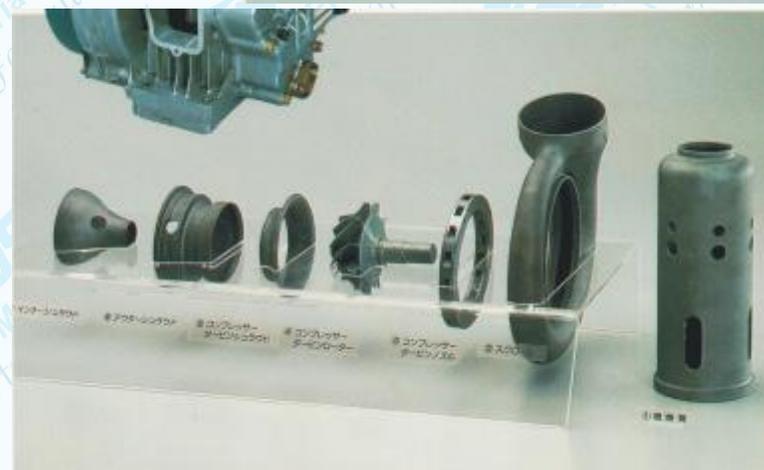
FELDMÜHLE AKTIENGESELLSCHAFT

Cerâmicas para uso Eletro - Eletrônica



Cerâmicas para uso automobilístico

Em motores:



NTK

Cerâmicas - Componentes

Mancais:



Componentes de bombas:



FELDMÜHLE AKTIENGESELLSCHAFT

Aeroespacial



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

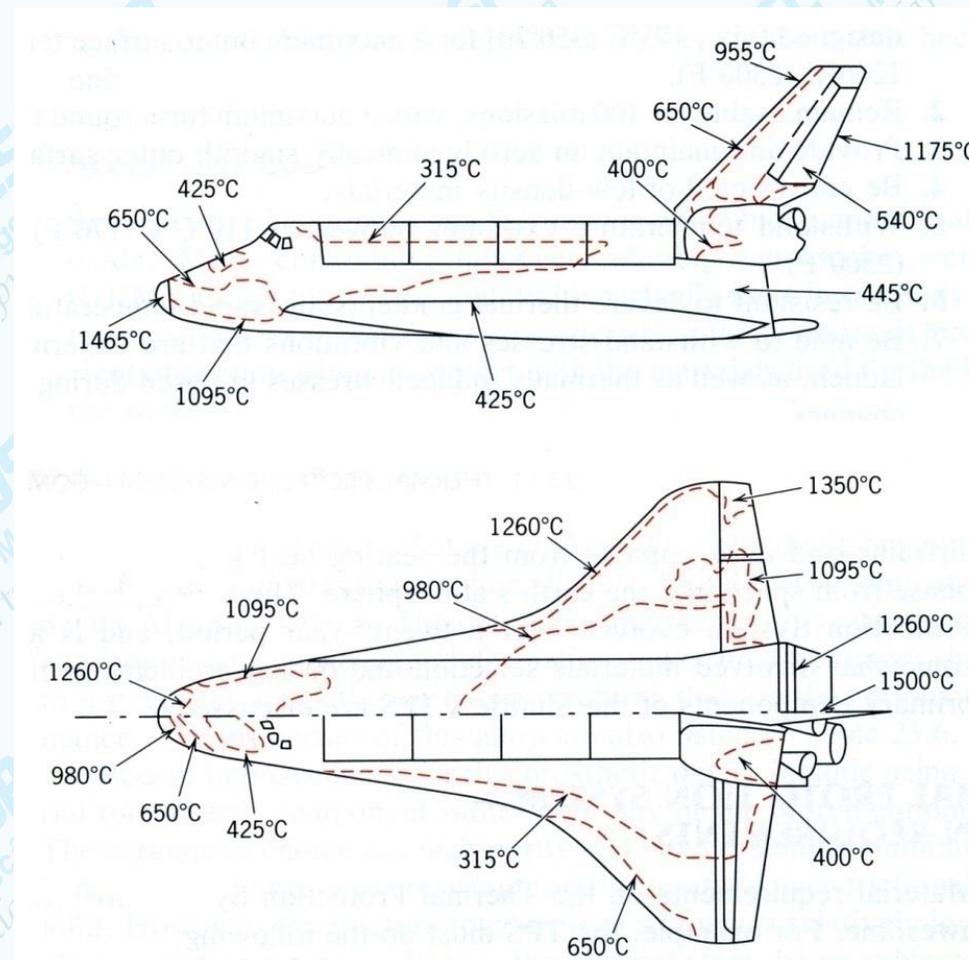
NASA

REUSEABLE CERAMIC TILES

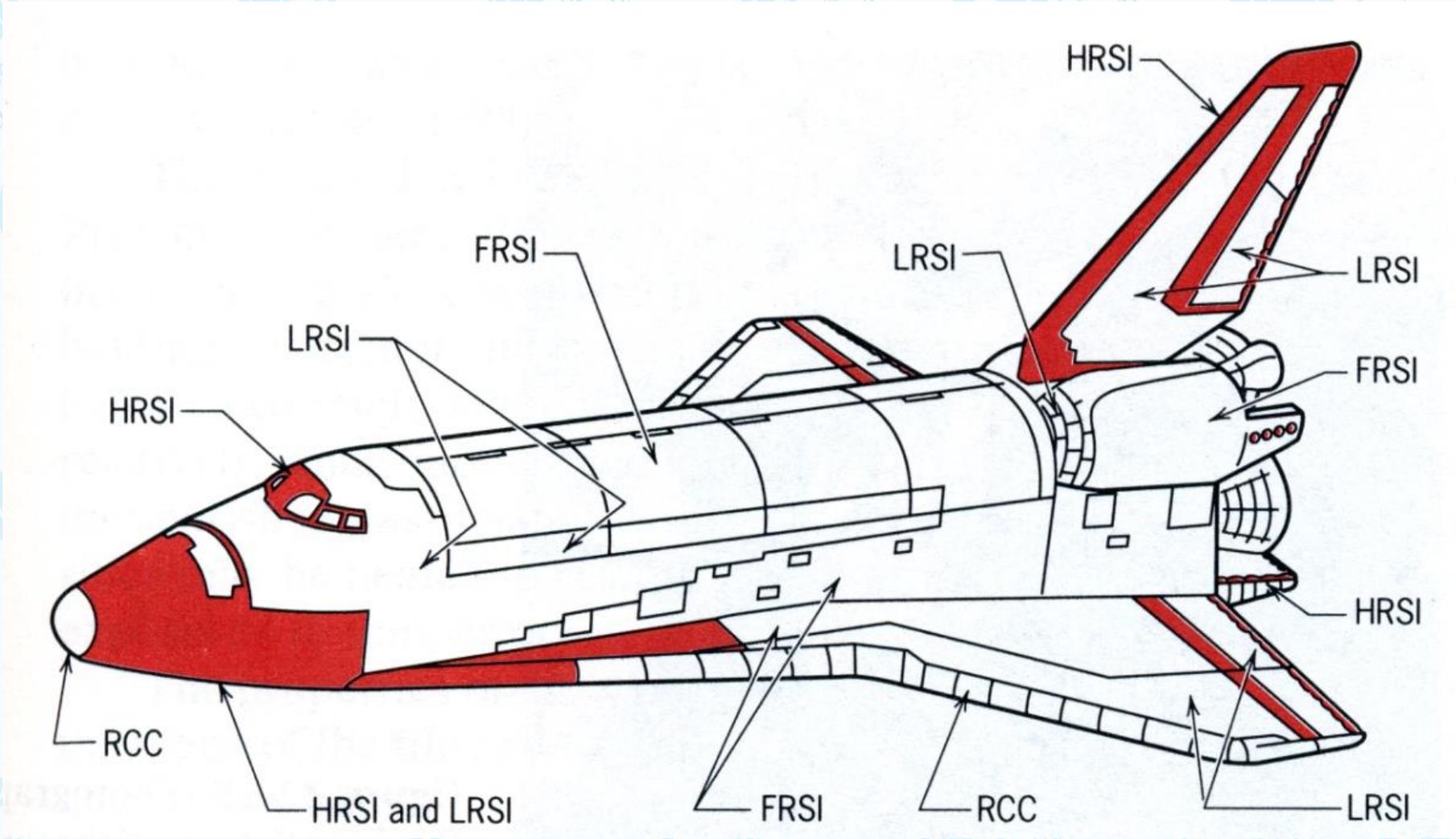
Lockheed

<https://www.awesomestories.com/asset/view/ORBITER-HEAT-TILES-Columbia-Space-Shuttle-Explosion>

Produtos para alta temperatura



Fonte: Wesgo Div., GTE.

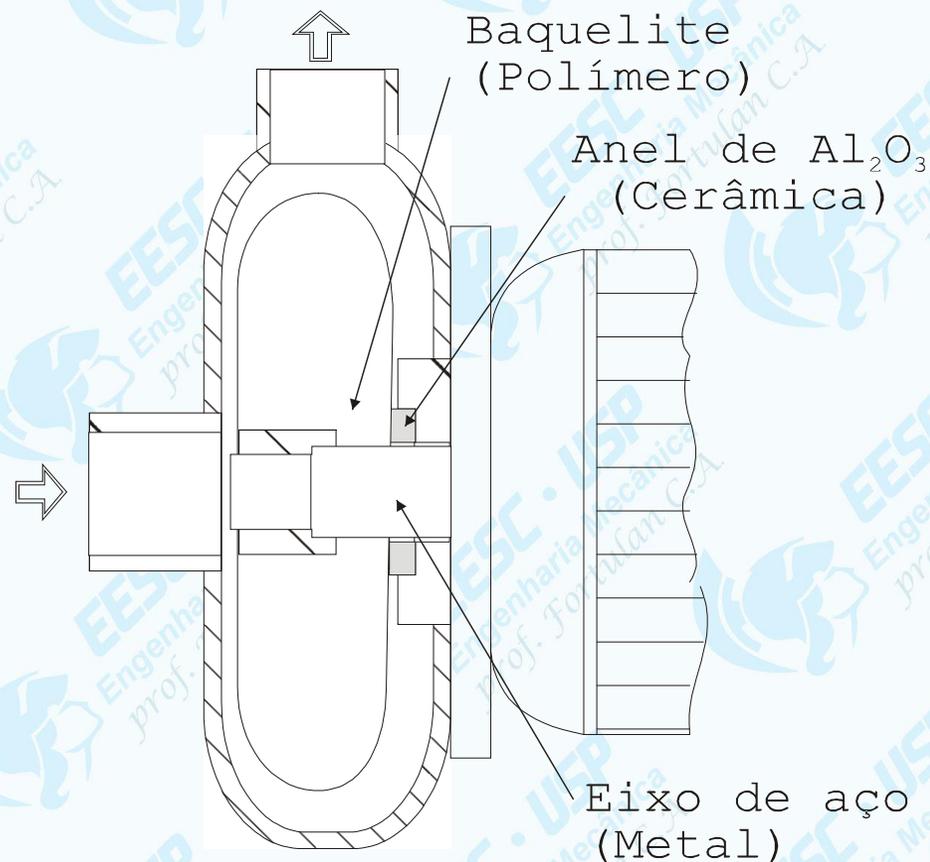


Componentes de Grafite

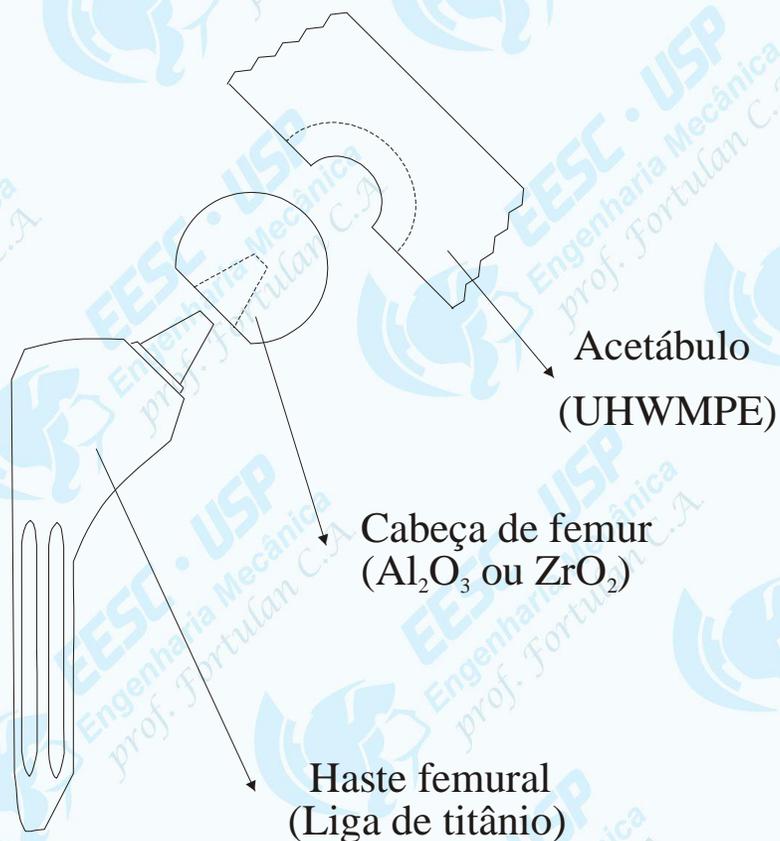


Fonte: Poco Graphite, Inc., a Unocal Co.

Aplicações conjugadas - Bomba d'água



Aplicações conjugadas - Implante de fêmur

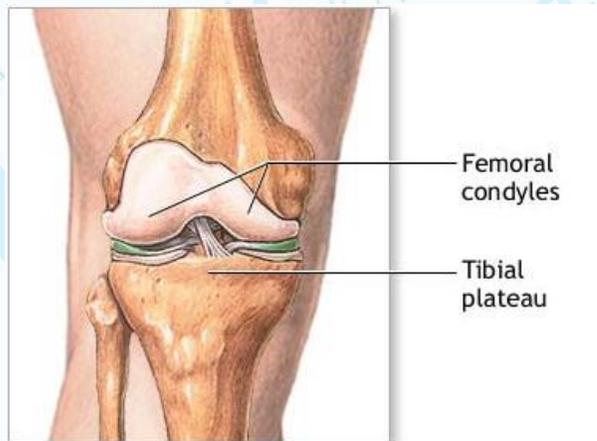


Aplicações como biomateriais

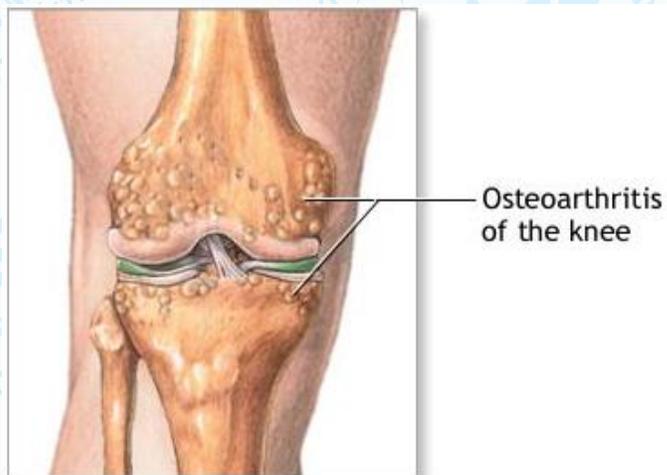


<http://sciencelearn.org.nz/Contexts/Ceramics/Sci-Media/Video/What-are-bioceramics-and-biomaterials>

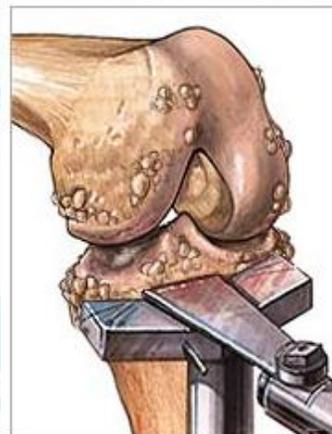
Aplicações como biomateriais



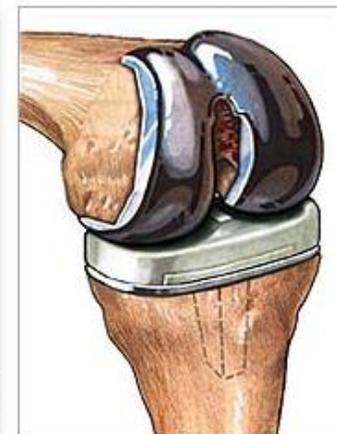
ADAM.



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

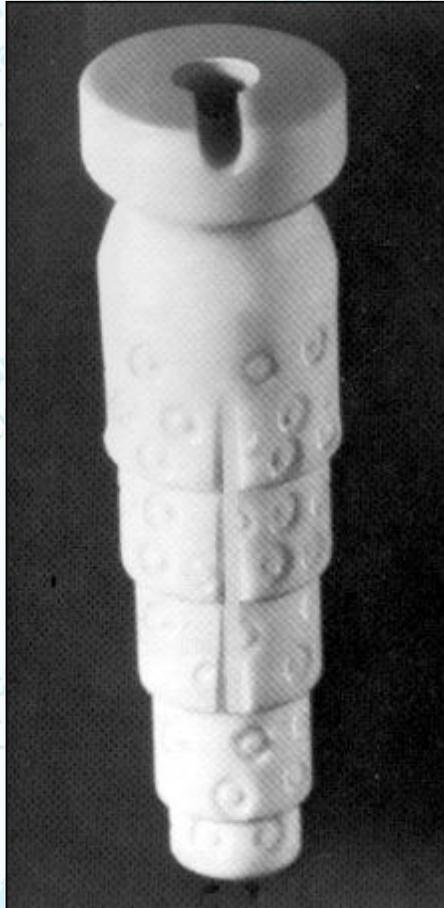


Ceramic Implant



¹ Wilmar G, "Ceramics for Total Hip Replacement - What a Surgeon Should Know," Orthopedics, Vol. 1998, No. 2, February 1998.
² Howmedica Osteonics White Paper, Literature No. LSA23.
³ Schmalzried T, et al, "Long-Duration Metal-or-Metal Total Hip Arthroplasties with Low Wear of the Articulating Surfaces," Journal of Arthroplasty Vol. 11, No. 3, 1996.
⁴ Data on file at Howmedica Osteonics.
⁵ Taylor SK, Serikian P, Masley 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)].



Time for zirconia

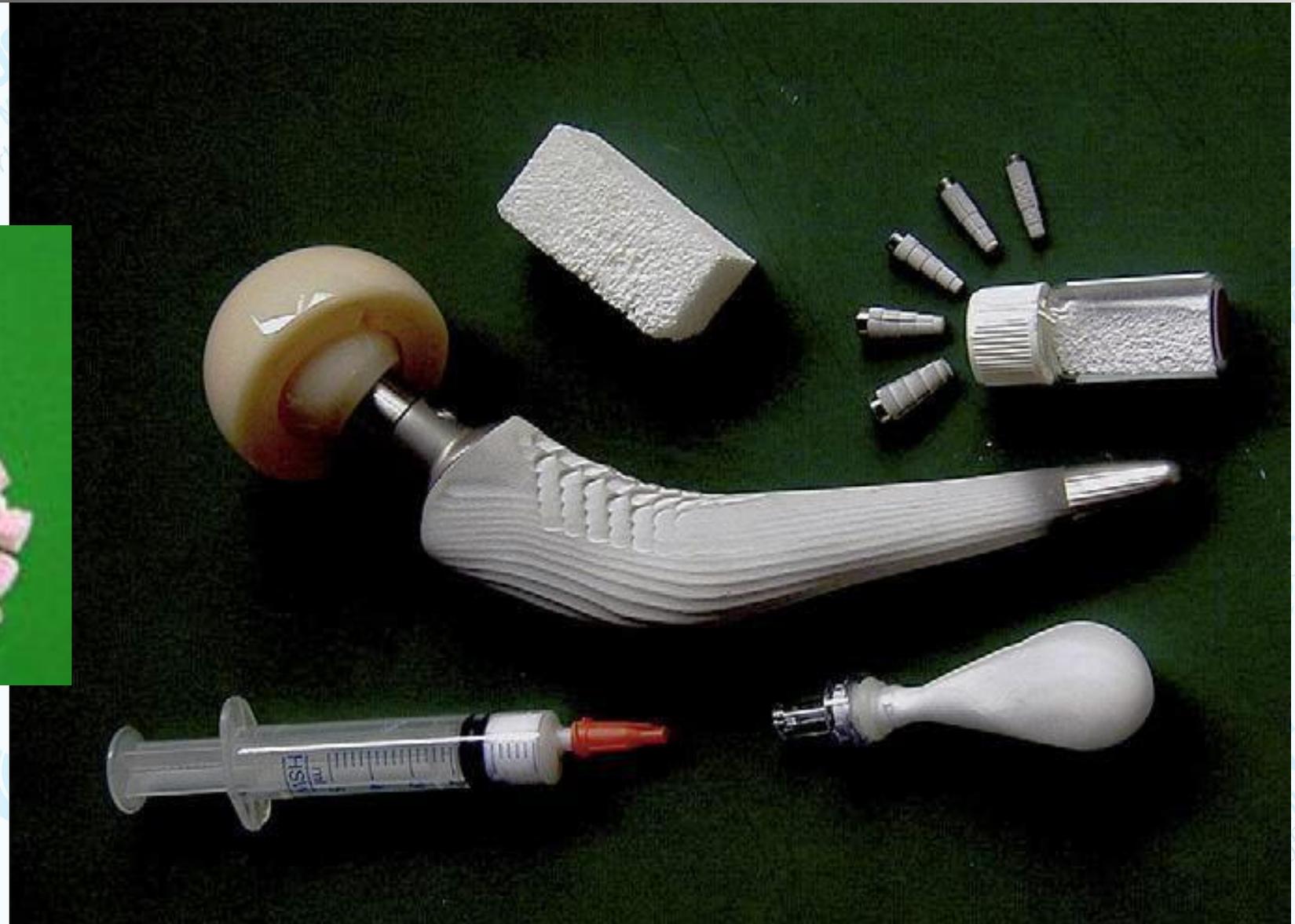
Metal-free dental aesthetics with Z-Systems

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

Recobrimentos

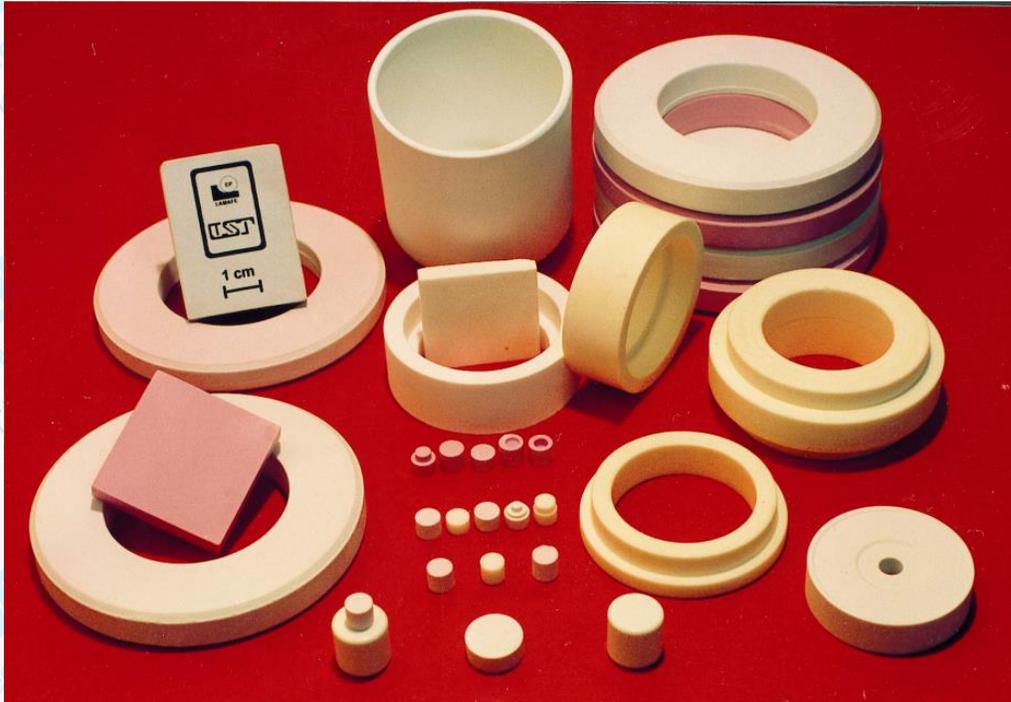


<http://www.hydroxyapatite.com/>



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.

