

# **CERÂMICA TÉCNICA AVANÇADA APLICADA À INDÚSTRIA TERMOMECÂNICA**

Conferencista

**EDGAR D. ZANOTTO**

Professor e pesquisador da Universidade Federal de São Carlos  
Departamento de Engenharia de Materiais

Bem senhores, eu inicialmente agradeço o convite, também agradeço ao Professor Egon por ter introduzido o assunto, e na realidade acho que a metade da minha palestra foi adiantada por ele.

O meu trabalho vai ser reduzido e eu vou me ater especificamente ao tema cerâmica técnica avançada para aplicações na indústria termomecânica, ou cerâmicas avançadas, cujas características principais sejam a alta resistência mecânica, a alta refratariedade e a resistência à abrasão.

Inicialmente, para introduzir o tema eu apresentarei uma resenha do desenvolvimento mundial e nacional na área de cerâmica avançada (Figura 1).

Eu acredito que de maneira simplificada os primeiros produtos que foram desenvolvidos a nível mundial, na área de cerâmica avançada, têm sido os capacitadores à base de titânio de bário e as velas de ignição à base de óxido de alumínio, aí pelo final da década de 40.

Inicialmente, as velas de ignição foram desenvolvidas na Alemanha e rapidamente o Japão e os Estados Unidos também passaram a produzi-las para automóveis a base de alumina ou alto teor de alumina (óxido de alumínio).

Depois a Inglaterra, num projeto muito grande, com suporte do Governo Britânico, iniciou os estudos na área do que eles chamaram de New Electric Materials and New High Temperature Materials. Na década de 50 eles promoveram também o primeiro simpósio, pelo menos com esse título, o primeiro simpósio mundial sobre cerâmicas avançadas.

Obviamente, nesse período países como Estados Unidos, Japão e Alemanha continuavam a trabalhar no desenvolvimento de peças resistentes à abrasão, materiais cada vez mais refratários, cerâmicas eletrônicas gradualmente entrando no mercado, até que em 1983 aconteceu o que se chama atualmente febre em cerâmica avançada. Através de um artigo publicado num jornal de economia do Japão, onde após consultas a cem presidentes das maiores empresas japonesas tipo Sony, Hitachi, etc, estavam listadas as dez maiores inovações tecnológicas ocorridas no período de 73/83. Quer dizer, logo após o choque do petróleo. Esses diretores listaram as dez maiores inovações tecnológicas e o jornal publicou a seguinte lista:

"Maior inovação tecnológica foi integrado em larga escala, em segundo lugar vinha a biotecnologia, depois fibras óticas e em quarto lugar robótica e cerâmica avançada".

Os quatro primeiros itens já eram do conhecimento do grande público, todo mundo já tinha ouvido falar em fibra ótica, robótica, biotecnologia mas, cerâmica avançada realmente foi a primeira vez que o termo foi divulgado a nível de mídia.

Cerâmica avançada, numa escala relativa, se situa muito próxima da robótica, praticamente em quarto, quinto lugar. Além disso, fibras óticas na realidade são constituídas de vidros que são materiais cerâmicos avançados. Depois tínhamos interferon, automação de escritórios,

novos materiais que também envolvem materiais cerâmicos, super-computadores e tecnologia espacial.

De maneira resumida, foi esse artigo que despertou a febre mundial em cerâmica. Obviamente muita gente já vinha trabalhando em cerâmica, desde a década de 30 que se trabalha em cerâmica. Mas, o interesse de grandes grupos industriais, interesses de indústrias não-cerâmicas para a área de cerâmica realmente foi muito despertado nessa época, ou um pouco antes disso.

Essa é a história mundial.

No Brasil, pelo menos que se tem notícia, os estudos começaram em 1960, no IPEN, antigo Instituto de Energia Atômica de São Paulo, com o desenvolvimento de combustíveis nucleares à base de óxido de urânio, que é um material cerâmico.

Eles montaram uma planta-piloto, montaram o laboratório e começaram a contratar pessoal. Eu acredito que tenha iniciado lá essa parte de cerâmicas especiais.

Na mesma época o IPTem São Paulo e o Instituto de Física e o Departamento de Engenharia Química da USP também iniciavam os trabalhos de caracterização de matérias-primas não avançadas, mas começaram a implantar um grupo em um laboratório de cerâmica.

E na Universidade Federal de São Carlos, em 1970, foi criado o primeiro curso da América do Sul de Engenharia de Materiais, sendo que uma das modalidades era cerâmica, as outras duas, polímeros e metais. E aí realmente iniciaram-se os estudos e a diversificação na área, desenvolvimento de cerâmicas avançadas.