CERÂMICOS

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?

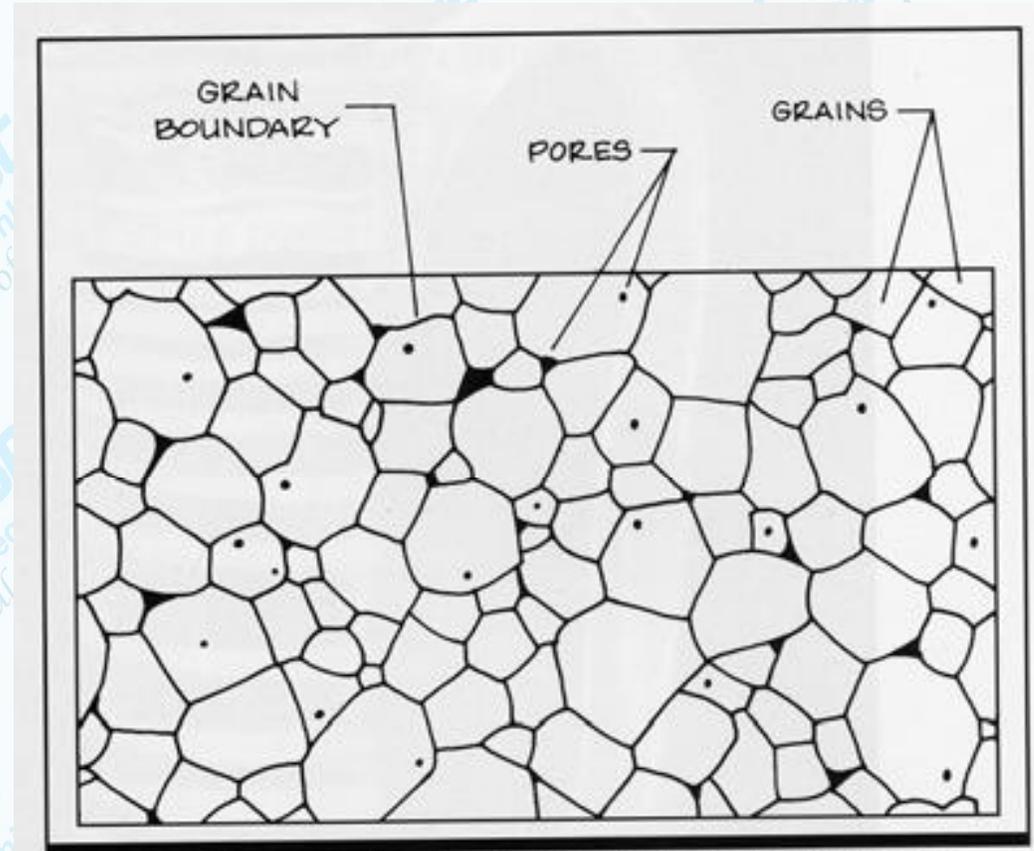
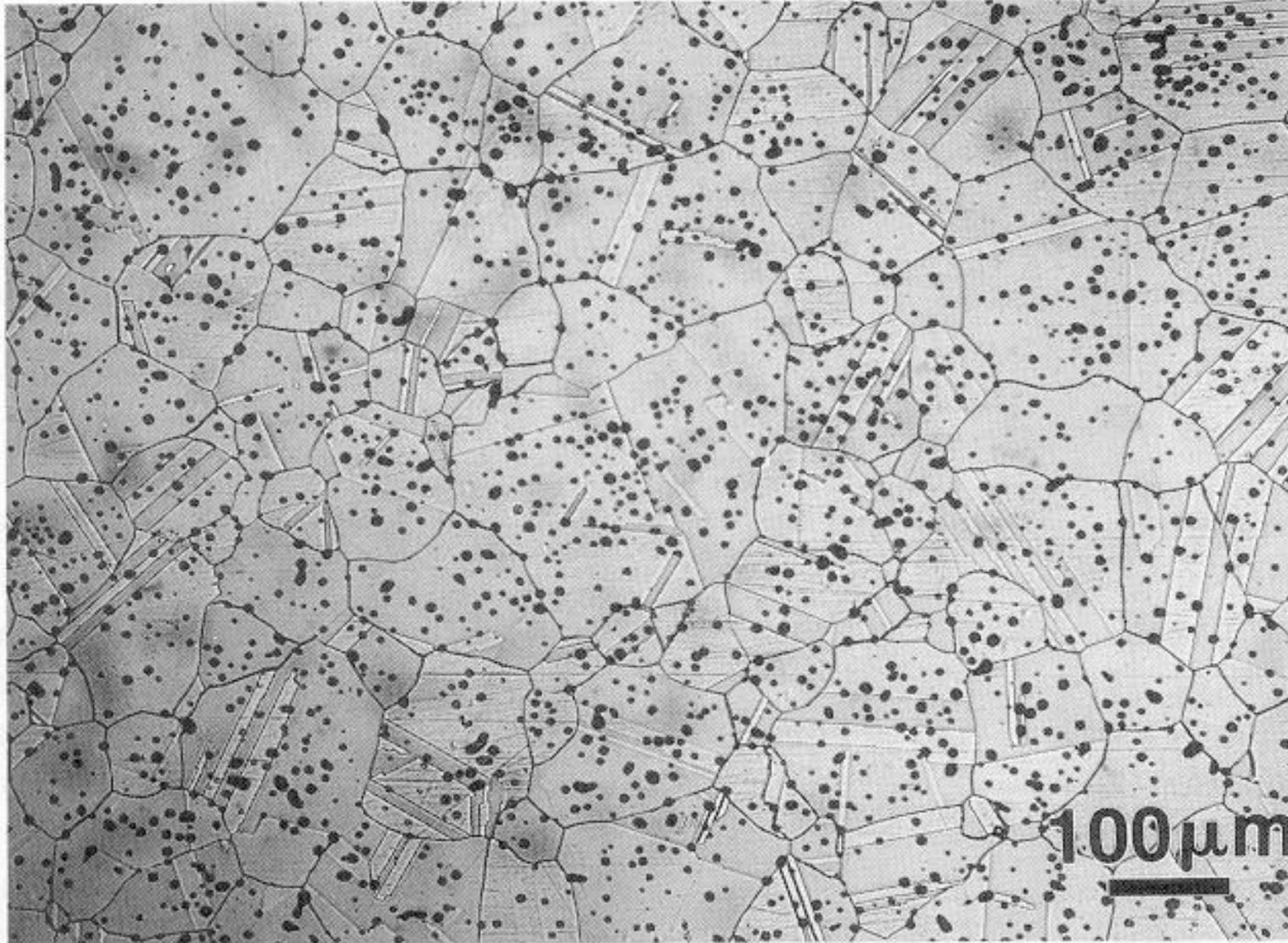
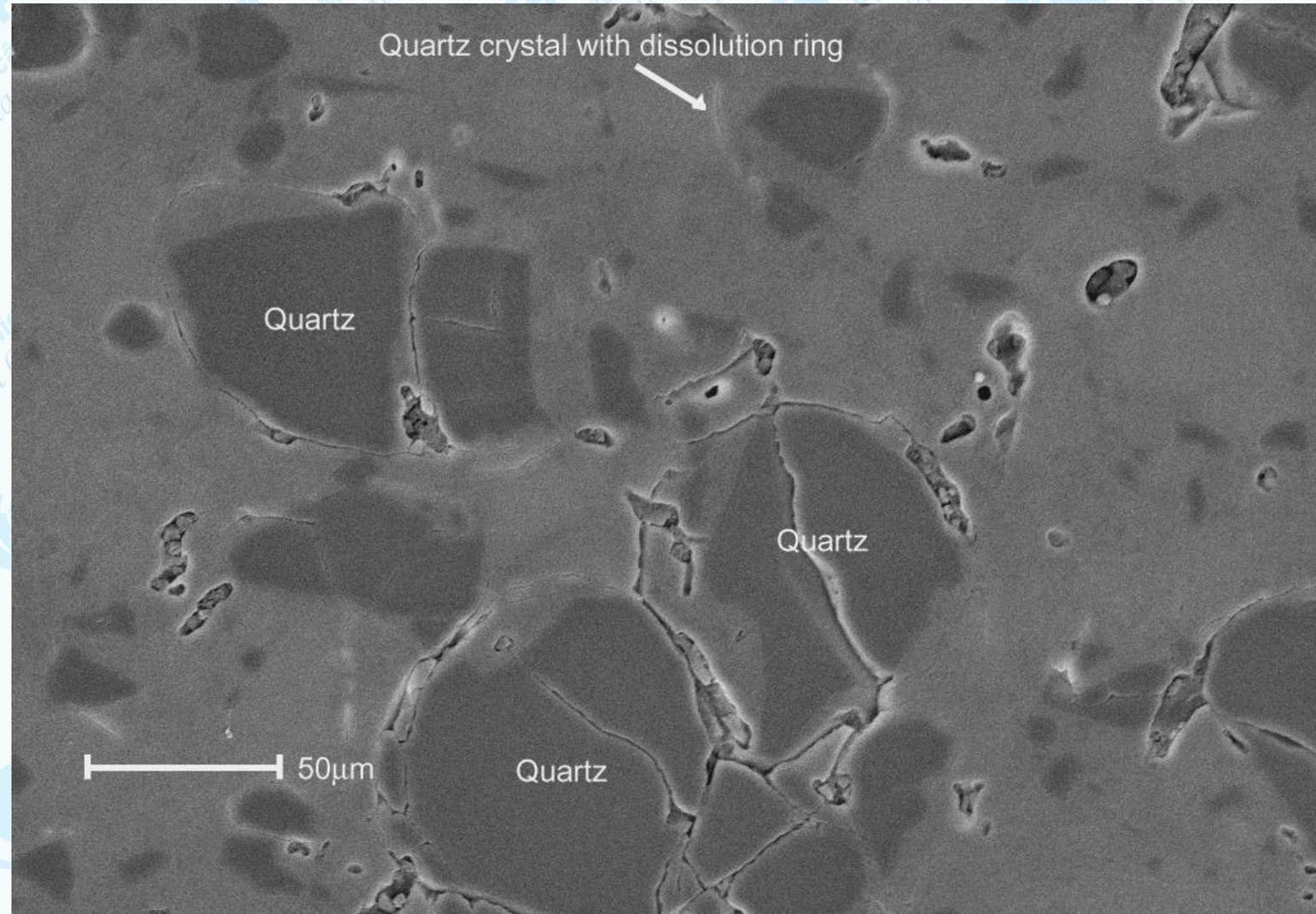


Figure 2-3. Features in the microstructure of a typical polycrystalline ceramic.



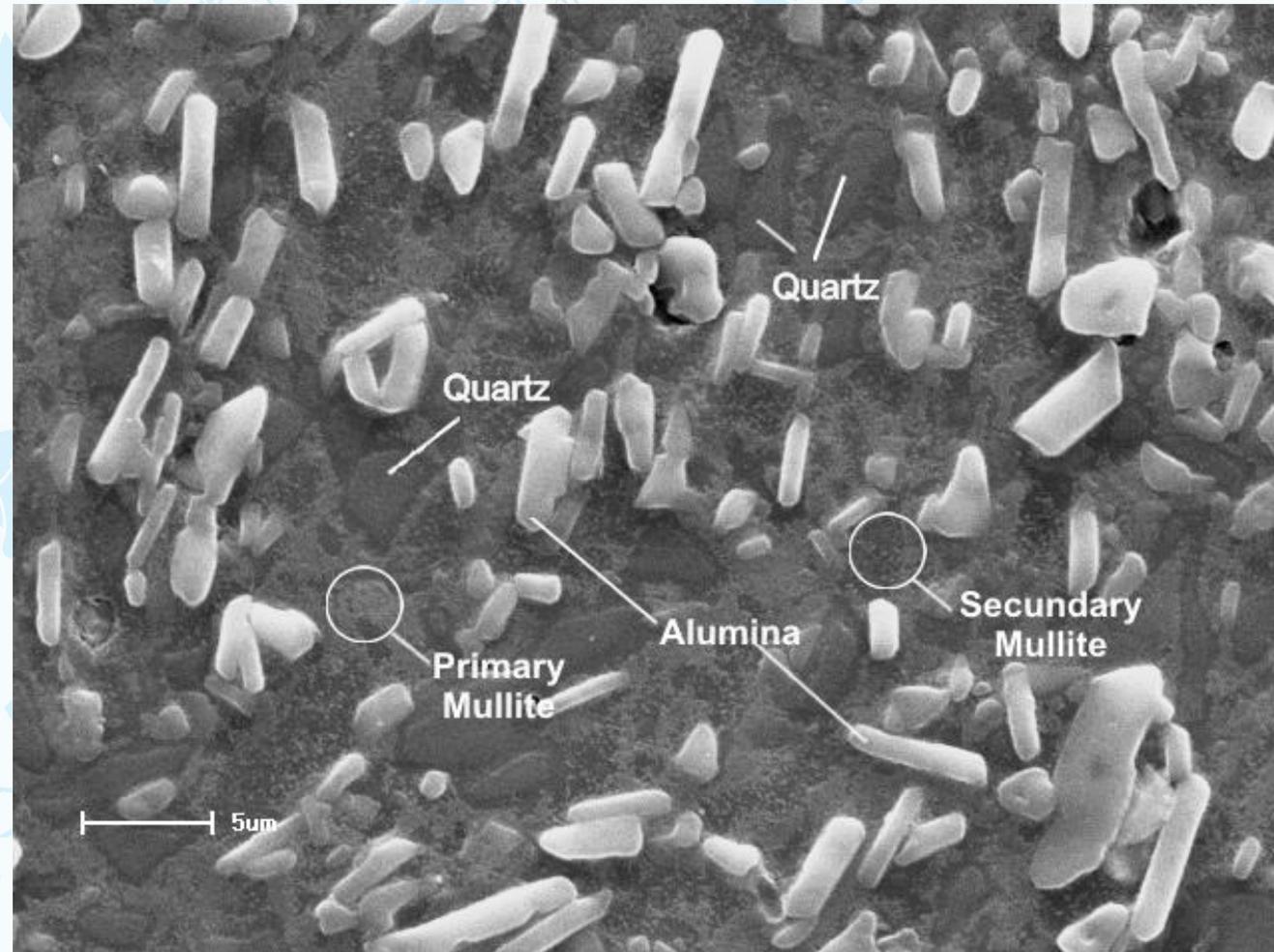
Porcelana



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

47 MPa

Porcelana de alta alumina 50 vol%



185 MPa

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

Porcelana de alta alumina 70 vol%

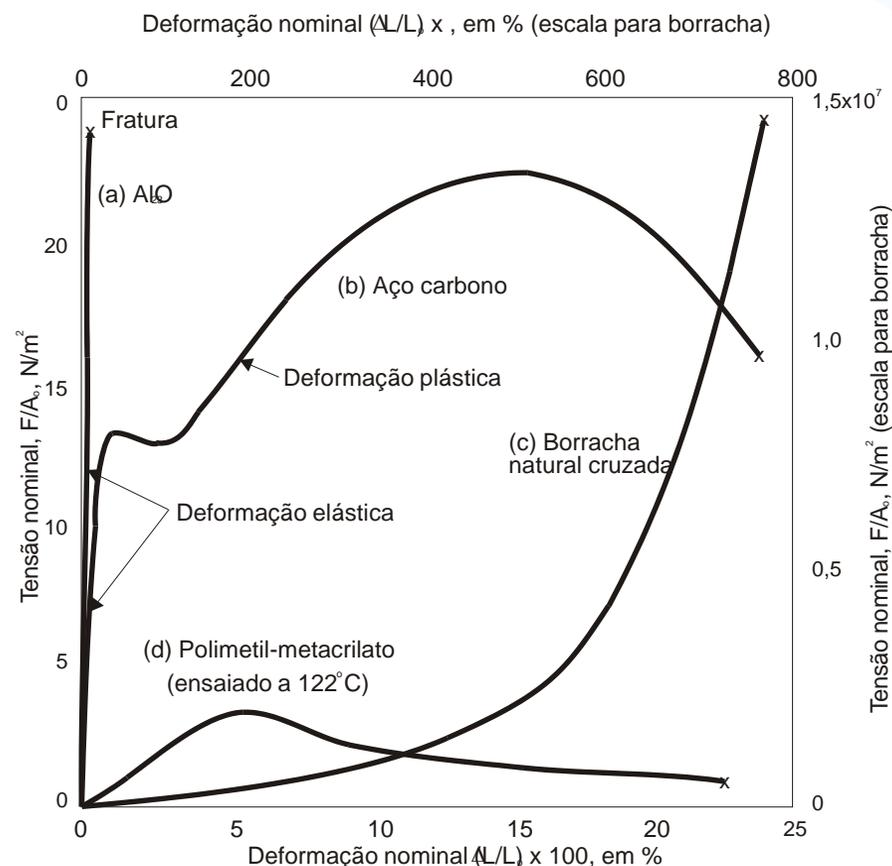


200 MPa

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

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 com ligações iônicas predominantes apresentam relativo baixo valor de E,

ex: NaCl ~44,2 GPa,

com predominância de ligações covalentes → alto valor de E, ex. Diamante ~1035 GPa

Cerâmicas policristalinas apresentam valores intermediários.

NaCl.....	44,2	Si ₃ N ₄	304
SiO ₂ fundida.....	69	Vidros em geral.....	69
MgO.....	207	Al ₂ O ₃	380
ZrO ₂	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 (ν)	Density (kg/m^3)
Aluminum oxide	Al_2O_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	SiO_2	—	1300	70	550	0.25	—
Silicon carbide	SiC	100–750	700–3500	240–480	2100–3000	0.14	3100
Silicon nitride	Si_3N_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.

Ex. 5.01. Baseado no módulo elástico porque as ferramentas cerâmicas são aplicadas em usinagens nas operações de superacabamento?



Cerâmica - tensão de ruptura

Comparações das tensões máximas teóricas e reais

Material	E E GPa	Tensão máx. teórica GPa	Medida da tensão máx. de fibras GPa	Medida da tensão máx. de amostras policristalinas GPa
Al ₂ O ₃	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.

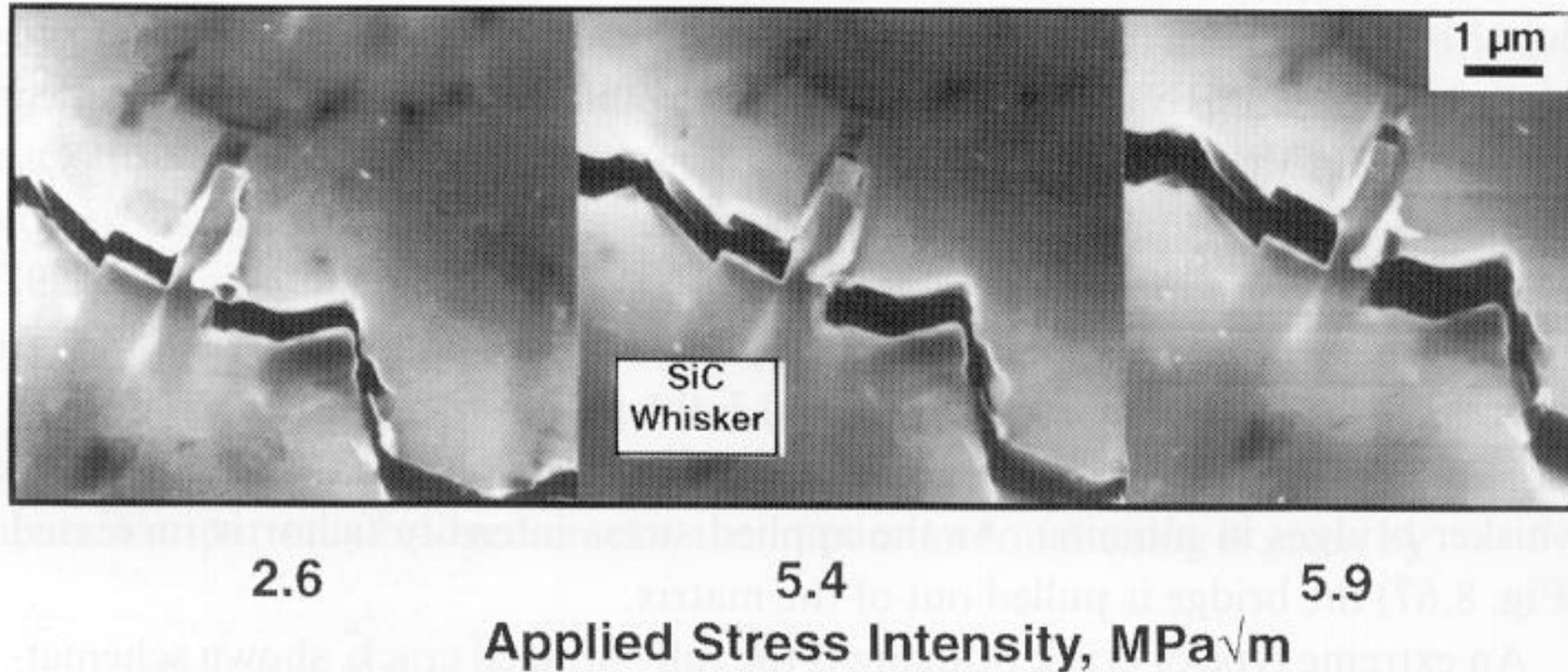


Figure 8.67 Series of scanning electron micrographs showing a silicon carbide whisker bridge being pulled out of an alumina matrix as the applied stress intensity factor is increased. (From P. Becher *et al.*, 1996, reproduced courtesy of The American Ceramic Society, Westerville, OH.)

Resistência teórica

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

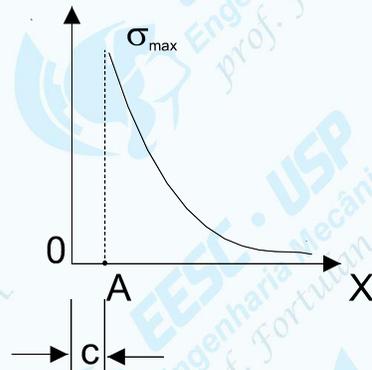
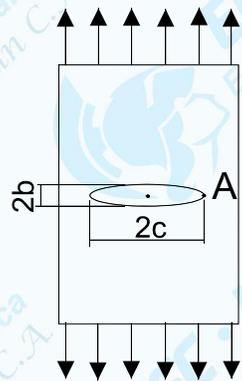
energia de fratura superficial

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

para trincas elípticas

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

ou

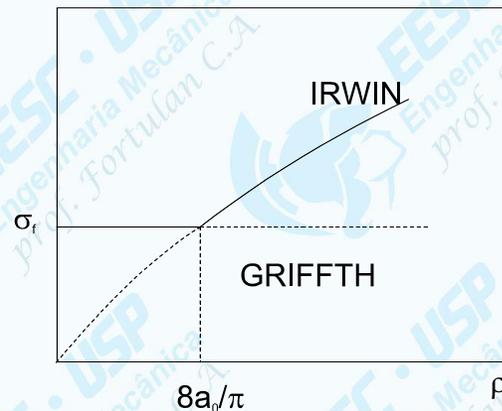
$$\sigma_f = \left(\frac{2E\gamma}{\pi c} \right)^{1/2} \approx \left(\frac{E\gamma}{c} \right)^{1/2}$$

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

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

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

$$\sigma_f = \left(\frac{E\gamma\rho}{4a_0 c} \right)^{1/2}$$



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

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 L_1 e L_2 representam comprimentos, área ou volume, $\sigma_{max} \approx 2\sigma \left(\frac{c}{\rho} \right)^{1/2}$

Ex 5-02: Na fabricação de placas de vidro são introduzidas trincas superficiais em escala atômica. (Considere que o raio da ponta das trincas sejam $\sim \propto O^{-2}$) 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)

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

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.

Dureza

Materiais

Dureza Vickers

kgf/mm²

Alumina

2370

BeO

1140

NaCl

21

Diamante

9000

Sílica fundida

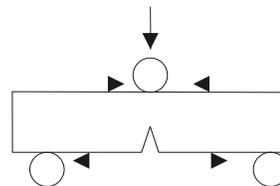
540

Tenacidade à fratura - exemplos

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

Tenacidade à fratura

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



σ_F = tensão crítica de fratura
 c = profundidade da trinca
 Y, Z = fatores geométricos

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

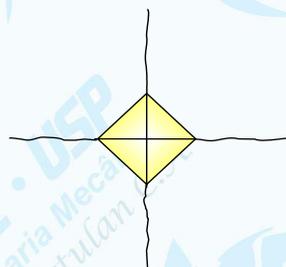
propriedade do material (γ_e)

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.

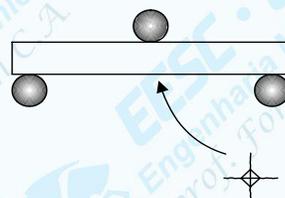
Impressão Vickers de fratura (IF)



Impressão Vickers em uma superfície polida;

Medida dos comprimentos das trincas.

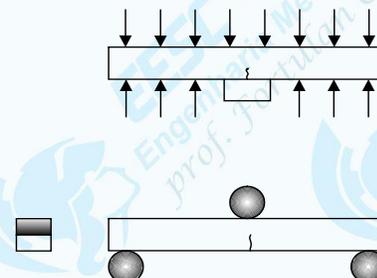
Flexão de barra impressa (IS)



Impressão Vickers de uma amostra;

Fratura da amostra por flexão.

Flexão de barra pré trincada (SEPB)

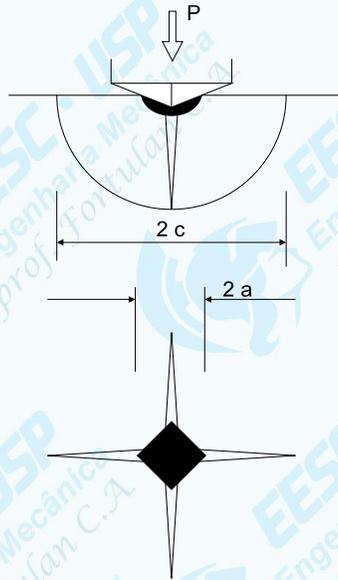


Impressão Vickers ou corte de uma amostra;

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

Fratura da amostra por flexão.

Tenacidade à fratura - indentação



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

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

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

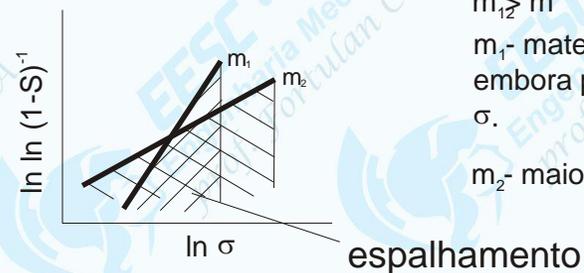
K_{IC} é a tenacidade à fratura;

E é o módulo elástico; e

σ_c é a tensão de fratura à flexão

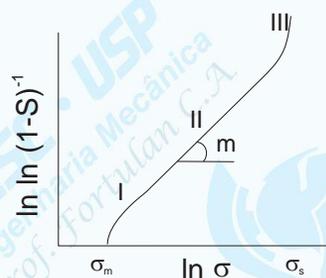
Estatística de Weibull

Resultado da função distribuição



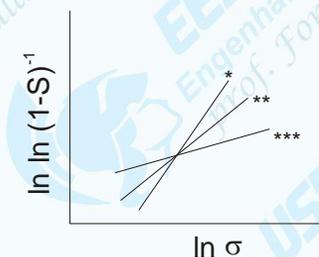
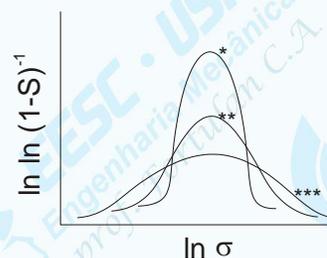
Interpretação dos valores de m

$m_1 > m_2$
 m_1 - material de maior confiabilidade embora possa apresentar o mesmo σ .
 m_2 - maior espalhamento de valores

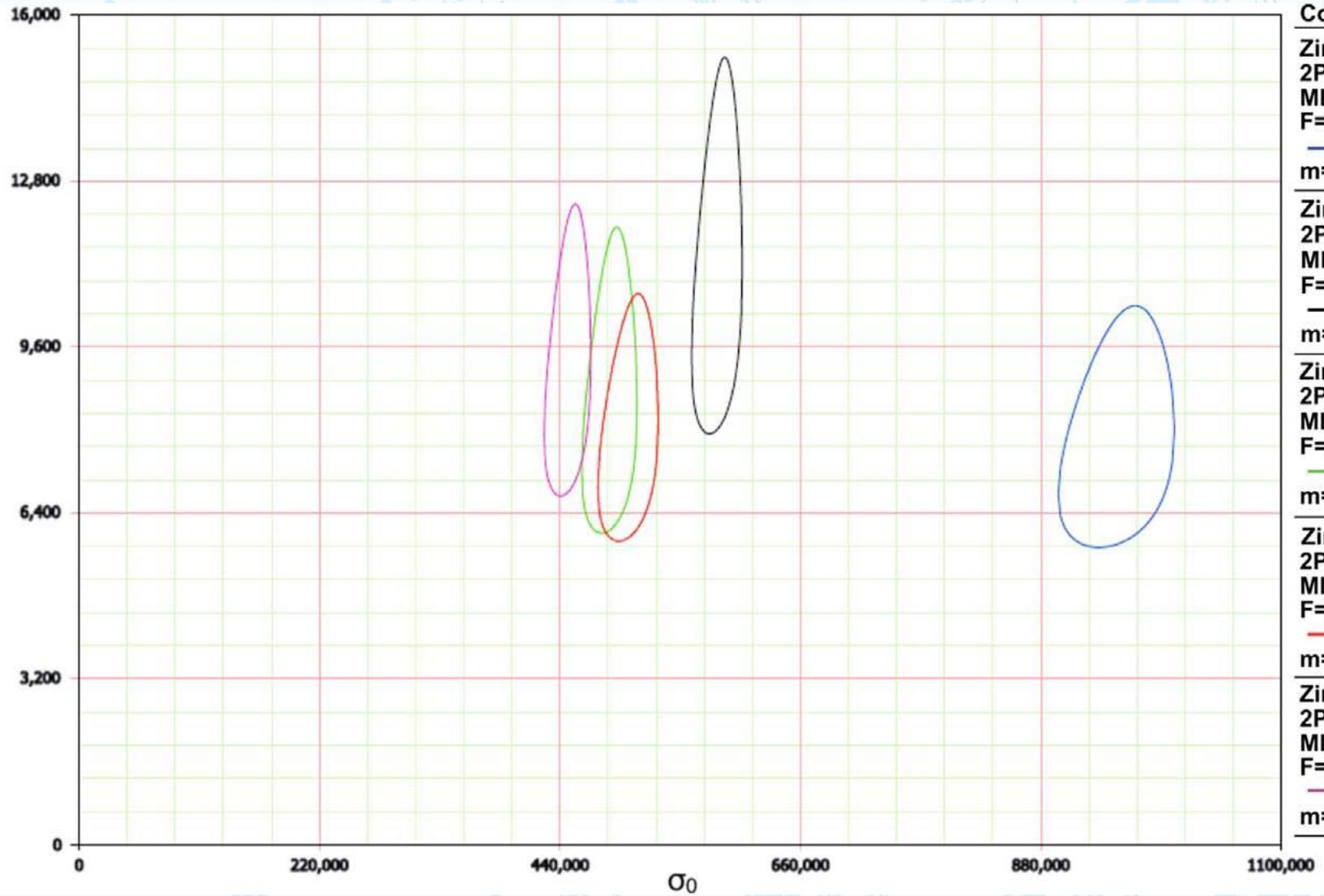
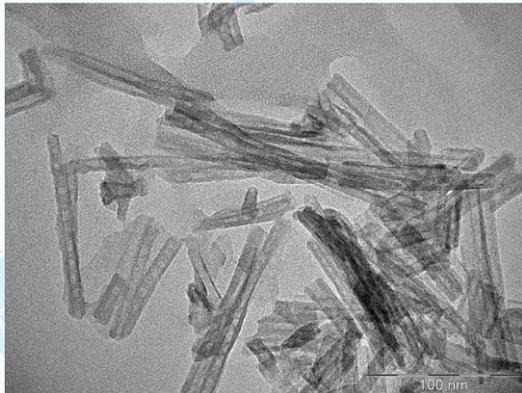


Valores de m

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



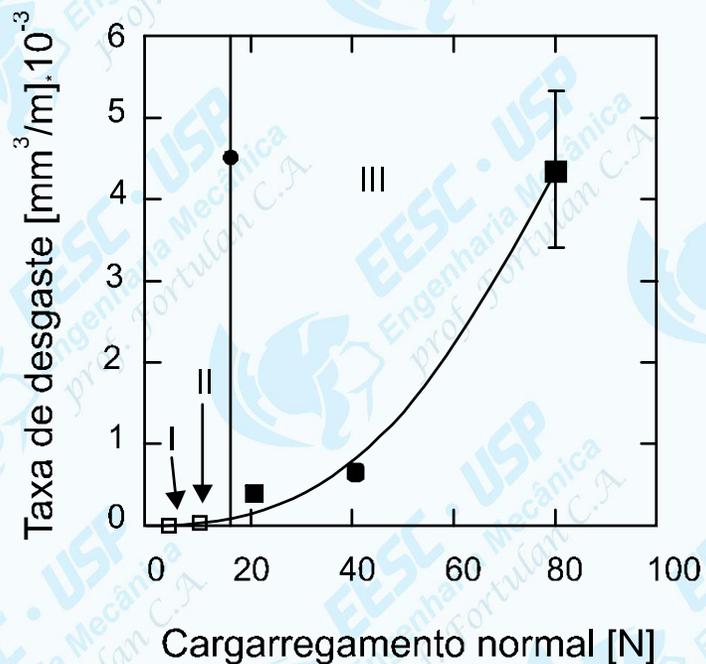
Groups	Material
ZC	Y-TZP IPS e.max Zircad
Z0	Experimental Y-TZP no TiO ₂ added
Z1	Experimental Y-TZP 1.0% in volume TiO ₂ added
Z2	Experimental Y-TZP 2.0% in volume TiO ₂ added
Z5	Experimental Y-TZP 5.0% in volume TiO ₂ added



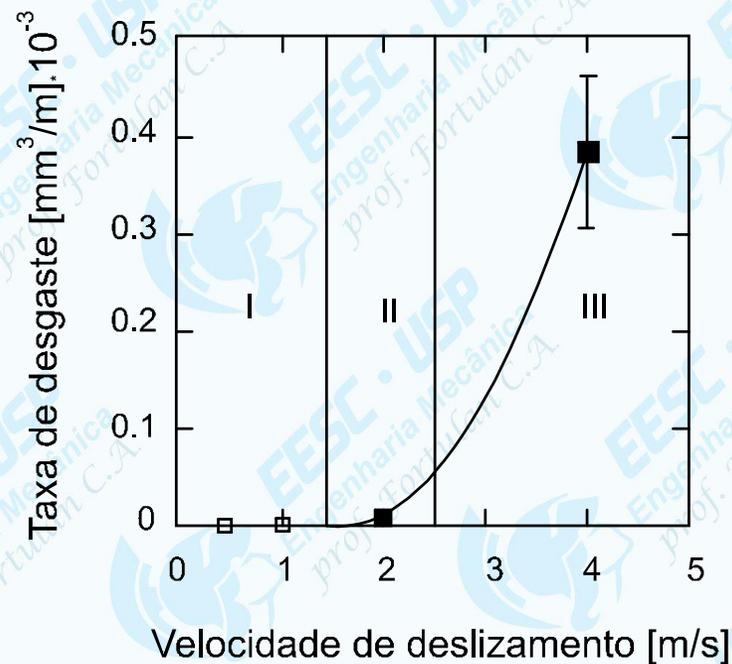
Contour	
Zir/ZC	2P-Weibull MLE SRM FM MED F=30/S=0 — 90% m= 7.9 / σ ₀ = 948.9
Zir/Z0	2P-Weibull MLE SRM FM MED F=30/S=0 — 90% m= 11.2 / σ ₀ = 583.8
Zir/Z1	2P-Weibull MLE SRM FM MED F=30/S=0 — 90% m= 8.7 / σ ₀ = 485.2
Zir/Z2	2P-Weibull MLE SRM FM MED F=30/S=0 — 90% m= 8.1 / σ ₀ = 502.3
Zir/Z5	2P-Weibull MLE SRM FM MED F=30/S=0 — 90% m= 9.3 / σ ₀ = 447.0

Borges, A. F. S., Magalhães, A. P. R., Ramos, C. M., Lisboa-Filho, P. N., Gomes, O., Fukushima, K. A., ... & Fortulan, C. A. (2017). Efeito do Processamento Cerâmico e Adição de Nanotubos de TiO₂ na Confiabilidade da Y-TZP: Análises Fractográfica e de Weibull. *Journal of Health Sciences*, 19(5), 41-41.

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;

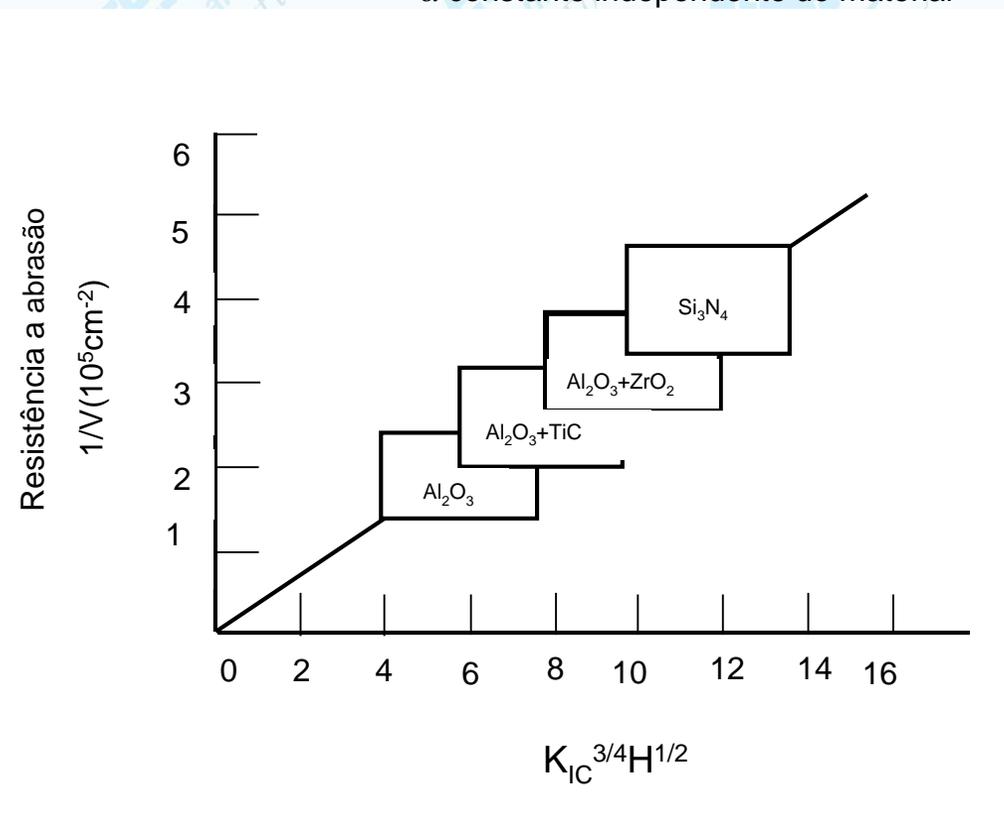
H é a dureza;

K_c tenacidade;

E módulo elástico;

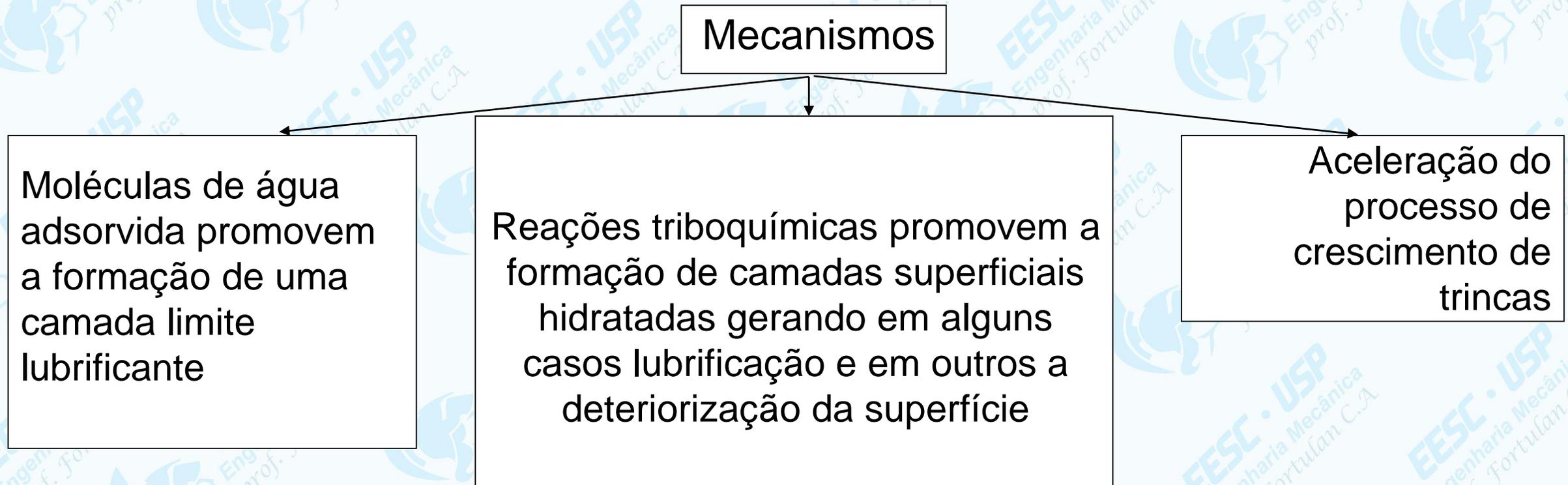
l distância percorrida; e

α constante independente do material



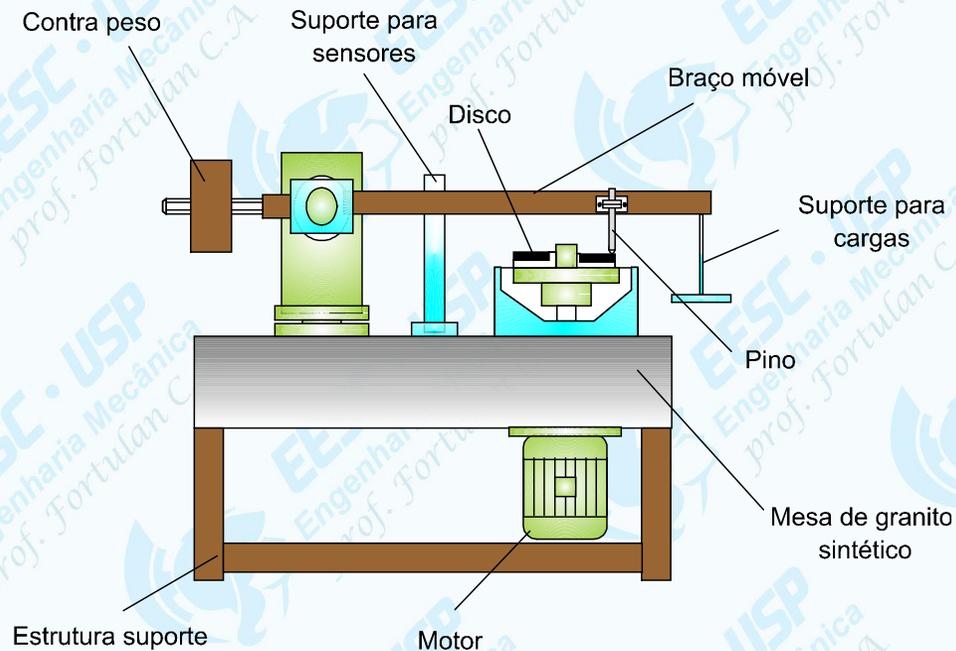
Desgaste – influência da umidade atmosférica

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

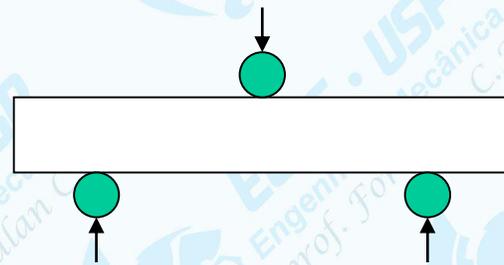
	μ
PTFE - PTFE	0,04
PTFE - AÇO	0,04
GRAFITE - GRAFITE	0,1
GRAFITE - AÇO	0,1
POLIETILENO-POLIETILENO	0,2
NYLON - NYLON	0,2
POLIETILENO - AÇO	0,2
CROMO - CROMO	0,4
AÇO - AÇO	0,8
VIDRO - AÇO	0,6
VIDRO - VIDRO	0,6
ALUMINA - ALUMINA *	0,5 - 0,7

Ensaio de compressão

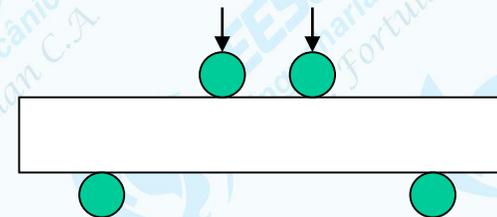


Resistência à Flexão

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.