Então, de maneira resumida e com alguns erros, provavelmente, porque isso é uma visão minha da história, eu acredito que o panorama global seja bem representado por essa resenha.

As definições, o Professor Egon já mostrou, mas rapidamente vou lembrá-los (Figura 2).

Materiais cerâmicos são então materiais inorgânicos, não-metálicos, cuja produção ou aplicação envolve um tratamento térmico, um aquecimento. Eles tendem a ser duros, quer dizer, resistentes à abrasão, mas frágeis, quebram sob impacto. Tendem a ser isolantes térmicos e elétricos.

Os materiais cerâmicos englobam as chamadas cerâmicas, os cimentos, os refratários e os vidros também. Todas essas classes de materiais são materiais cerâmicos.

E há muita confusão na literatura por aí, mesmo a internacional. Alguns países consideram o vidro como material cerâmico, outros separam. Cerâmica é uma classe, "glasses" outra classe. A gente prefere chamar tudo isso de material cerâmico. Todos esses materiais inorgânicos, não-metálicos, que sofrem um tratamento térmico, são materiais cerâmicos.

Cerâmicas, de uma maneira global, podem ser classificadas como aqueles materiais cerâmicos predominantemente cristalinos, cuja estrutura atômica é muito bem ordenada. E os vidros são os materiais cerâmicos não-cristalinos cuja estrutura atômica é desordenada.

Nós podemos subdividir as cerâmicas avançadas, ou os materiais



cerâmicos de alta tecnologia (estou usando como sinônimos estes dois termos) em: aplicações mecânicas, óticas, térmicas, químicas, elétricas, magnéticas, biológicas e nucleares. São oito classes específicas desses materiais (Figura 3).

As cerâmicas para aplicações mecânicas compreendem os componentes dos motores. Já é conhecido do grande público o desenvolvimento que vem sendo feito no sentido de se obter os motores dos automóveis e aviões cada vez mais com partes cerâmicas. Componentes de máquinas em geral, ferramentas de corte, etc.

As cerâmicas para aplicações em eletrônica, que são os isoladores cerâmicos, os substratos eletrônicos, os capacitores, os semi-condutores e os piezo-elétricos.

As cerâmicas magnéticas usadas em magnetos cerâmicos têm algumas vantagens e algumas desvantagens em relação a magnetos metálicos.

As cerâmicas utilizadas para aplicações térmicas, os super-refratários, materiais que não se fundem ou não amolecem mesmo quando submetidos a temperaturas acima de 1.700°C. Os isolantes térmicos refratários também já são conhecidos do público, os azulejos isolantes que revestem as naves espaciais americanas, são materiais cerâmicos avançados.

As cerâmicas de aplicação na indústria química em geral, ou com aplicações químicas: sensores de gases, sensores de umidade, sensores de calor, suportes de catalizadores, eletrodos e reatores de alta temperatura, etc.

Cerâmicas para aplicações óticas, as fibras óticas, as cerâmicas translúcidas por exemplo. Essas lâmpadas de vapor de sódio altamente eficientes, têm uma camisa cerâmica onde o vapor de sódio é confinado. O vapor de sódio ataca os vidros. Seria impossível fazer uma lâmpada de halogênio apenas com o bulbo de vidro. Então, dentro do bulbo de vidro há uma camisa e uma cerâmica translúcida. Memórias óticas, emissores de laser, etc.

As cerâmicas para implantes ortopédicos, para válvulas de coração, dentes artificiais, etc.

E, finalmente, as cerâmicas para aplicações nucleares, os combustíveis nucleares, as cerâmicas resistentes à radiação de alta energia, materiais para blindagem de radiação.

Mas, de maneira global o Professor Egon já havia mostrado naquela transparência circular, as diversas funções das cerâmicas avançadas.

Como o meu seminário é relativo ao tema "cerâmicas para aplicações termomecânicas", eu vou detalhar um pouquinho mais as propriedades destas cerâmicas para aplicações termomecânicas.

A Figura 4 apresenta algumas propriedades positivas e algumas negativas da cerâmica avançada, quando se compara, por exemplo, aos metais ou polímeros.

Inicialmente, as positivas.

Os materiais cerâmicos têm um alto módulo de elasticidade, em outras palavras, uma alta rigidez. Dificilmente eles deformam. Não é à



toa que essas raquetes de tênis com fibras de carbono, fibras de boro que nós adotamos como materiais cerâmicos, o carbono artificial, o boro artificial, o nitreto de silício ou fibras de alumina, têm encontrado aplicações cada vez maiores. As raquetes de tênis não podem se deformar quando sofrem o impacto, por isso elas são reforçadas com fibras cerâmicas. Estes materiais cerâmicos têm alta rigidez, alta dureza com resistência à abrasão, são muito resistentes à abrasão, não se desgastam facilmente.