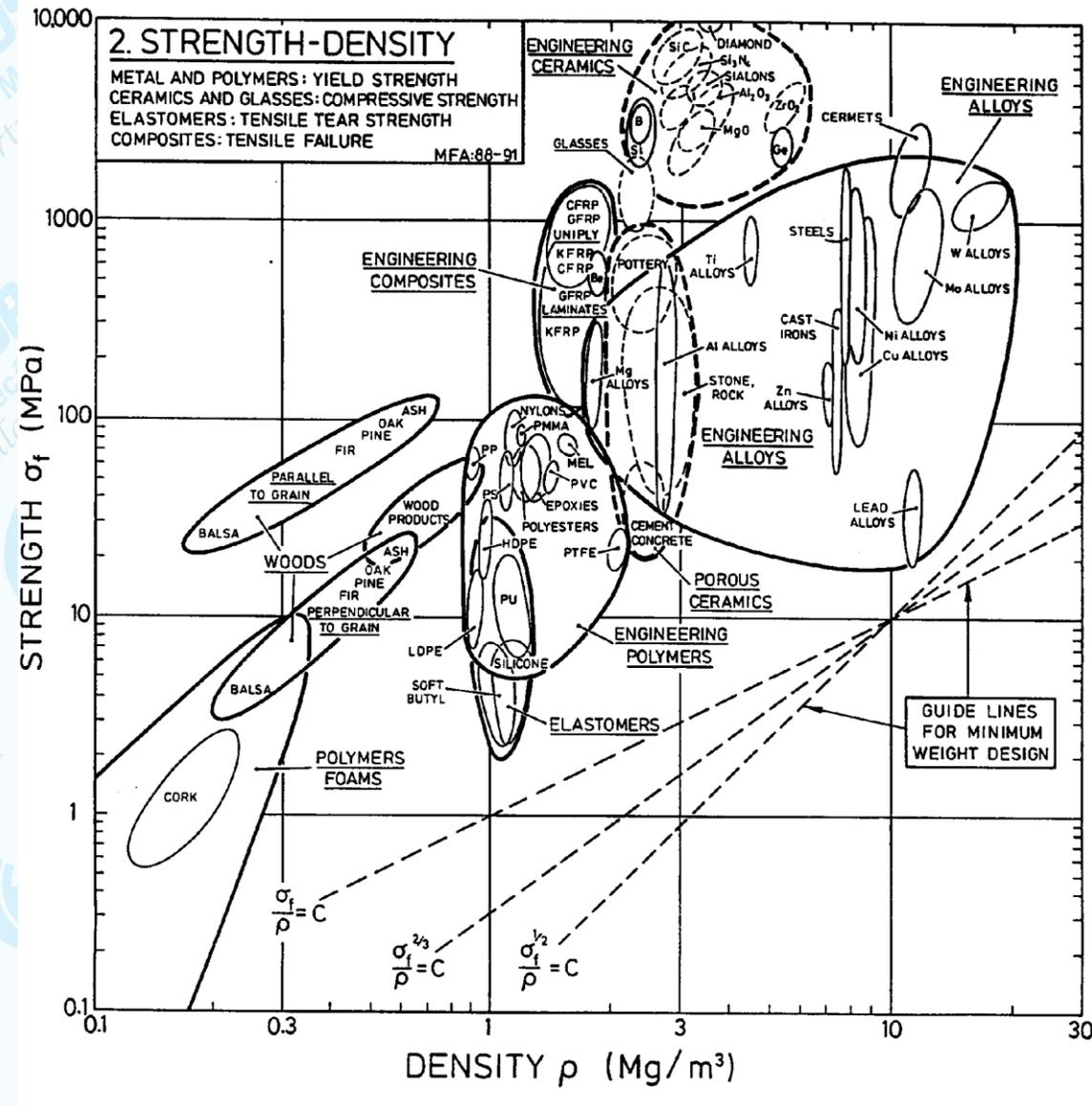


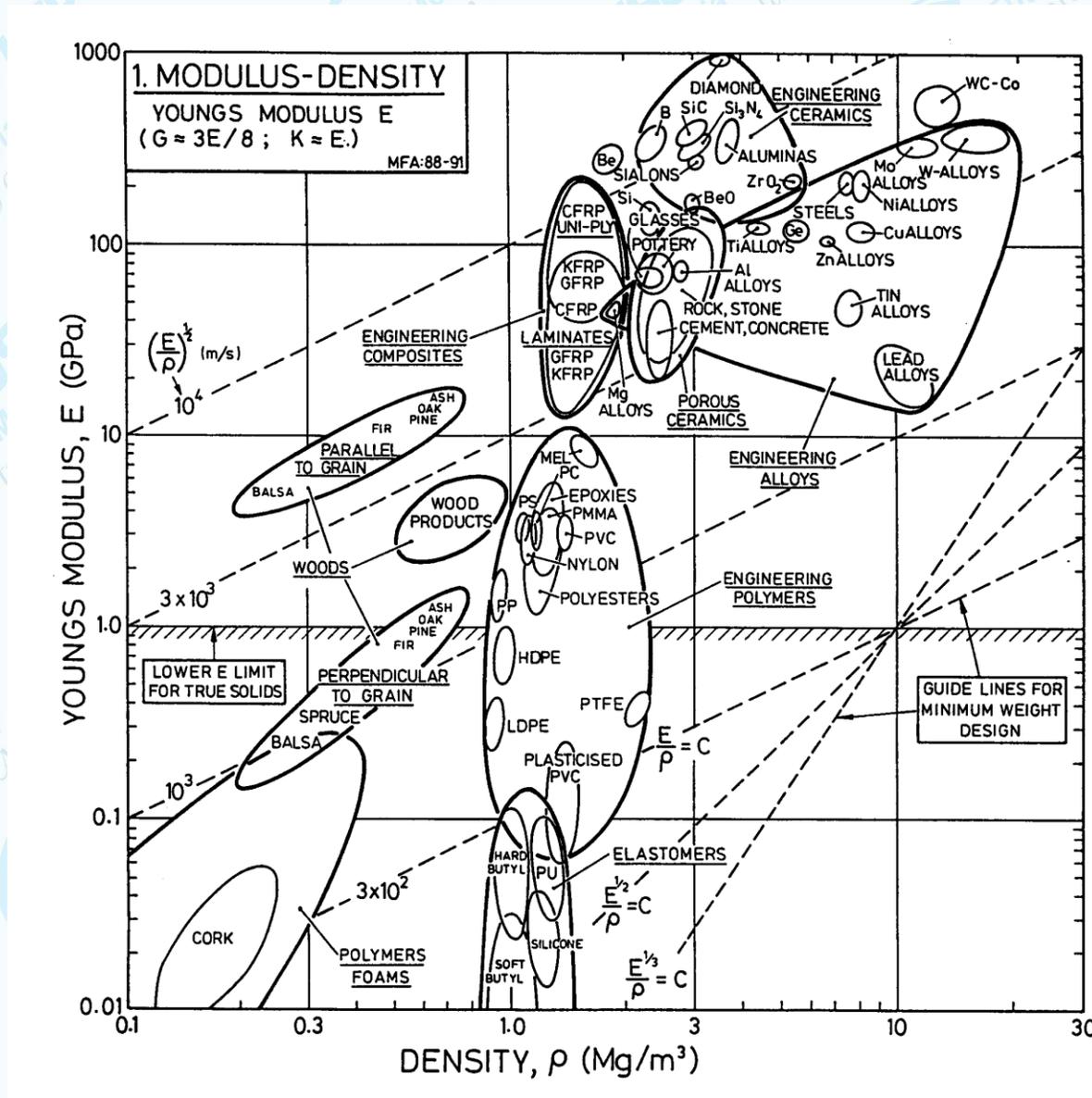
Flexão 3 pontos



Flexão 4 pontos

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



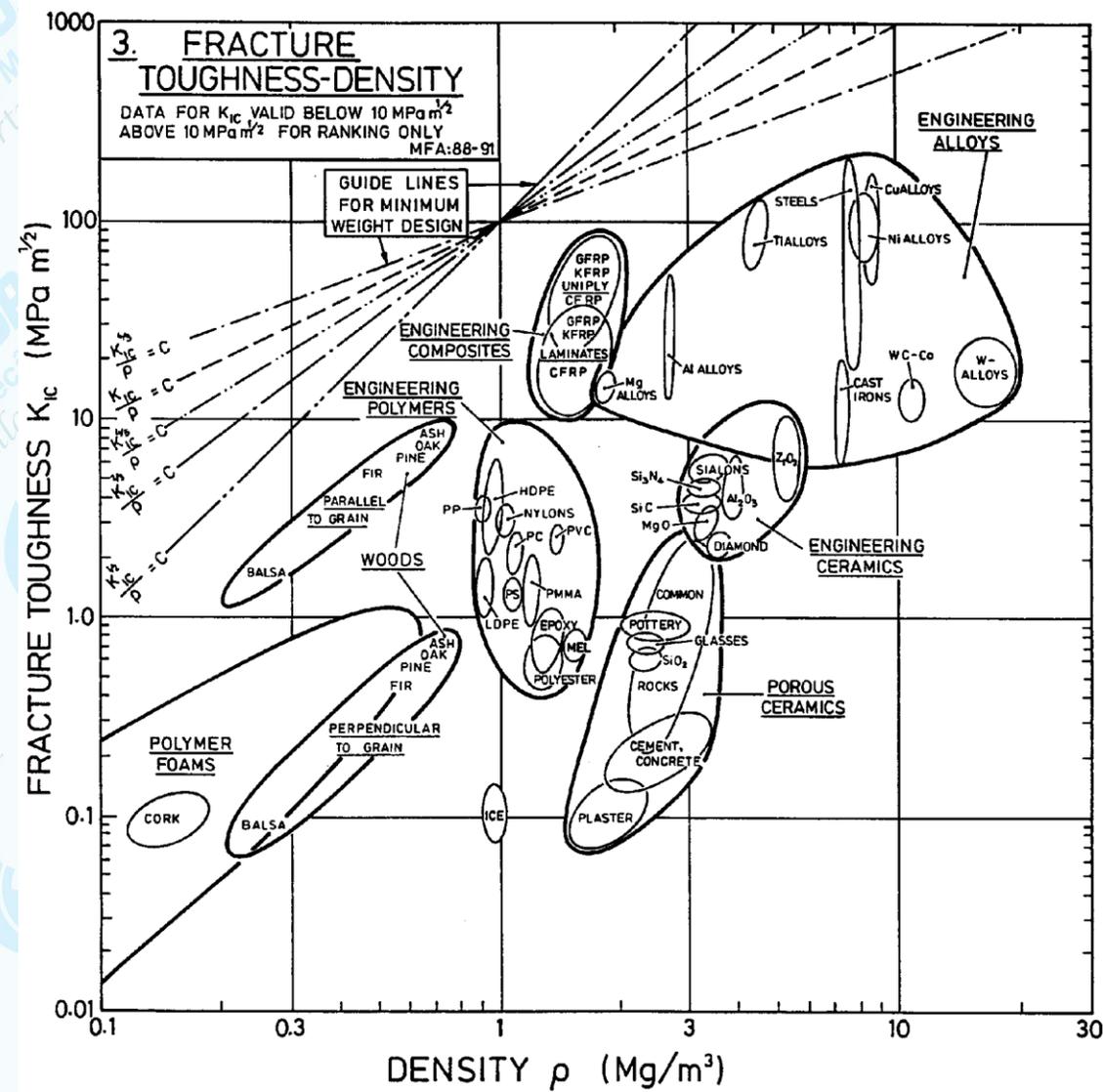


Coeficiente de Poisson

Para cerâmicas monocristalinas e policristalinas

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

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



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 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 ΔT K ($^{\circ}$ C) causa a deformação expressa por:

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

α = coeficiente de expansão térmica

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

Al₂O₃ 99,9%

20-400 $^{\circ}$ C

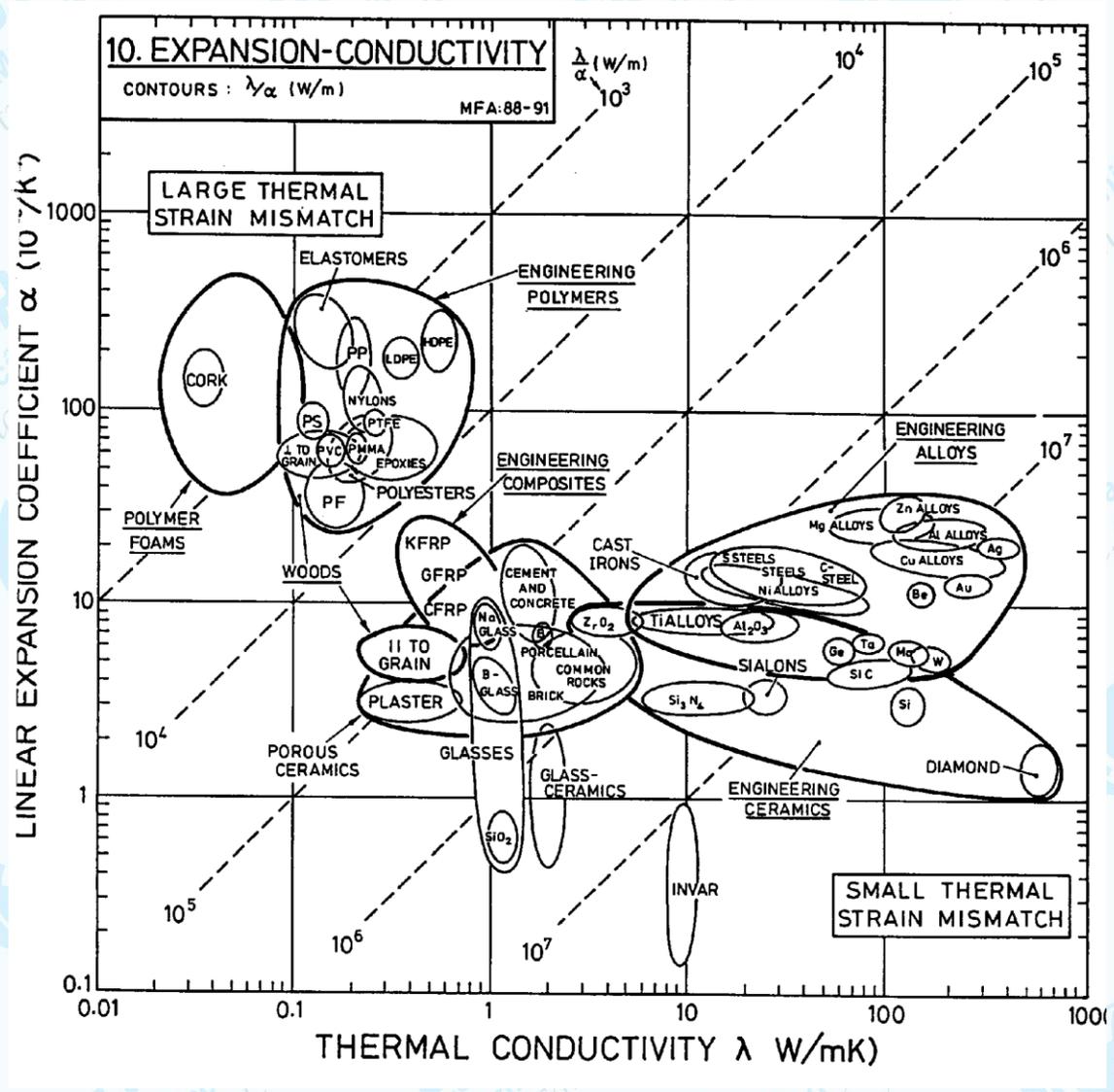
7,4x10⁻⁶ m/m. $^{\circ}$ C

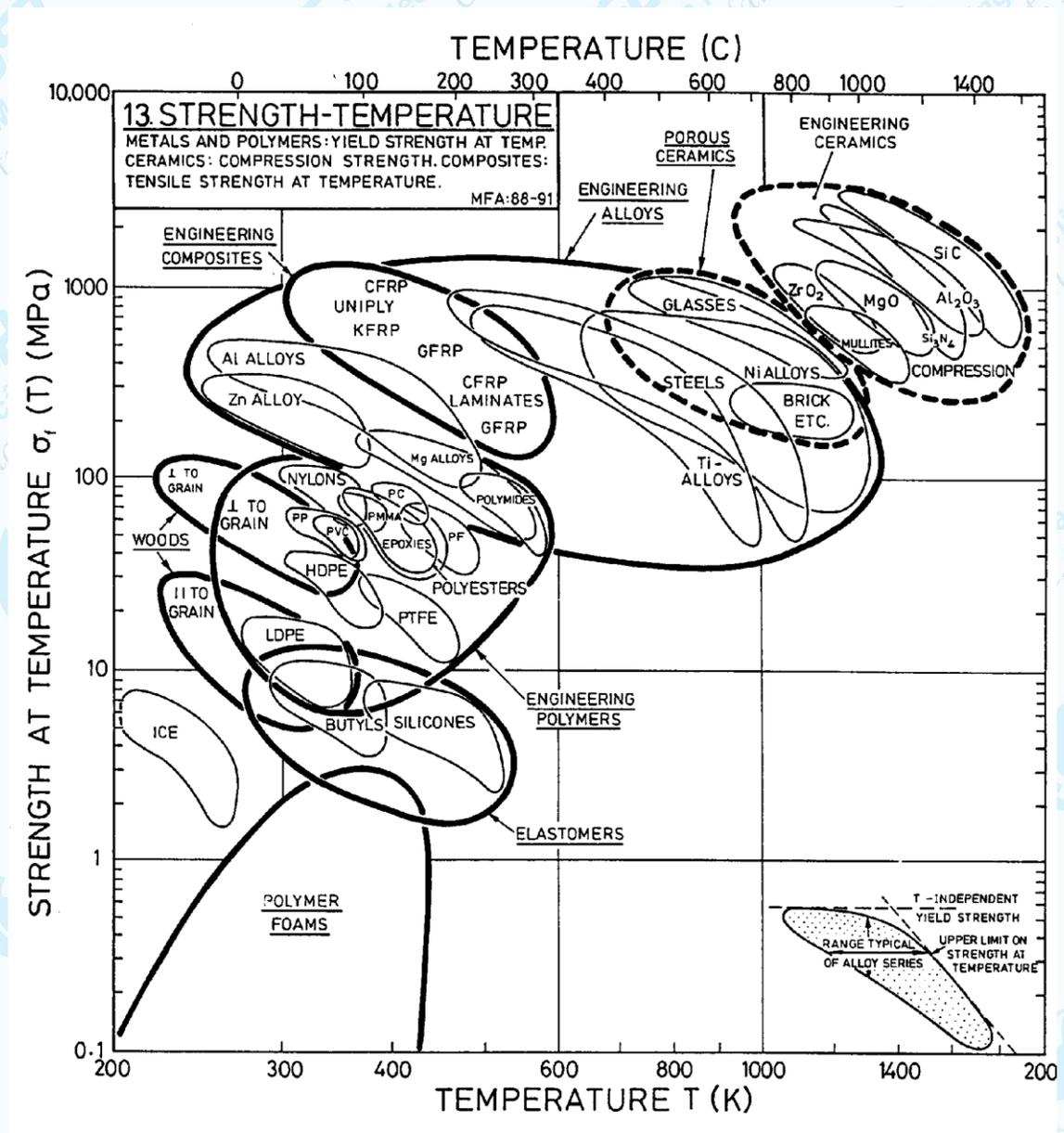
Ex. 5.03. Porque os blocos padrões cerâmicas são escolhidos para calibração de equipamentos de medidas em relação os metálicos? Envolve os seguintes propriedades:

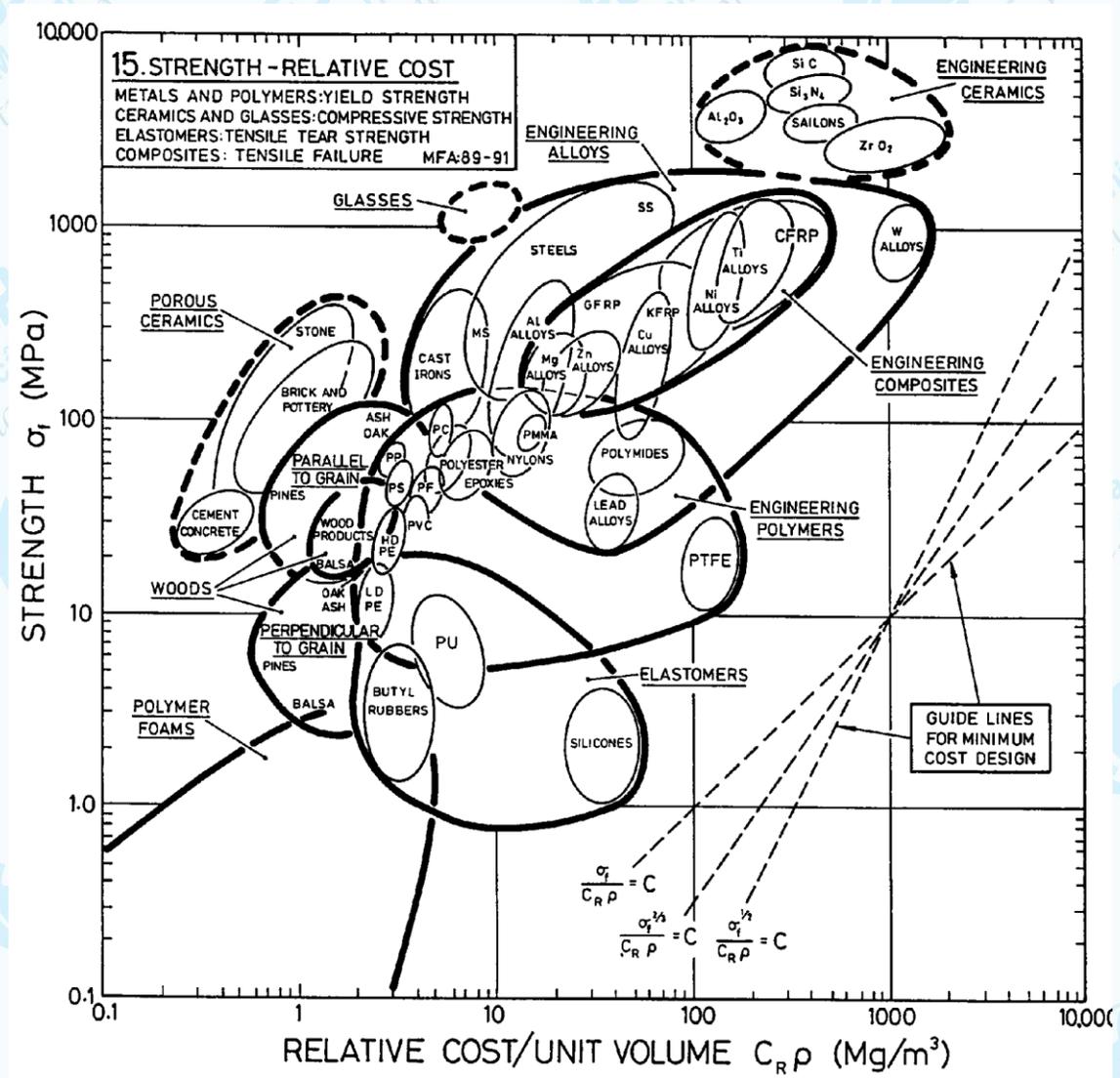
- a) Expansão térmica;
- b) Dureza;
- c) Tenacidade a fratura;
- d) Rigidez;



Ceramic gauge block



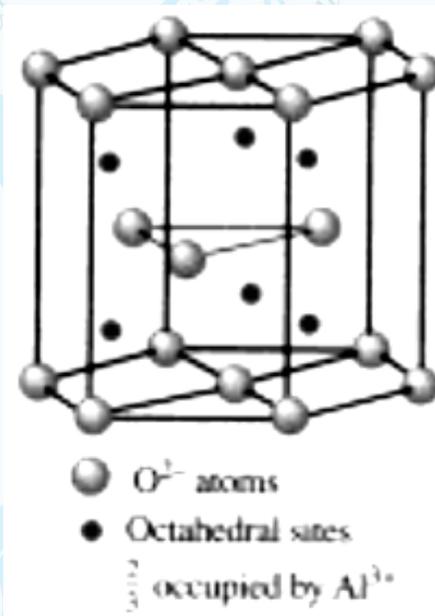




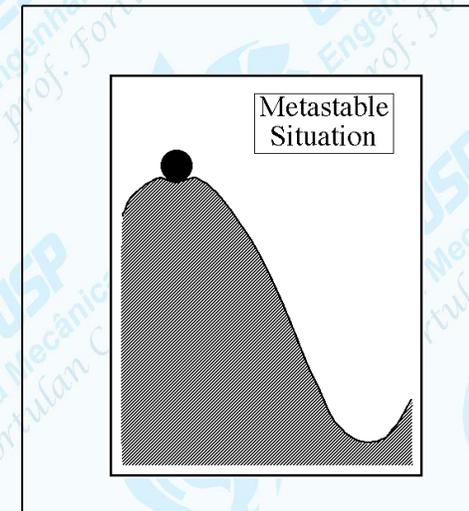
ALGUMAS CERÂMICAS

Alumina (Al_2O_3)

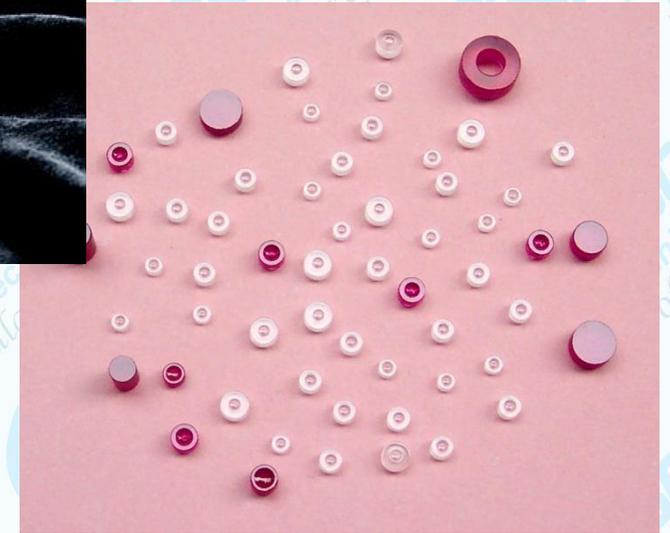
- ✓ Trata-se de uma cerâmica considerada UNIVERSAL
- ✓ Tem várias fases cristalográficas, mas exceto a α , todas são fases metaestáveis



Al_2O_3 - α Célula unitária: hexagonal compacta



O óxido de alumínio, alumina - α 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/rMbJqTQdblWS/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.