O Professor Egon mostrou muitas transparências e, na maioria delas, aquelas peças só existem devido à sua alta elasticidade à abrasão.

As ferramentas cerâmicas por exemplo, eu trouxe aqui uma tesoura, as lâminas de corte já estão sendo feitas de cerâmica, elas não oxidam, não enferrujam e não perdem o corte ou, dificilmente perdem o corte. No Japão já se pode comprá-la em supermercados.

Outra propriedade interessante: os materiais cerâmicos têm uma baixa massa específica, a densidade das cerâmicas é praticamente a metade da densidade dos metais. Os metais têm densidades típicas de 7 a 8 gramas por  $\text{cm}^3$  e as cerâmicas de 2 a 4 gramas por  $\text{cm}^3$ .

Então, as máquinas feitas com cerâmicas são muito mais leves. Imaginem um avião de cerâmica, é metade do peso de um avião metálico, grosseiramente e falando.

Inércia química é outra propriedade importante. Elas não enferrujam, não são atacadas quimicamente, são difíceis de sofrerem ataque químico, oxidação, etc.

Depois, refratariedade, quer dizer, a resistência a altas temperaturas. É muito difícil fundir esses materiais.

Essa tesourinha exige dois mil graus para se fundir. O cabo é de polímero, mas a lâmina só se funde a  $2.000^\circ\text{C}$ .

Outra propriedade positiva interessante é a elevadíssima resistência teórica, quer dizer, teoricamente pode-se calcular a energia de ligação que une dois ou mais átomos num material cerâmico. São materiais covalentes, ou iônicos, de alta energia de ligação.

Então, teoricamente, qual a resistência de um material? É proporcional à sua energia de ligação atômica e isso é altíssimo. Só o fato da resistência teórica ser muito alta significa que melhoras no processamento podem eliminar os defeitos que depreciam a resistência mecânica de maneira que se chegue a valores mais próximos, na prática, dos valores calculados teoricamente. E já se chegou a 1/4 do valor teórico com alumina de zircônio que é um material específico, reforçado com zircônia.

Devido à sua baixa densidade, a resistência específica, que seria a resistência mecânica dividida pela densidade, é muito alta em relação aos metais, por exemplo.

Outro fator importante, a resistência mecânica se mantém até temperaturas relativamente elevadas, por isso estão iniciando as aplicações nos motores cerâmicos.

Para quem ainda não acredita nos motores cerâmicos, eu já tenho

aqui uma peça incrivelmente complexa. Isso é um rotor de turbo de cerâmica, isso é nitreto de silício.

Os pistons cerâmicos. Aqui é um pistão de alumínio cuja cabeça já é de cerâmica. Só com essa aplicaçãozinha de cerâmica já dá para elevar a temperatura de trabalho no motor e aumentar a eficiência do processo termodinâmico. Além disso, o objetivo é eliminar toda a refrigeração do automóvel.

A condutividade térmica na maioria das cerâmicas é baixa em relação aos metais e a expansão térmica é controlável, quer dizer, existem materiais cerâmicos com coeficientes de expansão térmica praticamente zero. Pode-se aquecer o material que ele não se expande. Isso é muito bom porque esses materiais que não se expandem têm uma altíssima aplicabilidade em situações de alta temperatura.

Por outro lado, outros materiais cerâmicos têm alto coeficiente de expansão térmica, o que facilita a sua junção a certos metais. Então permite uma flexibilidade de projeto, essa grande gama de materiais cerâmicos.

Eu falei das propriedades positivas. Existem algumas negativas que nós temos que citar.

As cerâmicas são frágeis, elas resistem pouco a impactos. Se elas não fossem frágeis os motores cerâmicos já estavam hoje rodando por aí. O problema ainda a resolver é a diminuição da fragilidade e o aumento da tenacidade, aumento da resistência ao impacto. Também elas têm em geral uma baixa resistência a choque térmico. É muito comum pratos, copos, etc, se quebrarem quando se coloca um material frio em material quente e vice-versa. São essas duas propriedades negativas que vem limitando a aplicação em larga escala dos motores cerâmicos. Mas, isso há maneira de se resolver e avanços muito grandes nessa área vêm acontecendo.