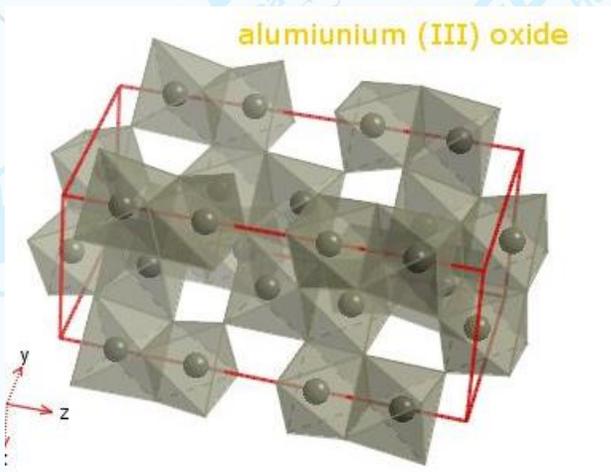
Engine ruby watch



Hydrocephalus shunt valve

<https://www.rodriangel.com/sophysa-valvula-polaris.html>

Alumina- α



Octaedro
NC=6

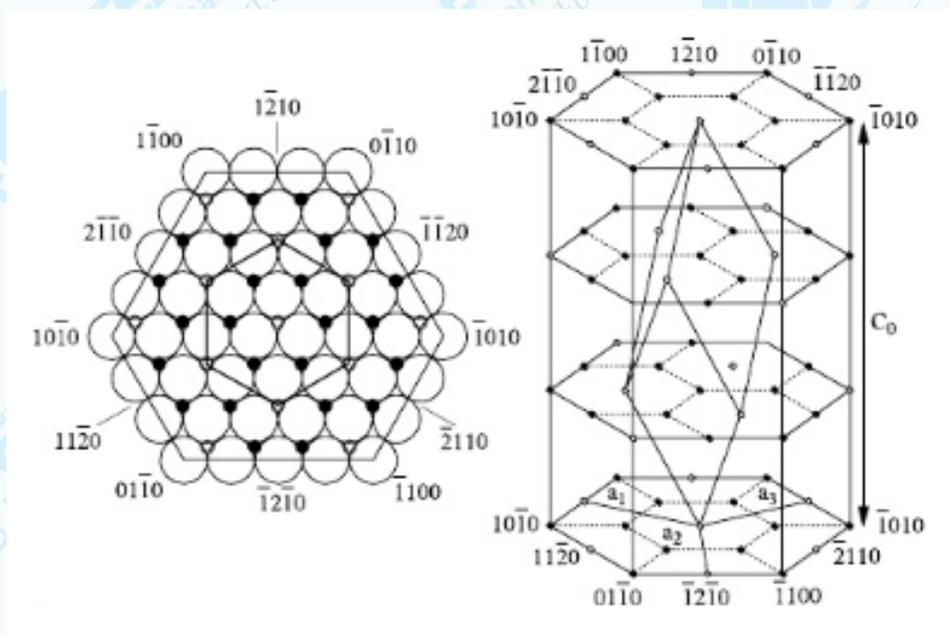
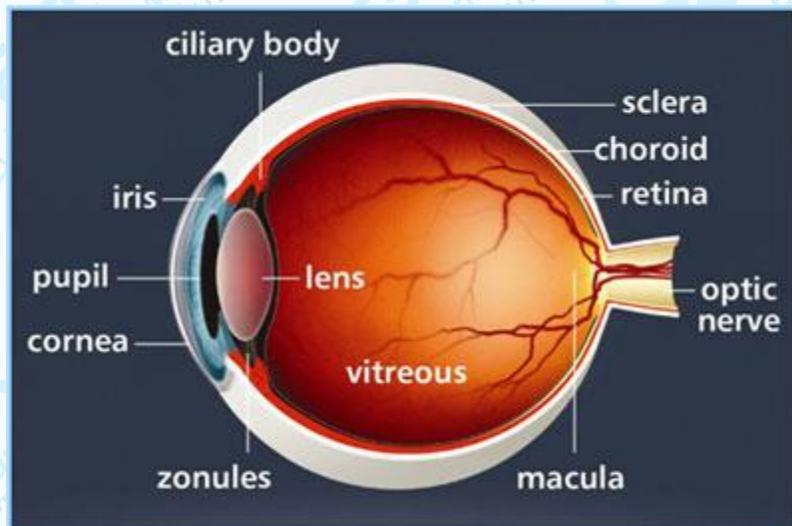


Figure 6.1. Structure of α alumina. On the left, seen in the base plan: the large circles represent the anions, the small full circles the cations, the small empty circles the vacant octahedral interstices. On the right, the view of the cation sublattice: the full circles represent the full cations and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

Boch, et al. 2007, pp201

Safira – monocristais de α -alumina



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



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

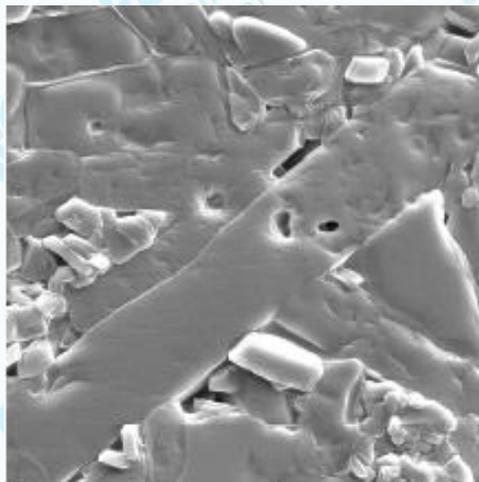
Alumina

- ✓ 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;
- ✓ $< 0.1\%$ SiO₂ + oxides alcalinos: Eles promovem o crescimento de grão;
- ✓ Resistência Mecânica, resistência a fadiga, resistência a fratura e tenacidade de fratura = $f(\text{pureza, tamanho de grão, densidade})$

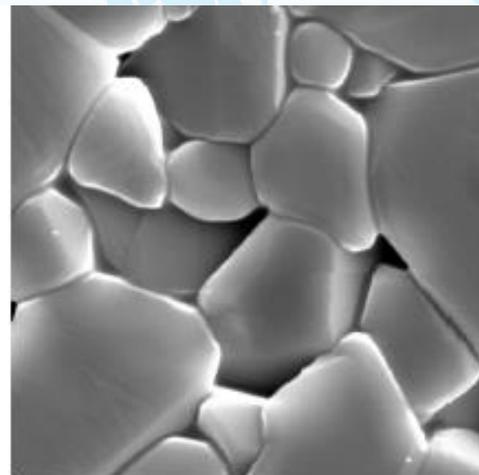
Tribologia (Atrito e desgaste)

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

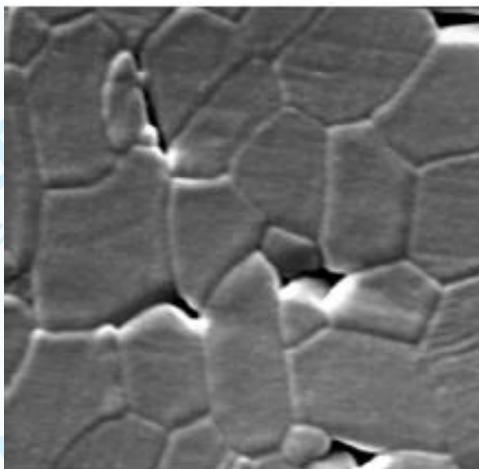
Microestrutura



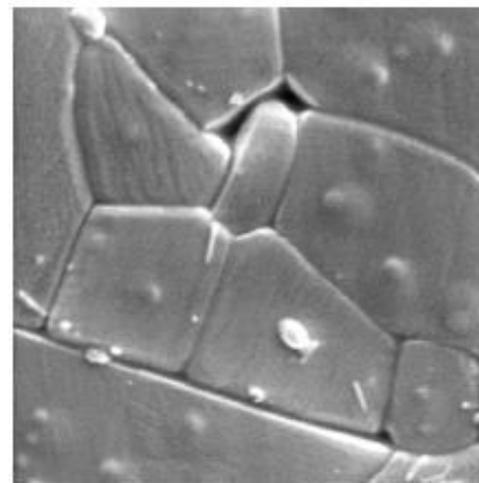
Alumina 96% - Alumina Técnica Comercial



Alumina 99 - Obtida por Injeção



Alumina 99,9 - Dureza, Inércia Química



Alumina 99 - Obtida por Prensagem Isostática

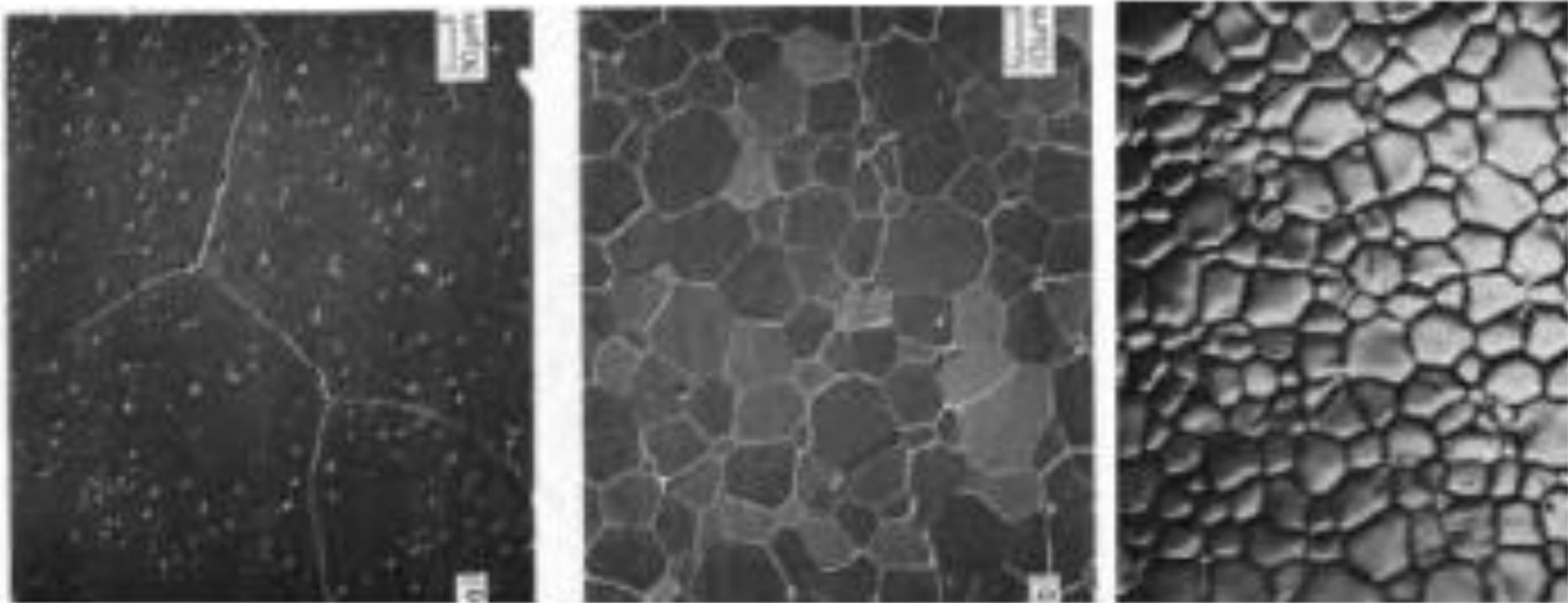


Figure 6.3. *Microstructures of sintered aluminas: on the left "pure" Al_2O_3 ; in the middle and right, Al_2O_3 doped with ≈ 500 ppm MgO [RHO 91]*

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

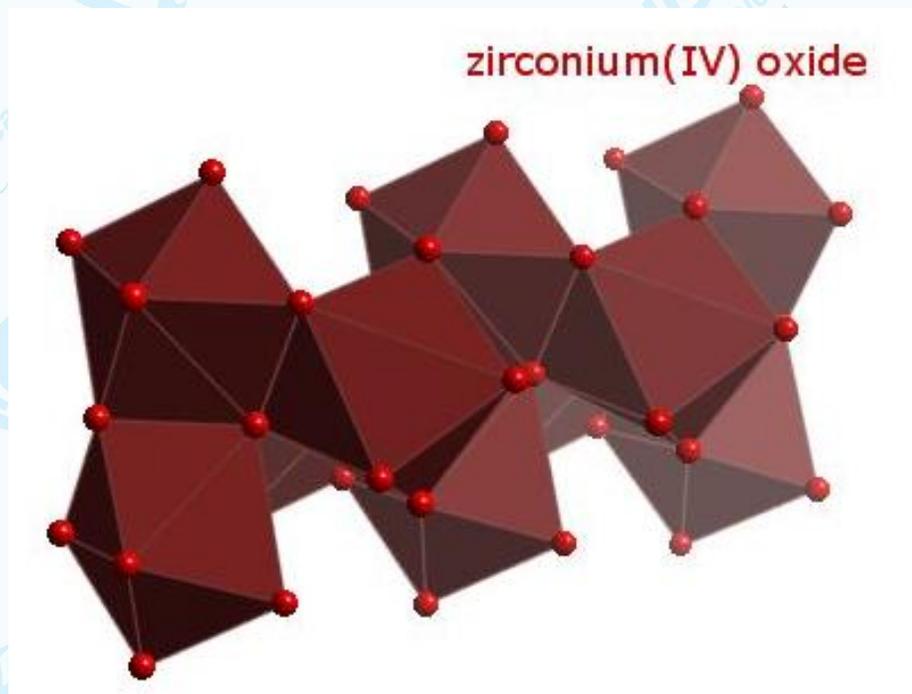
[KARIHALOO et al. (1996); MACDONALD (1987), SUBBARAO (1981)].

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)

Zircônia

- ✓ Inércia devido a estabilidade termodinâmica;
- ✓ Prensada em sinterizada ~ 1400°C;
- ✓ Menor módulo elástico comparada com Alumina
- ✓ Bola de articulação em prótese total de quadril

Zircônia



MECANISMOS DE REFORÇO

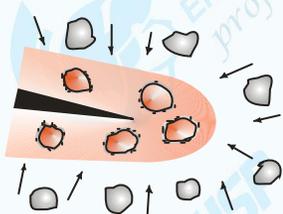
- Intrínseco
- Extrínseco

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

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

Crack bridging

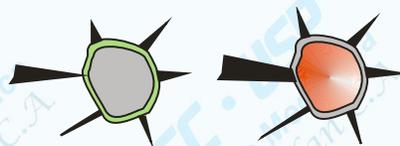
Reforço por transformação



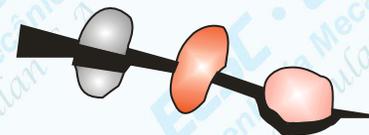
Atrito de deslocamento



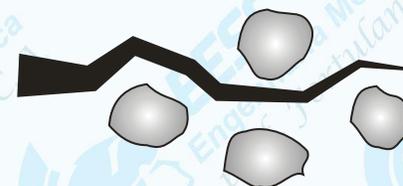
Reforço por microtrincamento



Reforço ponte



Deflexão e ziz-zag do trincamento



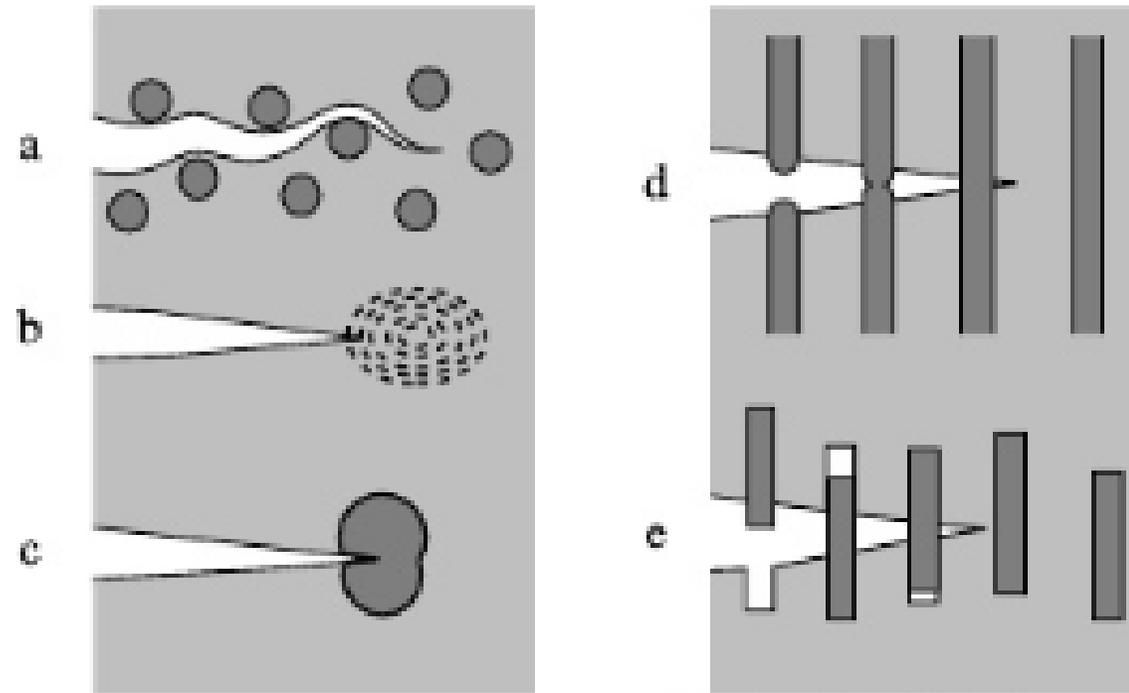
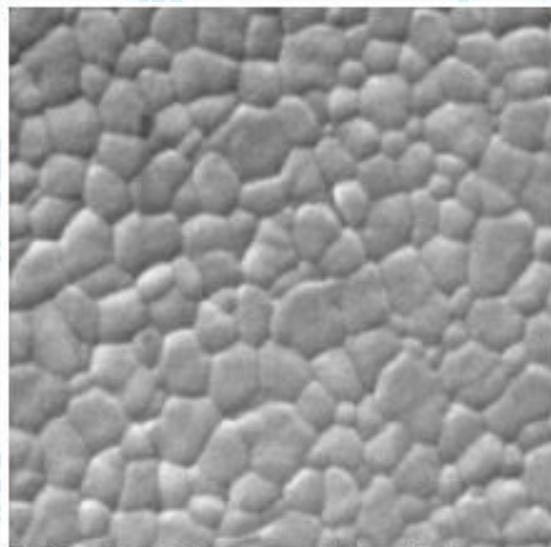
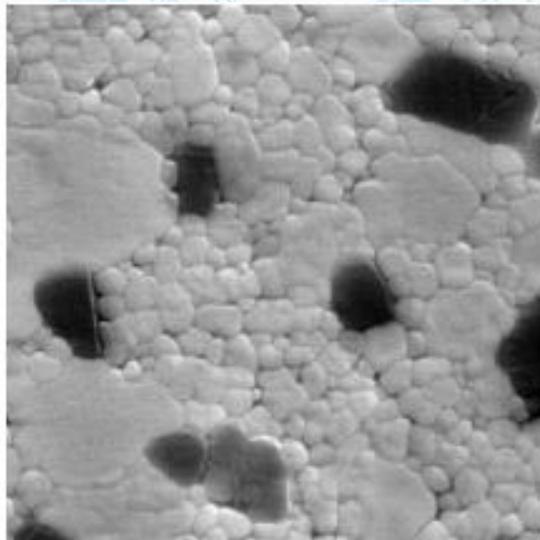


Figure 8.7. Types of microstructures producing R-curve effect: a) dispersion of hard particles; b) microstructure causing multicroacking; c) phase transformation inducing compressive stresses at crack tip (case of partially stabilized zirconia); d) reinforcement of the matrix by ductile fibers and e)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

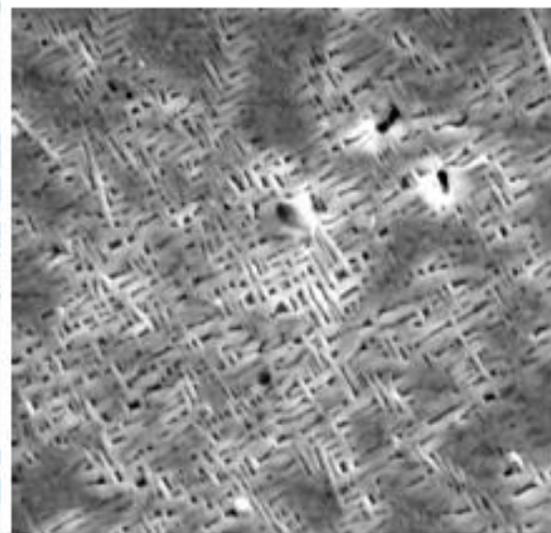
Zircônia



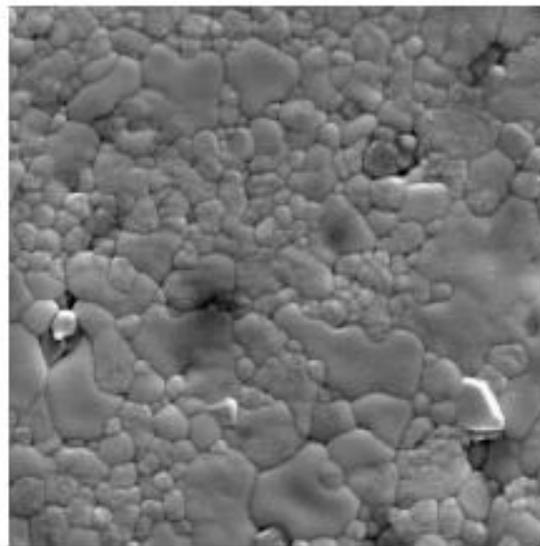
Zircônia 3Y ~ 100% tetragonal - Tenacidade