Uma outra propriedade negativa é o grande espalhamento de valores de resistência. Quer dizer, num aço bem feito, um engenheiro sabe que a resistência mecânica é 2.000 kg/força por  $\text{cm}^2$ . A cerâmica tem desvio-padrão muito grande. Numa peça que tem 2.000 kg/força por  $\text{cm}^2$ , outra peça pode ter 200, dez vezes menor. Então, há uma dificuldade de projeto muito grande. Há uma baixa confiabilidade devido ao largo desvio-padrão das propriedades mecânicas. Também há maneiras de se controlar isso.

E, finalmente, a resistência mecânica depende muito do acabamento superficial da peça, em outras palavras, depende muito do processamento do material cerâmico, da existência de poros, de defeitos, de inclusões e de trincas superficiais.

Como eu disse no início, a resistência teórica é muito alta. Mas, os defeitos introduzidos durante o processamento abaixam violentamente essa resistência mecânica.

Então, os avanços atualmente não são relacionados muito a novas composições. São relacionados ao processamento, as melhorias no processamento para se eliminar os defeitos.

Eu havia me esquecido, mas tem um outro problema, chamado "fadiga estática". A resistência mecânica dos materiais cerâmicos de-



crece com o tempo por razões já conhecidas. Eles sofrem um ataque químico progressivo, muito lento, mas ela cai com o tempo. É possível prever tempo de vida de um determinado material cerâmico sobre uma determinada situação mecânica.

Bom, mas nesse balanço entre propriedades positivas e negativas, há espaço para muito desenvolvimento.

Outro fator importante é que as matérias-primas para obtenção dessas cerâmicas são muito mais abundantes, como disse o Professor Egon, do que o cobalto, platina, vanádio, esses metais raros que são aplicados nas super-ligas.

Os materiais cerâmicos são à base de alumínio, (alumina), ferro silício, oxigênio, que são materiais abundantes na natureza. É por isso que está havendo essa febre na área de cerâmicas. Eles têm muitas propriedades positivas e os cientistas estão trabalhando para minimizar, para controlar as propriedades negativas.

Bem, quem está trabalhando em cerâmica no Brasil?

Nós fizemos uma tabela resumida dos vários pesquisadores existentes no Brasil, que está na Figura 5.

Na região de São Carlos, Araraquara, há quatro grupos trabalhando há alguns anos em materiais avançados. Tem o DEMA, na Universidade Federal de São Carlos; um grupo no Departamento de Química; no Instituto de Química da UNESP em Araraquara; e no Instituto de Física e Química da USP lá em São Carlos também. No total temos aproximadamente vinte pesquisadores, mais da metade deles com título de Ph.D. É um grupo razoável, com alguns anos de experiências em materiais cerâmicos avançados.

Em São Paulo, capital, também há três grupos relativamente grandes. O principal é o do IPEN - Instituto de Pesquisas Nucleares, conta com sete Ph.D. e a linha principal é cerâmica para aplicações nucleares. Depois há o IPT, em São Paulo, tem bastante experiência acumulada em matérias-primas cerâmicas e tem uma pequena fábrica-piloto de alumina, produtos de óxido de alumina e, na Engenharia Química da USP, experiência acumulada também em matérias-primas cerâmicas.

Em Campinas temos o Instituto de Física da Unicamp, dois grupos já com alguma experiência também em fibras óticas (nós vamos ter o Dr. José Mauro à tarde explicitando as pesquisas e desenvolvimento em Campinas), e um grupo também do Professor Suzuki trabalhando com quartzo, que é uma matéria-prima cerâmica bastante importante.

Temos um grupo emergente em São José dos Campos, no CTA, iniciando trabalhos há dois anos na área de motores. E teremos amanhã também o Dr. Tessaleno que vai explicar em detalhes os desenvolvimentos no CTA em São José dos Campos na área de motores cerâmicos.

No Rio de Janeiro nós temos o Instituto Militar de Engenharia, também trabalhando na área de cerâmicas para aplicações em termomecânicas e o INT com experiência acumulada em matérias-primas cerâmicas.

E além desses temos outros grupos. Temos um grupo na Bahia, outro em Campina Grande, uma pessoa no Rio Grande do Sul. Algumas



outras pessoas, dando um total aproximado de 96 pessoas trabalhando em cerâmica, nem todas em cerâmica avançada. Esse é o total de pesquisadores em cerâmica. Tirando uma parcela, digamos, 10% disso at trabalhando em cerâmica avançada.

Por levantamento que fiz recentemente (Figura 6), eu acredito que esses números sejam bem próximos da realidade. Há uma escola do SENAI em São Caetano do Sul que forma técnicos ceramistas, e mil técnicos já foram formados em cerâmica desde 62, desde o início da escola.

A Universidade Federal de São Carlos já formou cem Engenheiros Cerâmicos desde o seu início e a Universidade Federal da Paraíba recentemente implantou um curso e já formou doze Engenheiros Cerâmicos. São as únicas duas escolas que formam Engenheiros Cerâmicos. Quer dizer, Engenheiros de materiais com especialização em cerâmica.

Mestres, foram formados nove na Universidade Federal de São Carlos, três na Universidade da Paraíba, sete no IME, vinte na USP e cinco no exterior.

Doutores temos no Brasil hoje trinta doutores em cerâmica, dez formados na USP e vinte no exterior, mas nem todos trabalhando em cerâmica avançada, talvez, meio a meio. A maior parte desse pessoal trabalha com cerâmicas tradicionais.

Esse é o total de doutores que o Brasil tem em cerâmica, trinta.

Eu tenho dados agora dos Estados Unidos, eles estão formando oito por ano, doutores em cerâmicas. E nós temos trinta na história toda.

Voltando novamente às cerâmicas para uso termomecânico eu listo aqui as principais. Atualmente as principais cerâmicas para uso termomecânico são: alumina, zircônia, carbeto de silício e nitreto de silício. Uma estimativa feita por uma empresa norueguesa de marketing está na Figura 7. A bolinha representa o preço médio estimado da matéria-prima, do pó especial de alumina, de zircônia, de carbeto de silício. Preço médio da alumina, um dólar o quilo; preço médio de zircônia, carbeto de silício e nitreto, dez dólares o quilo. É o preço do pó. A faixa representa o preço mínimo estimado e o preço máximo estimado. Isso dá uma idéia do que se pode esperar em termos de vendas para essas matérias-primas de cerâmica avançada.

No trabalho feito pela mesma firma norueguesa de marketing, tem um ano de explosão comercial, ano que realmente o produto vai entrar no mercado para valer, de 1980 ao ano de 2010, de diversos componentes cerâmicos avançados. Por exemplo, ferramentas de corte já estão no mercado. O Brasil importa ferramentas de corte, de cerâmica. Bicos de solda também já estão no mercado, a ENGESA já fabrica no Brasil um certo tipo de bico de solda. Há muitos tipos. Garras de precisão também já existem no mercado internacional. Componentes de bombas mecânicas, selos mecânicos, camisas. Componentes de motores para baixa temperatura. Vejam que nessa faixa de 1985 a 1990 devem estar no mercado várias partes de motores para temperaturas relativamente baixas. Rolamentos cerâmicos, em 1990 mais ou menos, devem substituir os metálicos. E componentes para motores de alta temperaturas ou pa-

ra turbinas devem estar planejados para mais ou menos entre 1990 e 1995. Eu acredito que amanhã o Tessaleno do CTA vai dar uma visão um pouco melhor sobre isso, porque ele vai falar especificamente sobre motores.

Mas, de acordo com estas estimativas, quer dizer, nessa faixa de 1985 a 1995, a maioria dos produtos vai estar no mercado já.

Uma idéia da história dos motores cerâmicos. A Inglaterra fez isso com várias coisas. Eles inventaram os motores cerâmicos na década de 60 e atualmente têm nível de pesquisa de investimento muito baixo nos motores cerâmicos (Figura 8). Os Estados Unidos, não sei dizer porque razão, aparentemente estão diminuindo levemente o nível de atividade. O nível de atividade é o número de pessoas trabalhando e o número de dólares, a quantidade de dólares investido nessa área. Está caindo levemente enquanto que a República Federal Alemã e o Japão, o Japão principalmente, estão investindo maciçamente nos motores cerâmicos. São dados deste ano, bem recentes.

No Brasil, um fenômeno interessante: em levantamento que eu fiz na Revista Brasileira de Cerâmica, de 1981 a 1986, temos a percentagem de artigos técnicos publicado em cerâmica avançada (Figura 9). Em 1980 tínhamos que 1% dos artigos publicados se relacionavam à cerâmica avançada. Hoje, 1985-1986, 40% dos artigos publicados na revista nacional de cerâmica se refere à cerâmica avançada. Isso indica que o Brasil, pelo menos a nível de pesquisa, com todas as dificuldades, também tem um nível de atividade razoável nessa área de cerâmica avançada.

Bom, finalmente um exemplo do que é interação universidade-indústria nos Estados Unidos (Figura 10).

Existem vinte empresas financiando pesquisas de cerâmica avançada nos Estados Unidos, com duas linhas atualmente em andamento: processamento de materiais cerâmicos e motores cerâmicos. Essas mesmas empresas, são empresas que têm filiais no Brasil. Quase todas as universidades americanas têm financiamentos muito importantes por parte de indústrias, uma coisa que deve ser incentivada aqui no Brasil.