Zircônia 8Y - para sensor Lâmbda - Choque Térmico

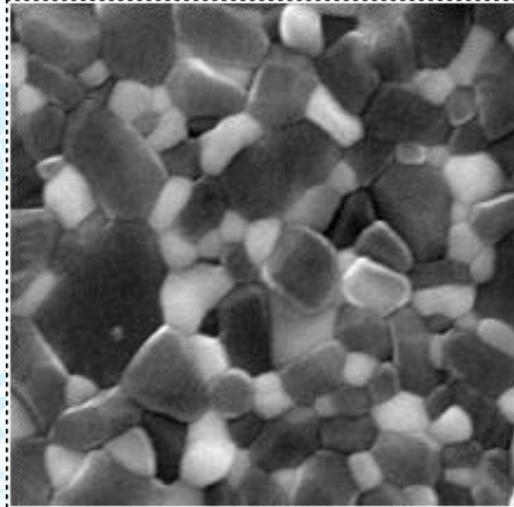


Zircônia - sensor de oxigênio - Siderurgia
Choque Térmico

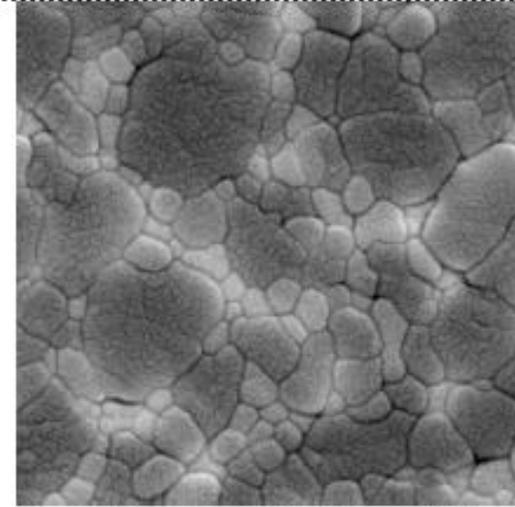


Zircônia 8Y - Sensor de Oxigênio - Sonda Lambda

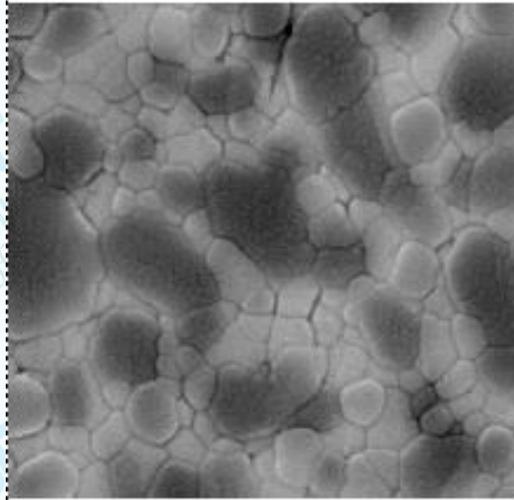
ATZ



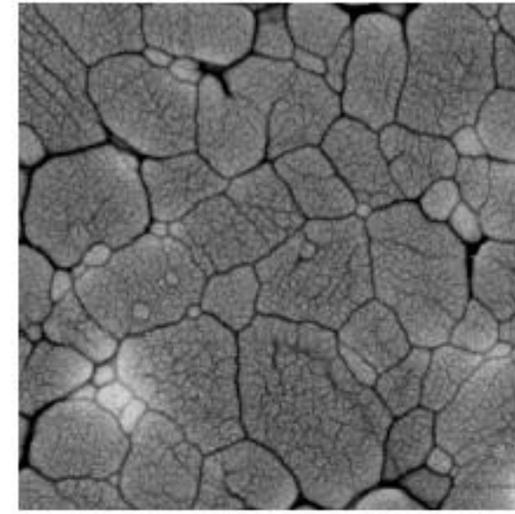
Alumina Reforçada com Zircônia Monoclínica - Tenacidade



Alumina Reforçada com Zircônia Tetragonal (3Y)



Alumina/Zircônia (ZrO₂ (3Y)) 50% \times 50%



Alumina Reforçada com t-ZrO₂ (3Y)

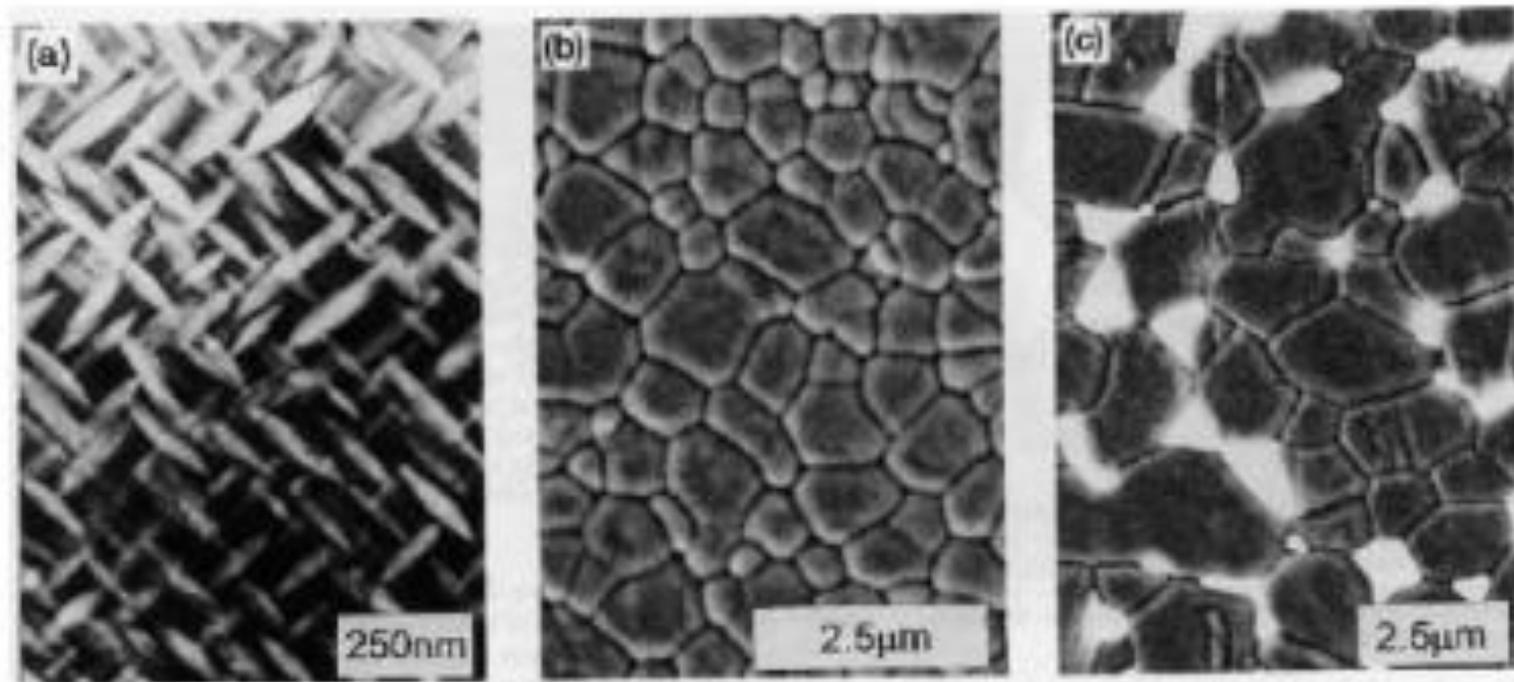
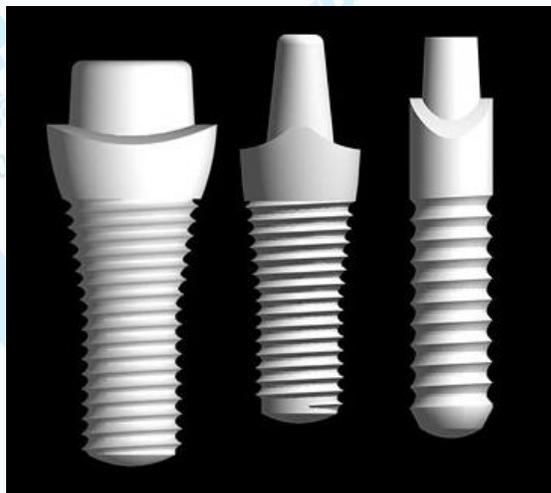
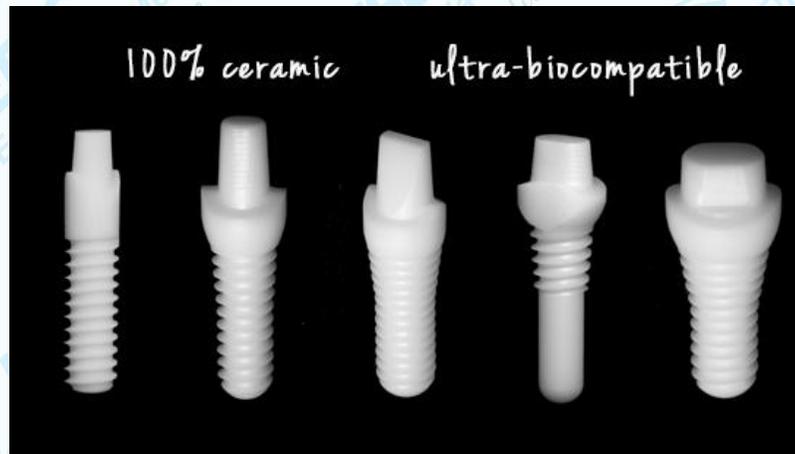


Figure 6.8. Typical microstructures of three materials toughened by zirconia: (a) Mg-PSZ, (b) Y-TZP, (c) ZTA. The transformable precipitates in Mg-PSZ are lenticular in form; TZP is monophased, with very fine grains [HAN 00]



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



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



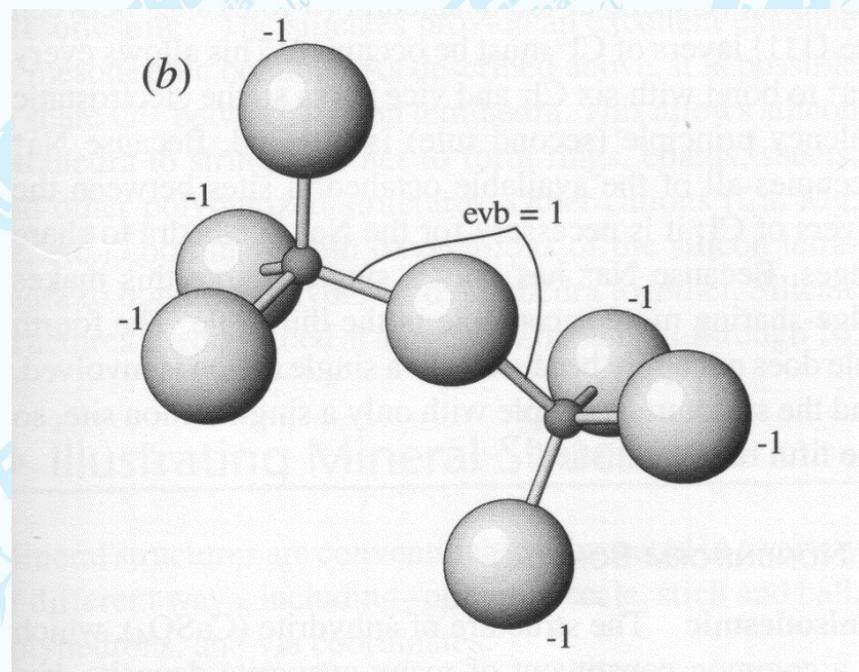
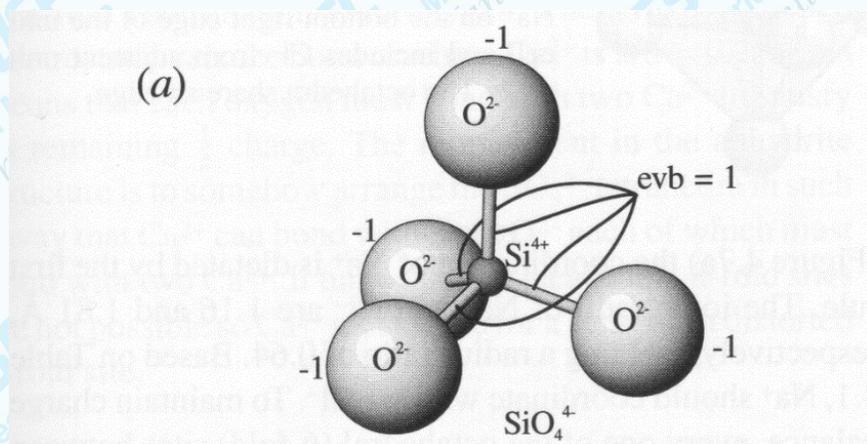
<http://www.z-systems.biz/index.php?id=119>
02/10/2008



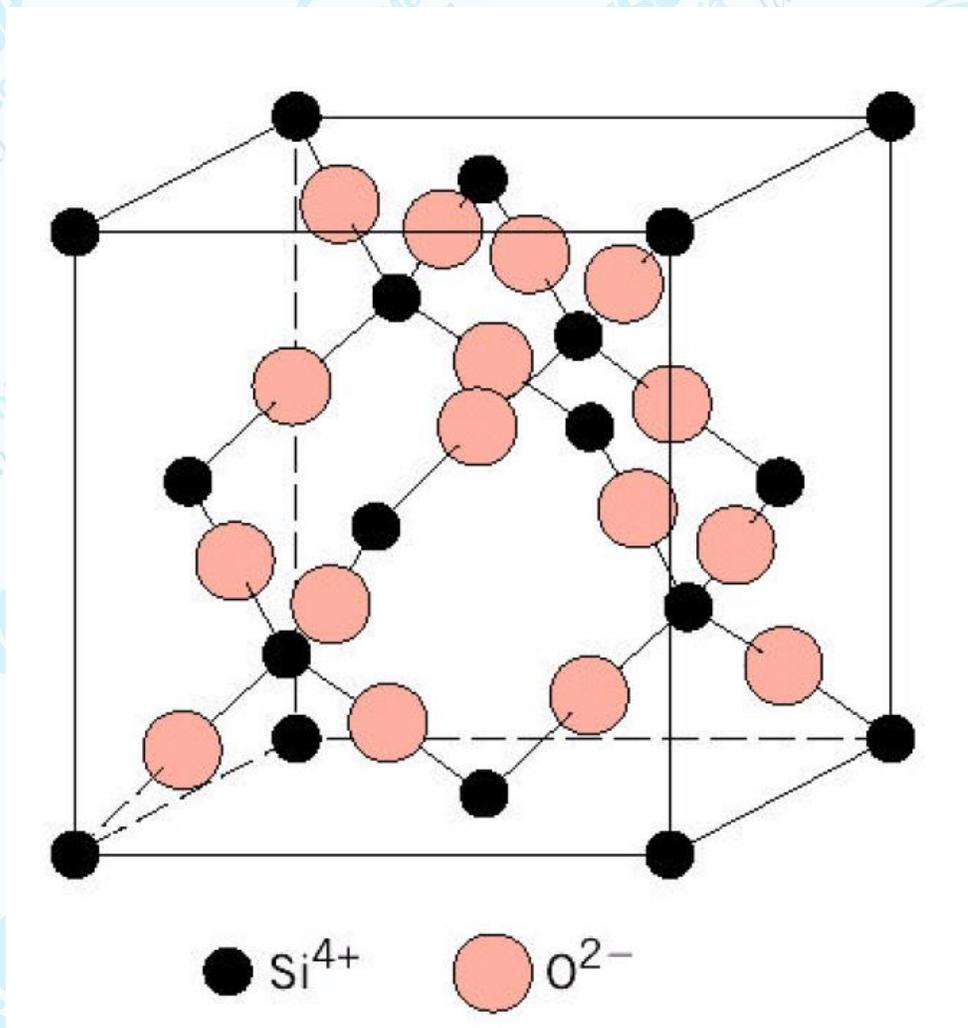
Time for zirconia
Metal-free dental aesthetics with Z-Systems

Sílica - 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);



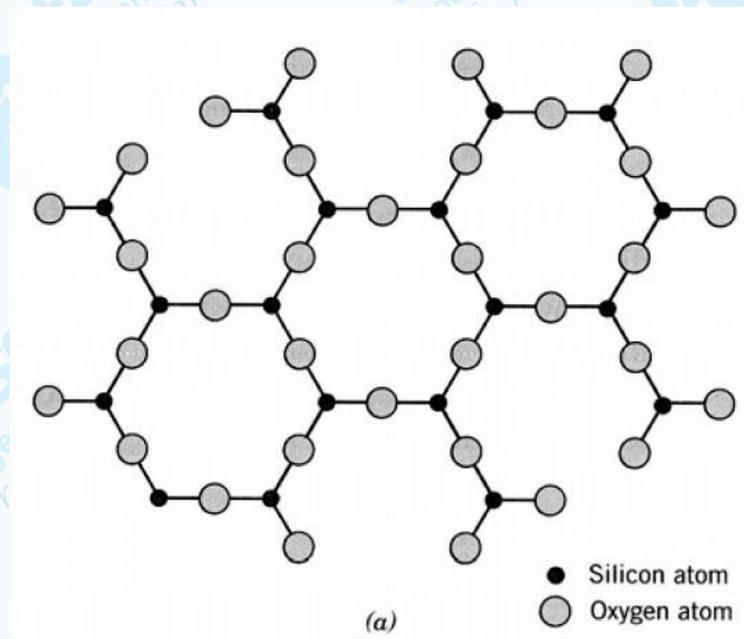
Polimorfismo do SiO_2 - α quartzo, β quartzo, α e β tridimita, cristobalita, coesita, e stishovita



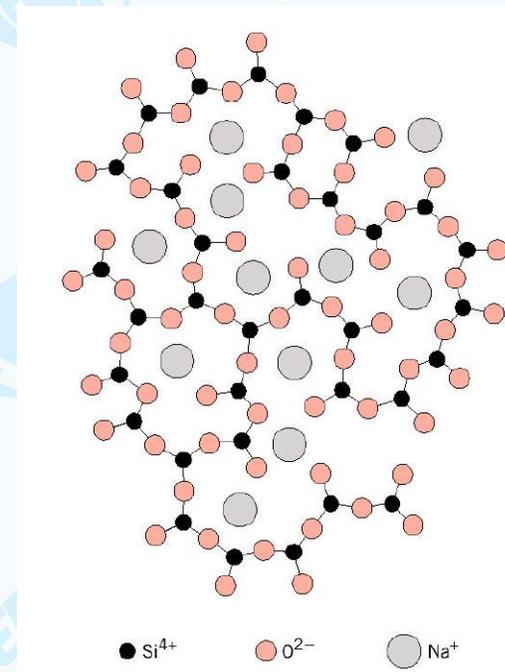
Rede 3D da SiO₄ tetraédrica da cristobalita, elevada temperatura de fusão - 1710 °C

Vidro de janela

A maioria dos vidros de janela são produzidos pela adição de outros óxidos (ex: CaO , Na_2O) dos quais seus cátions são incorporados na rede 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 (TiO_2 , Al_2O_3) substituem o silício e tornam-se parte da rede.

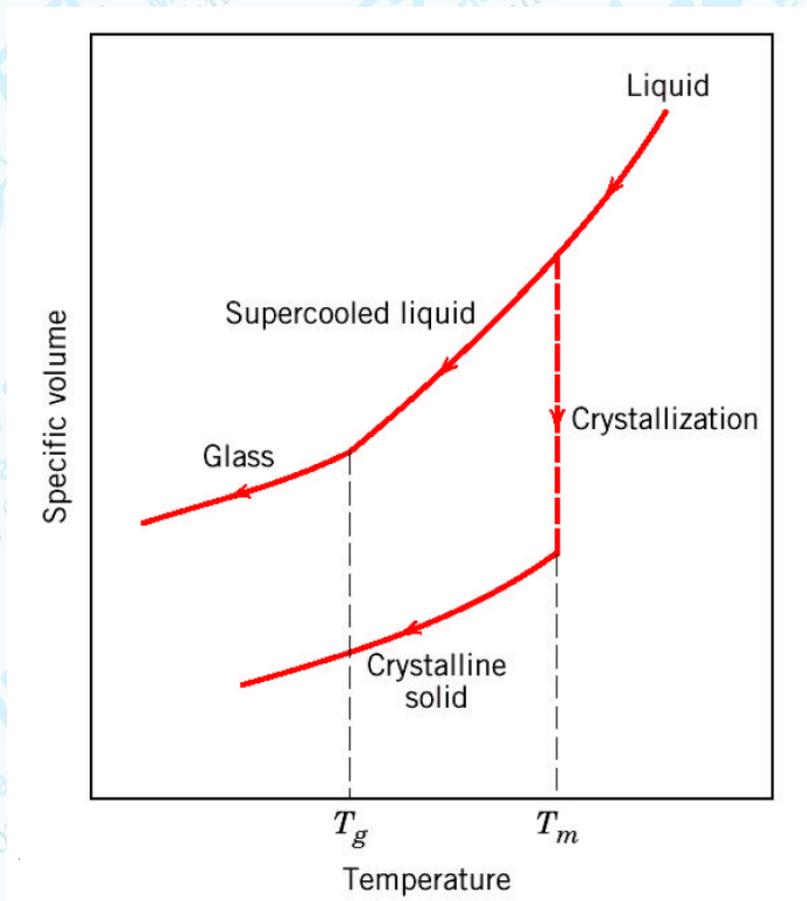


SiO_2 - cristalina



Estrutura com modificada com Na^+

Resfriamento de vidros



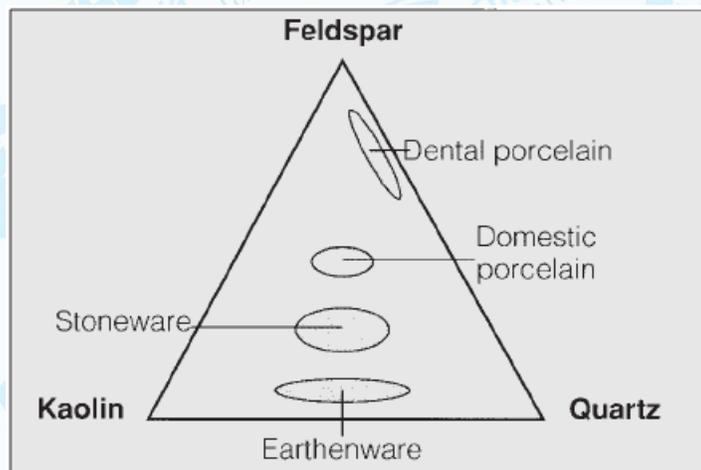
Tratamento térmico de vidros:

- ✓ recozimento;
- ✓ têmpera

Assinale a alternativa correta quanto a vidros temperados.

- (A) O vidro temperado apresenta maior resistência a choques térmicos do que os vidros comuns devido ao fato de ser produzido por resfriamento rápido. O resfriamento rápido gera tensões residuais de tração na superfície, que são anuladas pela dilatação diferente do núcleo, garantindo maior resistência.
- (B) O vidro temperado apresenta maior resistência à tração do que os vidros comuns. O resfriamento rápido gera tensões residuais de compressão na superfície, que precisam ser anuladas pelos esforços externos de tração, aumentando sua resistência.
- (C) O vidro temperado apresenta maior resistência à compressão do que os vidros comuns. O núcleo submetido a tensões residuais de tração é o local onde as trincas se iniciam sob esforços compressivos, e as tensões residuais precisam ser anuladas pelas tensões externas aplicadas.
- (D) O vidro temperado apresenta maior resistência a choques térmicos do que os vidros comuns devido à sua composição química e ao resfriamento rápido. O resfriamento rápido gera regiões com flutuações de composição química, que dilatam de maneira diferente, compensando a diferença de dilatação entre superfície e núcleo.
- (E) O vidro temperado tem tensões residuais variáveis na superfície, alternando regiões com tensões de tração e tensões de compressão. Essa variação de tensões residuais é a causa pela qual o vidro temperado tem maior resistência à flexão do que os vidros comuns.