As indústrias consorciaram e financiam a mesma pesquisa depois elas dividem o resultado.

Bem, eu gostaria apenas de concluir. O meu ponto de vista é o seguinte:

O mercado mundial atual é da ordem de 5 a 6 bilhões de dólares para a cerâmica avançada (Figura 11). As projeções para o ano 2000, 2010, são de 40 a 60 bilhões de dólares.

O mercado nacional de cerâmica avançada é da ordem de 200 milhões de dólares hoje. Se crescer com as mesmas taxas projetadas para o Japão, Estados Unidos, etc, são taxas da ordem de 15 a 20% ao ano, nós chegaremos rapidamente a um bilhão de dólares em 1990.

Isso sugere que as pesquisas sejam incentivadas, recursos humanos devem ser formados, empresas devem começar a financiar pesquisa, não esperar que só o Governo financie isso.

Sobre as matérias-primas o Professor Egon já falou muito bem, eu concordo. Nós temos reservas grandes em minérios de zircônia, alumí-



nio, ferro, titânio, o Brasil detém 65% das reservas mundiais de quartzo.

Entretanto, os recursos humanos são poucos ainda. Só há duas universidades que formam engenheiros de cerâmica, temos só trinta Ph.D's no Brasil inteiro, em cerâmica, uma parcela deles trabalhando em cerâmica avançada. Meu ponto-de-vista é que hoje se domina tecnologia de produtos de alumina na área termomecânica, não se faz quase nada em carbeto de silício, em nitreto de silício, em zircônia, só alumina. Então há espaço aí para desenvolvimento de implantação de tecnologias.

Recomendação final seria: o reaparelhamento dos laboratórios existentes, incentivo à formação de recursos humanos e incentivo à formação de consórcios entre indústrias, universidades e centros de pesquisa. Eu acredito que a área, em termos de mercado é uma área que vale a pena, os investimentos valem a pena.

Obrigado.



## HISTÓRICO

### 1. ALEMANHA, JAPÃO, USA

BaTiO <sub>3</sub> Velas de ignição	década de 40
--	--------------

### 2. INGLATERRA

New Electrical Materials New High - T Materials First Special Ceramics Symposium	década de 50
--	--------------

### 3. JAPÃO, 1983

Maiores Inovações Tecnológicas

VLSI	397	Interferon	86
Biotech	151	Aut. escritórios	77
Fib. óticas	129	Novos Materiais	41
Robótica	104	Sup. computadores	37
Cer. Avançada	103	TEc. espacial	32

### NO BRASIL

1. IPEN - 1960 - Combustíveis nucleares  
IPT/USP - 1960 - Matérias primas

2. UFSCar - 1970 - Eng. de Materias - cerâmica

Figura 1 - Resenha histórica do desenvolvimento mundial no campo das cerâmicas avançadas.

## 1. DEFINIÇÕES

### MATERIAIS

**CERÂMICOS:** Materiais inorgânicos, não metálicos, cuja produção ou aplicação envolve tratamento térmico. Tendem a ser duros e frágeis, isolantes térmicos e elétricos

**CERÂMICAS:** Materiais cerâmicos predominantemente cristalinos.

**VIDROS :** Sólidos não cristalinos que apresentam o fenômeno de transição vítrea (ZARZYCKI).

### VITRO-

**CERÂMICAS:** Sólidos policristalinos obtidos pela cristalização controlada de vidros (MC MILLAN).

Figura 2 - Definições para os materiais cerâmicos

## MATERIAIS CERÂMICOS DE ALTA TECNOLOGIA

- |                       |   |
|-----------------------|---|
| ● MECANO - Cerâmicas  | Componentes de motores, Componentes de máquinas, Ferramentas de corte |
| ● ELETRO- Cerâmicas   | Isoladores, Capacitores<br>Semicondutores, Piezoelétricos             |
| ● MAGNETO - Cerâmicas | Magnetos  |
| ● TERMO - Cerâmicas   | Super-refratários<br>Isolantes refratários                            |
| ● CHEMO - Cerâmicas   | Sensores de gases e umidade. Suportes de catalizadores, Eletrodos     |
| ● OPTO - Cerâmicas    | Cerâmicas translúcidas, Memórias óticas<br>Emissores de LASER         |
| ● BIO - Cerâmicas     | Implantes ortopédicos<br>Cerâmicas dentárias                          |
| ● NUCLEO - Cerâmicas  | Combustíveis nucleares<br>Materiais para blindagem                    |