PORCELANA DENTÁRIA



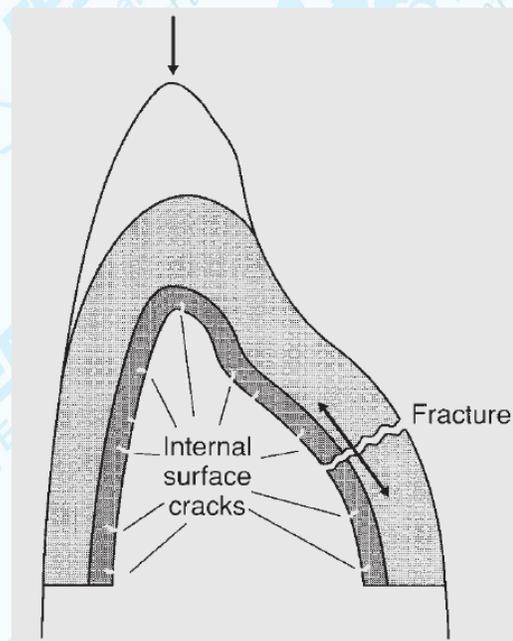
<i>Material</i>	<i>wt %</i>
Silica	63
Alumina	17
Boric oxide	7
Potash (K ₂ O)	7
Soda (Na ₂ O)	4
Other oxides	2

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

PROPRIEDADES

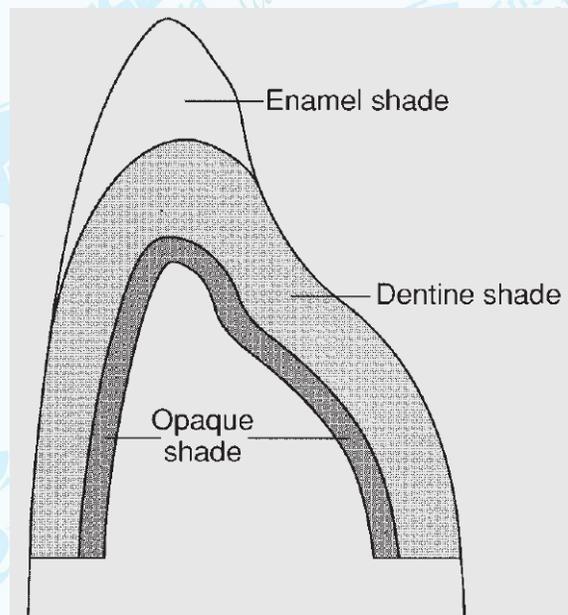
- ✓ estável quimicamente;
- ✓ estética (brilhante e vítrea) e não deteriora com o tempo;
- ✓ condutividade térmica e coeficiente de expansão térmica similar ao esmalte e dentina;
- ✓ resistência a compressão ~ (350–550MPa);
- ✓ resistência a tração ~ (20–60MPa) (muito baixa);
- ✓ resistência a flexão 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 - KAlSi_2O_6 ***

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

Orthofosfato de lítio - Li_3PO_4

Resistência a flexão

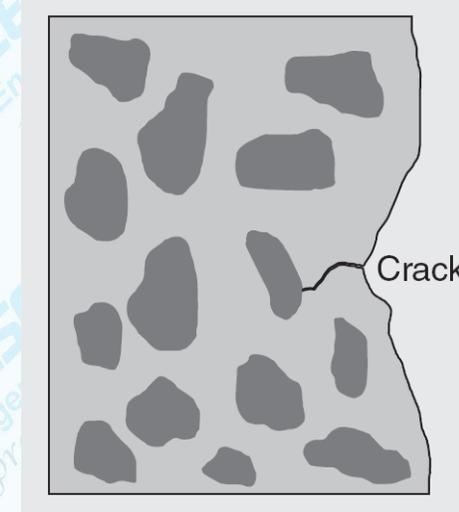
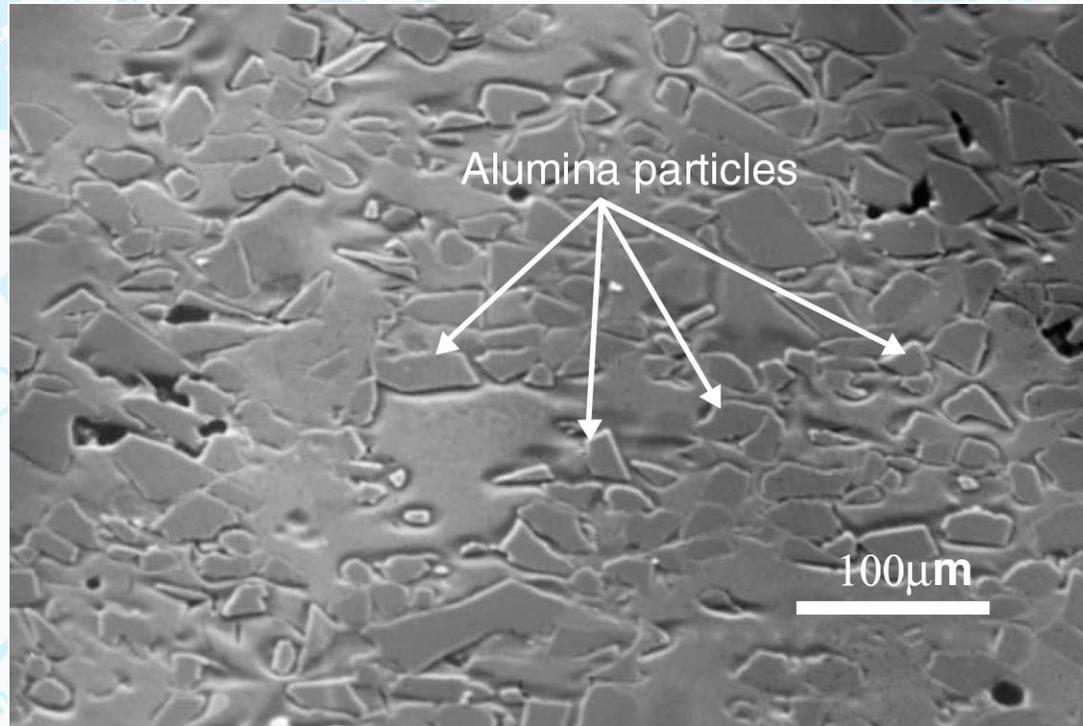
* 120-150MPa

** 350-500MPa

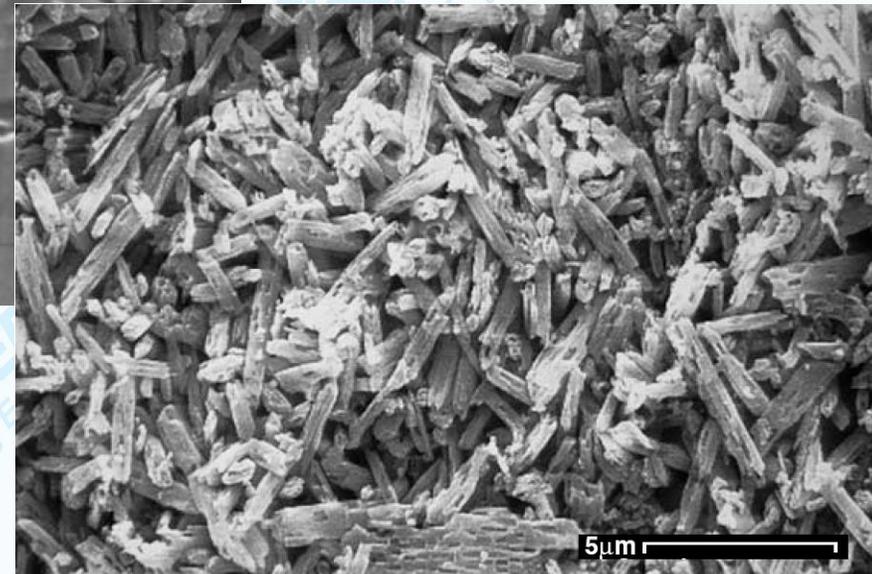
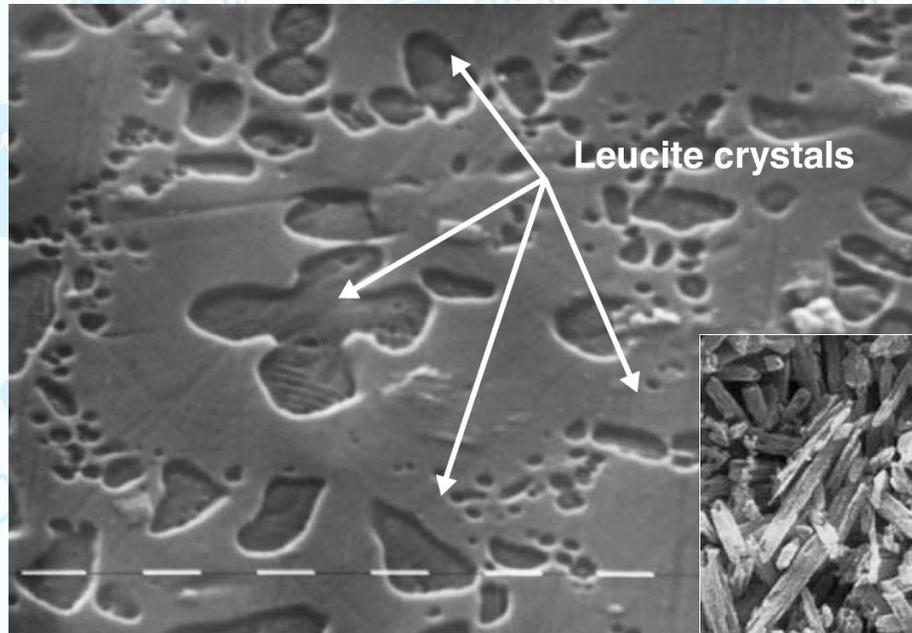
*** > 120MPa

**** 350-450MPa

Reforço pela adição de partículas de alumina



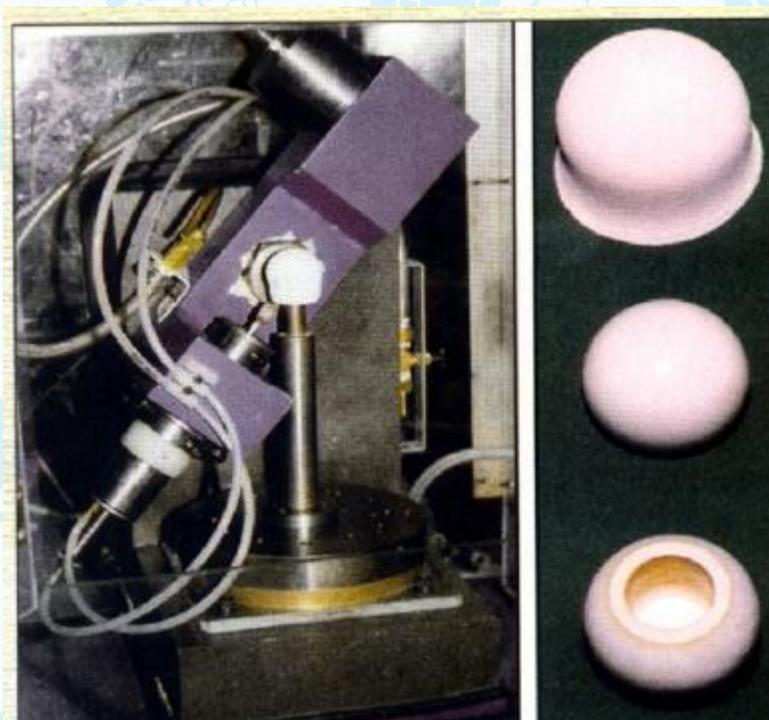
Vitro cerâmicas



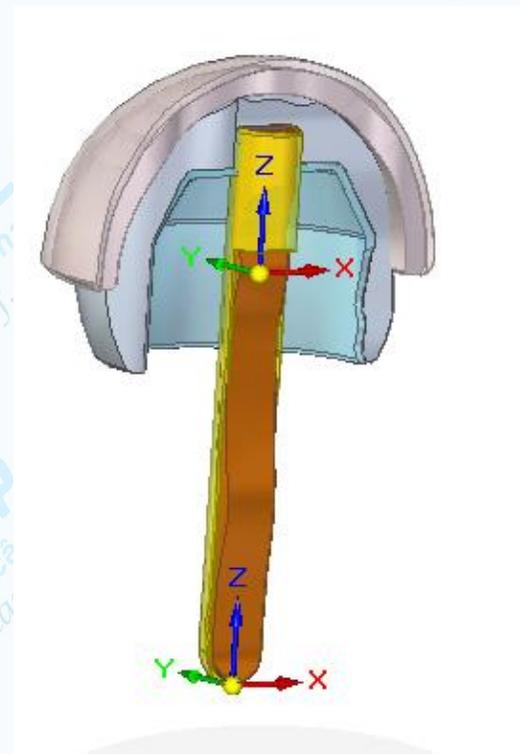
Dissilicato de lítio – cristais aciculares entrelaçados.

TRABALHOS do LTC

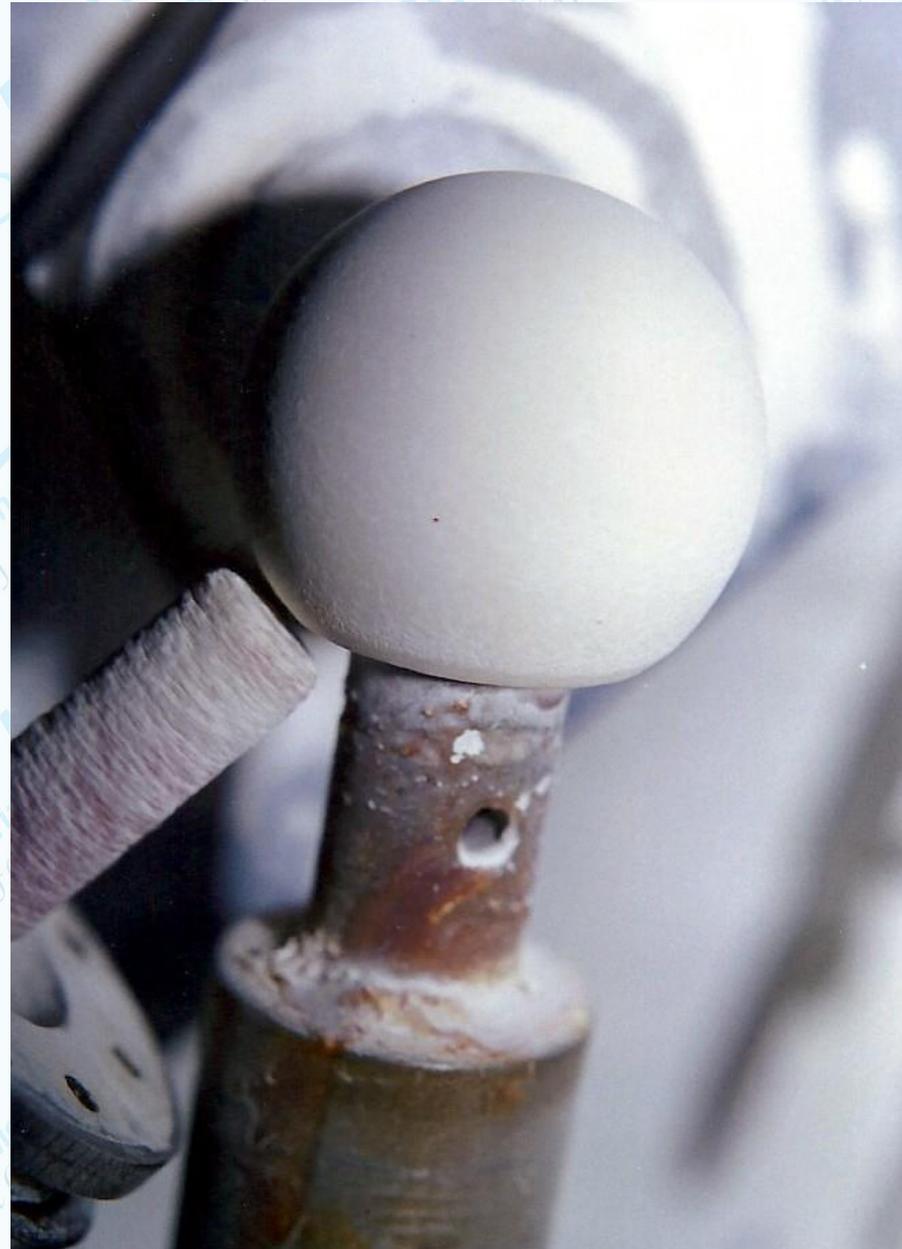
Spheres Implant



2001 – Wrege PS

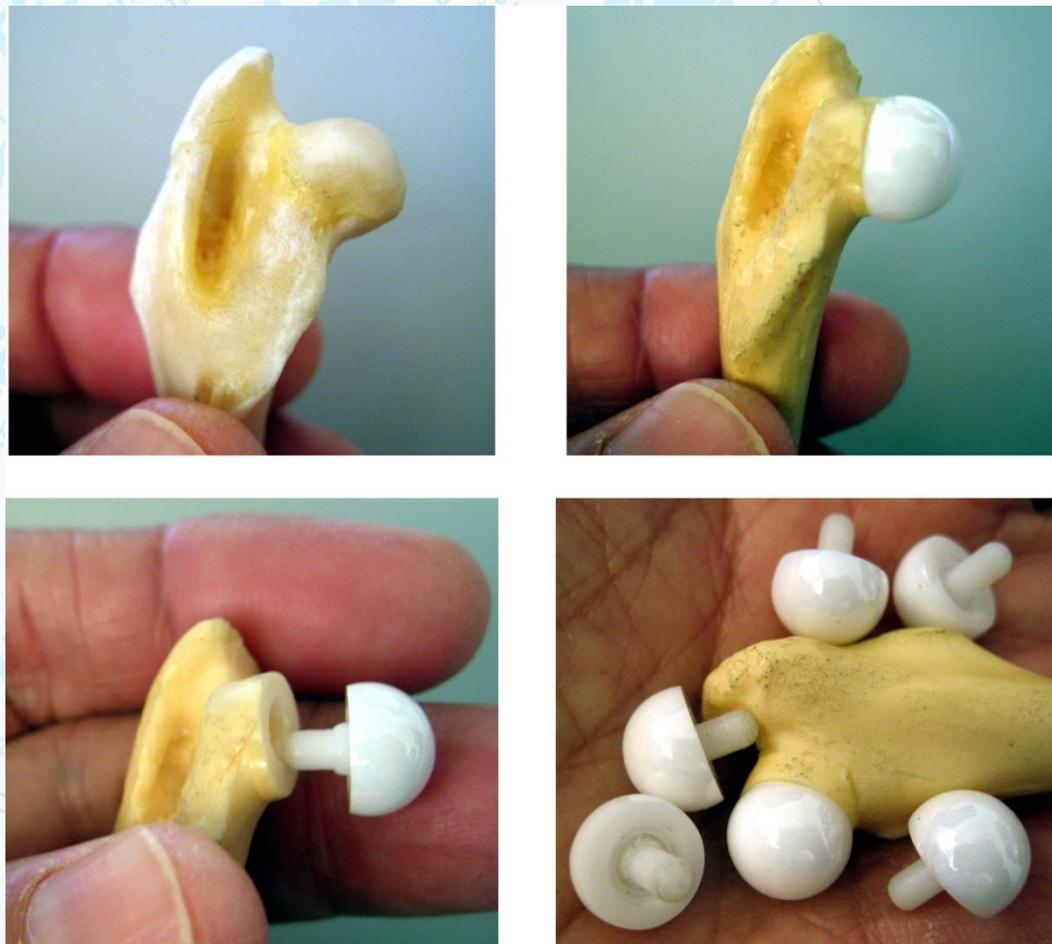


BR 10 2013 006808-0



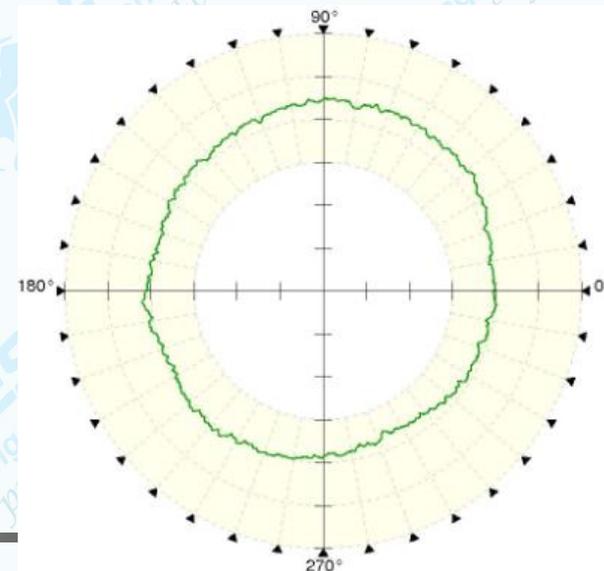
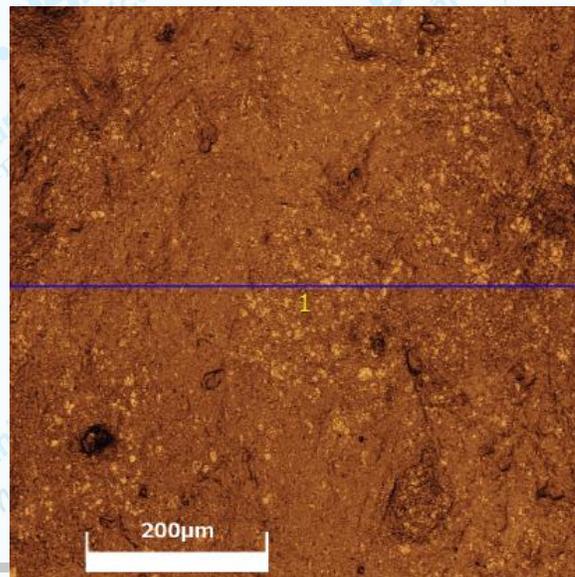
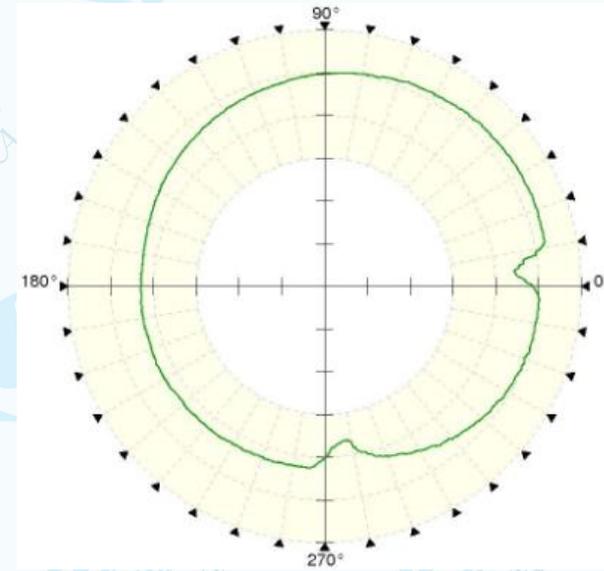
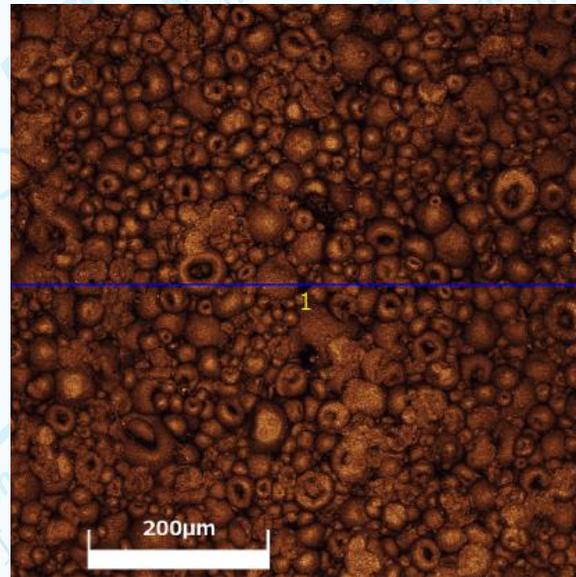
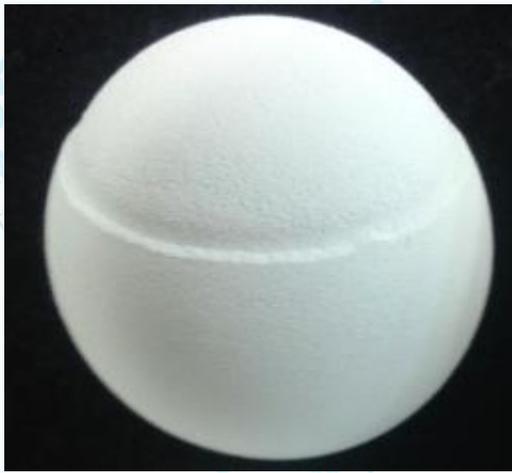
2001 – Wrege PS