**Figura 3 - Divisão funcional das cerâmicas avançadas**

### PROPRIEDADES TERMO-MECÂNICAS DAS CERÂMICAS AVANÇADAS

#### POSITIVAS

- Alto módulo de elasticidade
- Dureza – resistência à abrasão
- Baixa massa específica
- Inércia química
- Refratariedade
- Elevadíssima resistência teórica
- Elevada resistência específica
- Resistência mecânica em altas temperaturas
- Baixa condutividade térmica
- Expansão térmica controlável ( $0-15 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ )

#### NEGATIVAS

- Fragilidade Resistência ao impacto  
Resistência ao choque térmico
- Grande espalhamento de valores de resistência
- Resistência depende muito do processamento e do acabamento superficial
- Fadiga estática

**Figura 4 – Propriedades termo-mecânicas das cerâmicas avançadas.**

**GRUPO DE PESQUISA EM CERÂMICA NO BRASIL**

GRUPO	LINHA	PESQUIS./PhD
<b>S. CARLOS</b>		
DEMa-UFSCar	Materiais Cerâmicos Avançados	12/06
DQ-UFSCar	Materiais Cerâmicos Avançados	02/02
IQ-UNESO	Materiais Cerâmicos Avançados	04/03
IFQSC-USP	Materiais Cerâmicos Avançados	02/02
<b>S. PAULO</b>		
IPEN	Cerâmicas nucleares	16/07
IPT	Matérias-primas e Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	09/04
EQ-USP	Matérias-primas	07/03
<b>CAMPINAS</b>		
IF-UNICAMP	Fibras óticas, quartzo	11/04
<b>S. J. CAMPOS</b>		
CTA	Cerâmicas termo-mecânicas	08/03
<b>RIO DE JANEIRO</b>		
IME	Cerâmicas termo-mecânicas	03/00
INT	Matérias-primas	02/00
<b>OUTROS</b>	Matérias-primas	18/02
<b>TOTAL</b>		<b>96/36</b>

Figura 5 – Grupos de pesquisa em cerâmica no Brasil.

**PESSOAL FORMADO EM CERÂMICA ATÉ 1986**

	SENAI (1962)	UFSCar (1970)	UFPb (1976)	IME (1972)	USP (1960)	EXT.	TOTAL
Técnicos	1000	-	-	-	-	-	1000
Engenheiros	-	100	12	-	-	-	112
Mestres	-	9	3	7	20	5	44
Doutores	-	-	-	-	10	20	30

**EMPRESAS ATUANTES NO BRASIL**

NGK	: Aneis de trefila, placas de revestimento, esferas para moinhos, bicos de solda, peças de Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> e mulita em geral
COORS	: Peças especiais de Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
keramus	: Produtos de Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , cristobalita e cordierita
IPT	: Produtos de Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
PROCER	: Tubos e cadinhos de Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
CETEC*	: Guias - fios
CILCERAM	: Guias - fios
FOSECO*	: Refratários especiais
CARBORUNDUN	: Elementos aquecedores de SiC, Refratários SiC e Sialon

LOCALIZAÇÃO: interior do Estado de São Paulo

\* São Paulo – Capital

Figura 6 – PESSOAL FORMADO EM CERÂMICA NO BRASIL, ATÉ 1986.