Rabbits Spheres Implant - resurfacing



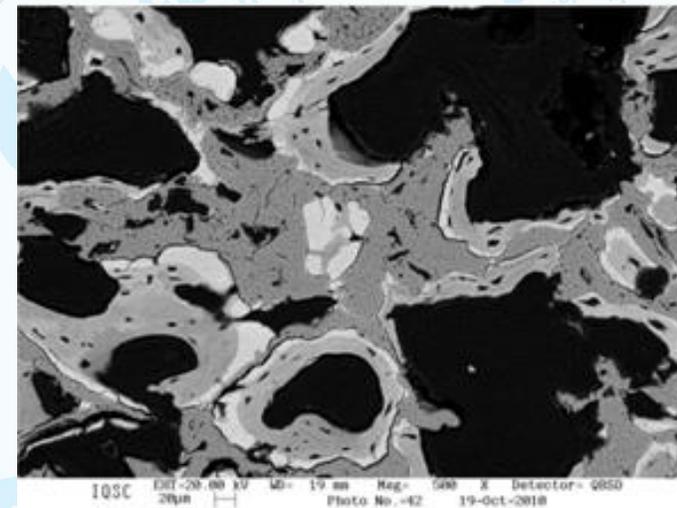
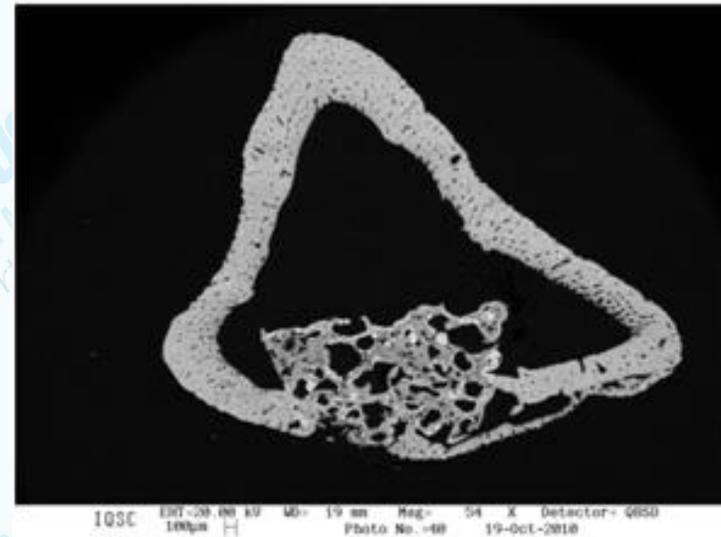
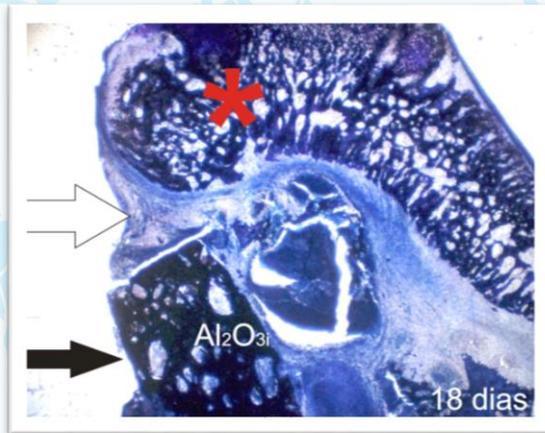
Benedito de Moraes Purquerio: adviser
Thiago Francisco de Moraes: student

BR 10 2013 006808-0



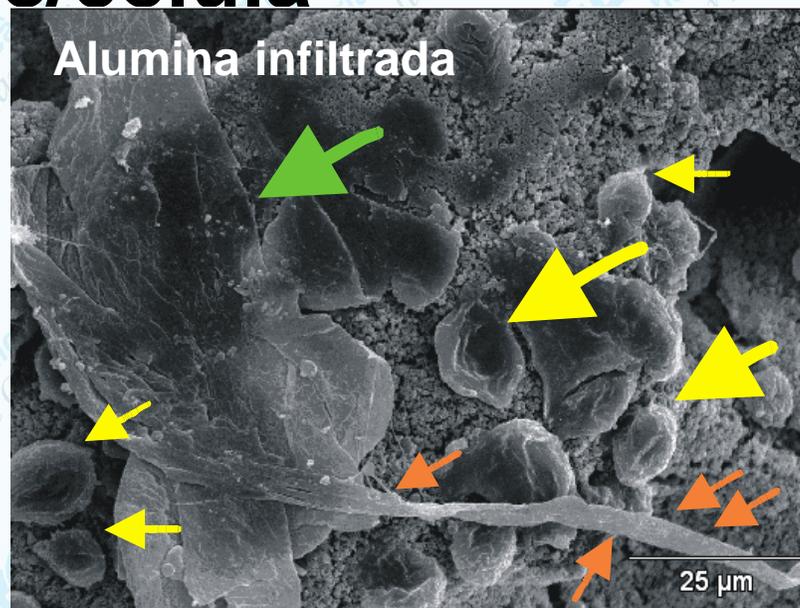
Alumina covered with HAp+Bioglass (45S5)

Tibiae rat – 28 days

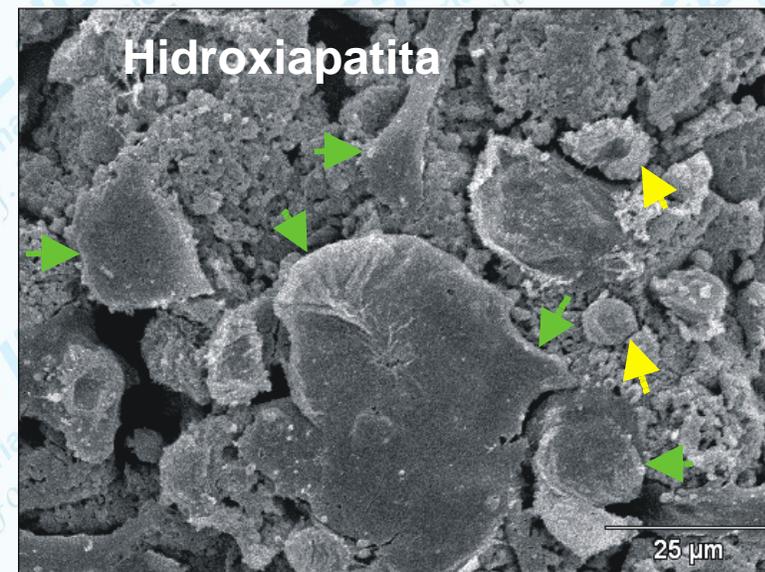


Camilo, C.C. (2010)

Interação scafolde/célula

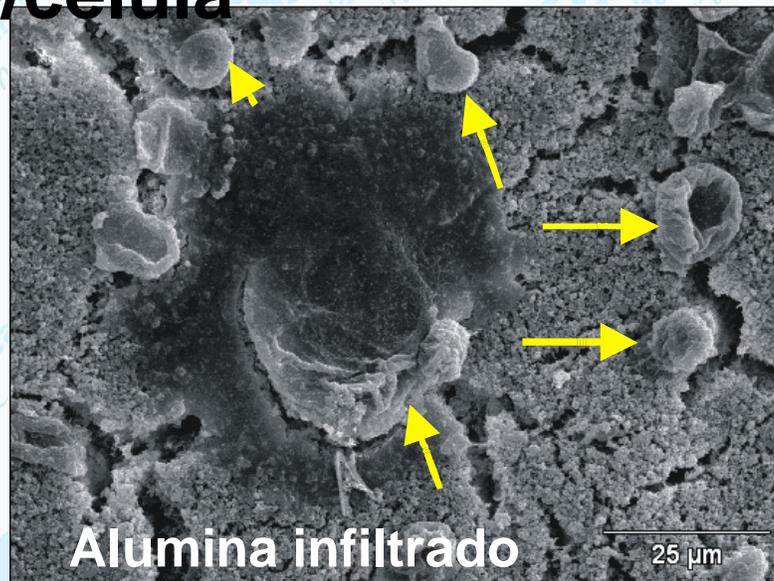


-  Aglomerado de células alongadas
-  Células em espalhamento
-  Células espalhadas
-  Células Arredondadas

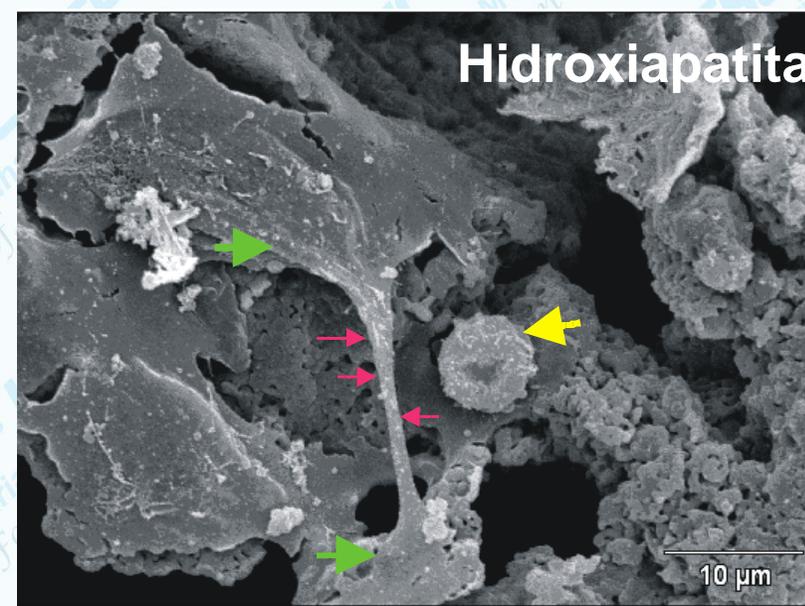
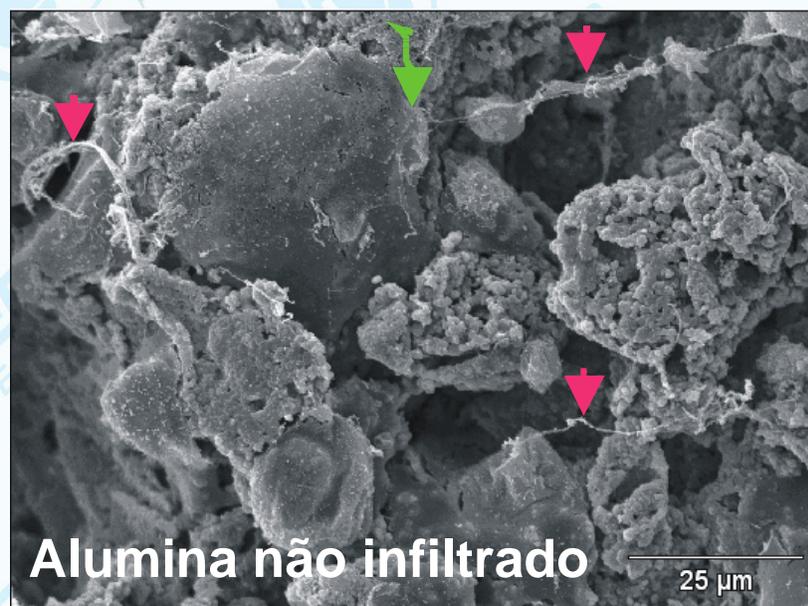


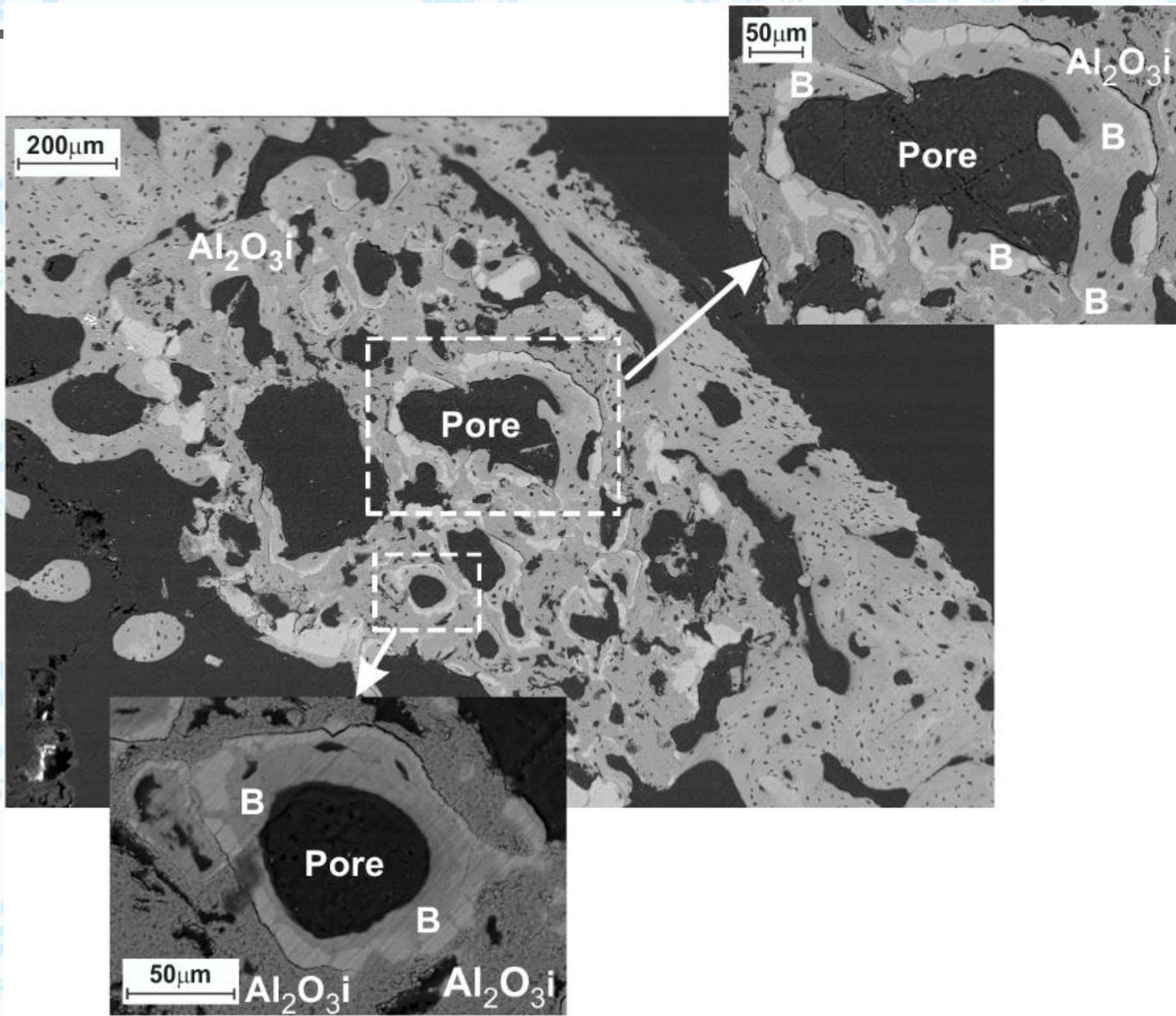
Camilo, C.C. (2006)

Interação escafolde/célula

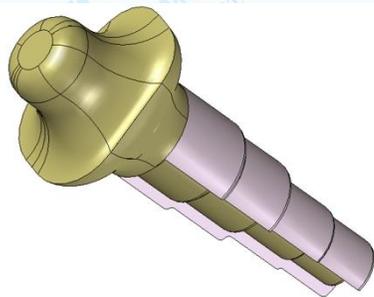


- Finos prolongamnetos
- Células espalhadas
- Células Arredondadas

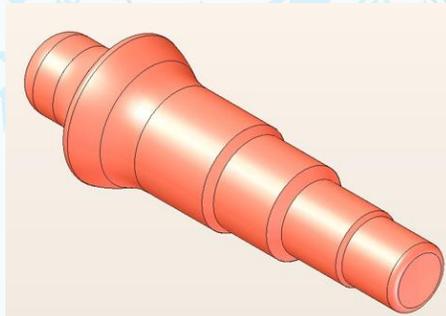




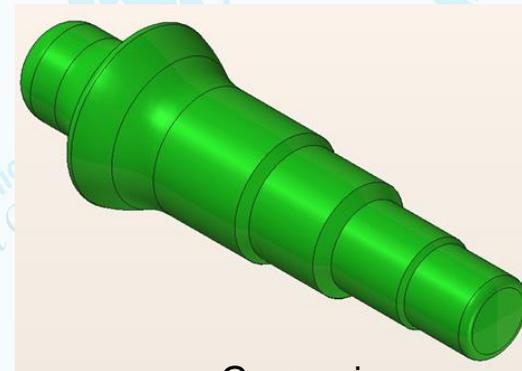
Dental implant concept



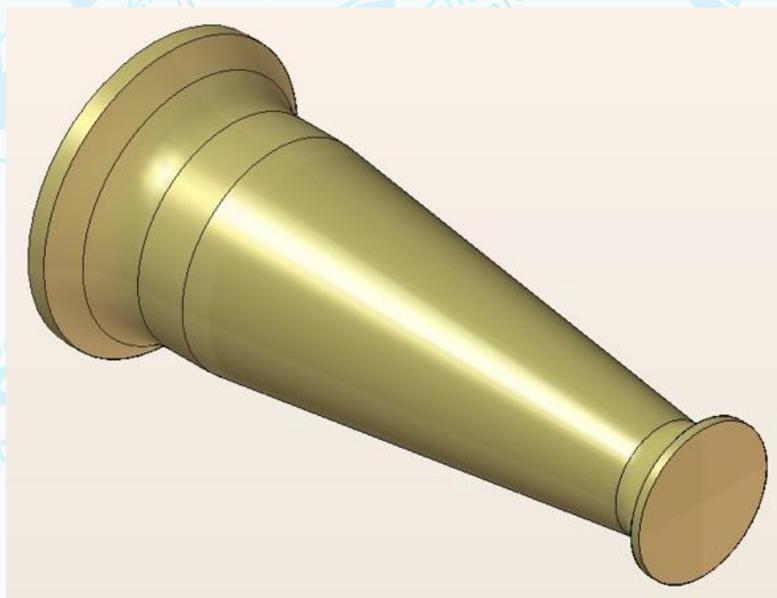
Pin covered with poros layer



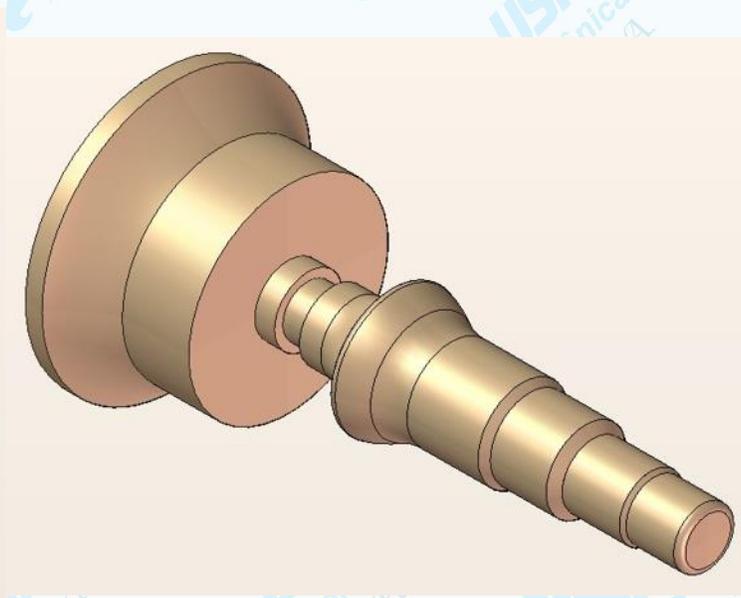
Sintered pin



Green pin



Blank pressed

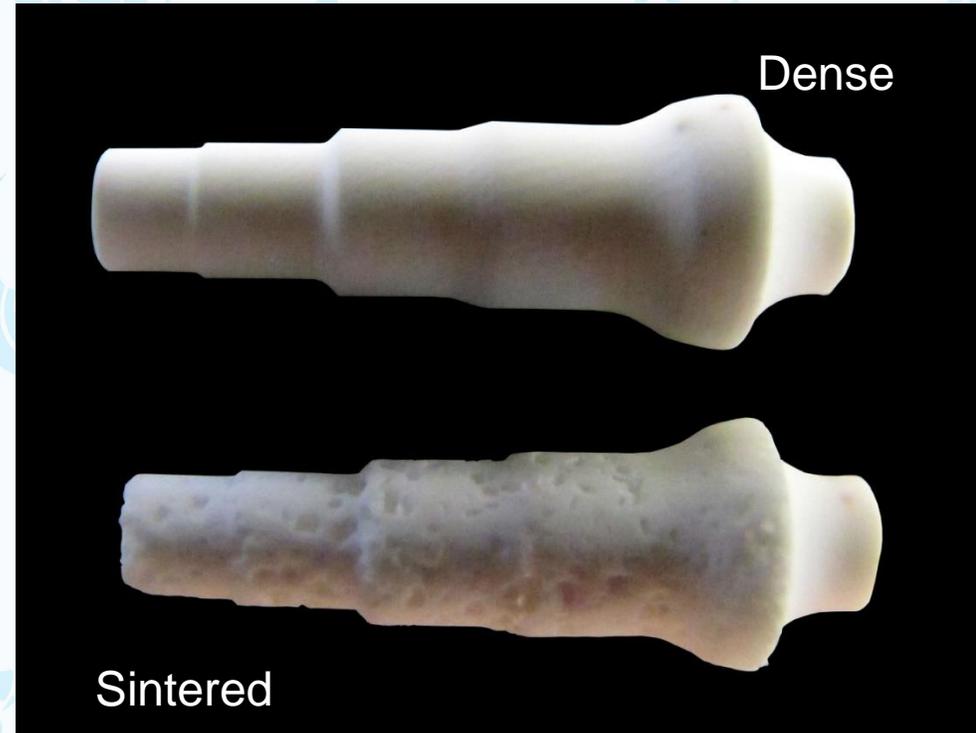


Blank after machining

Dental implant



Green Machined



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