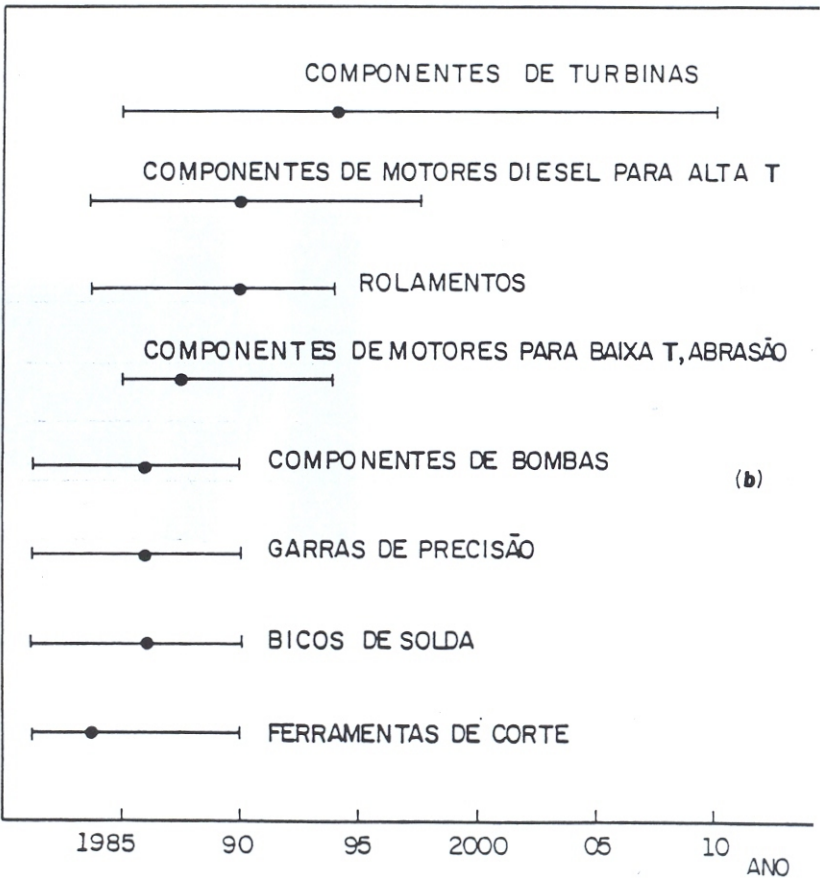
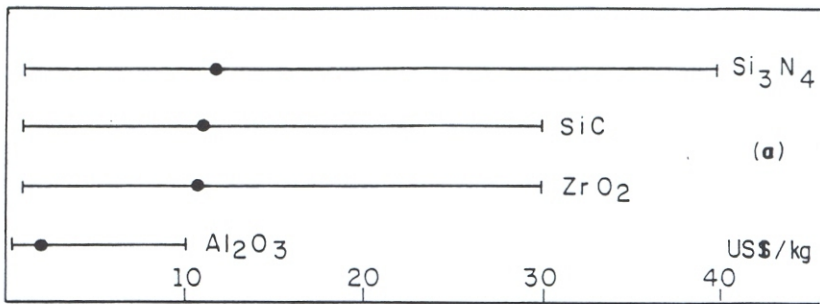
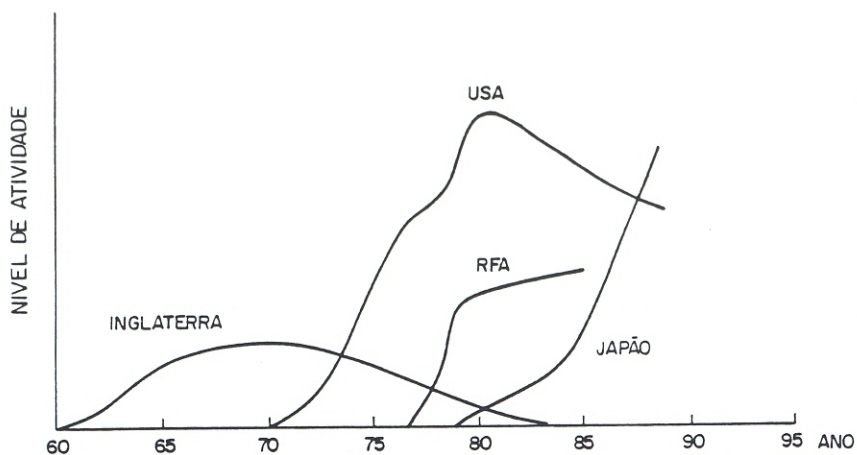
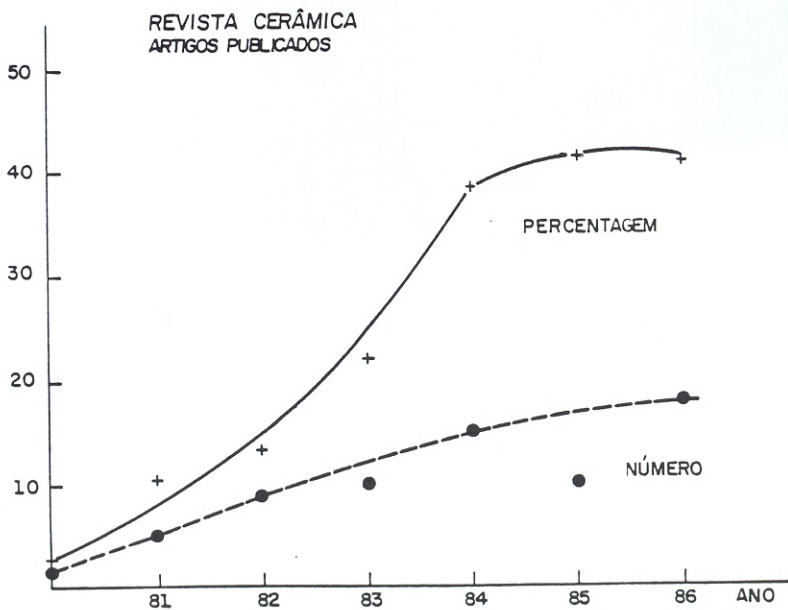


FIGURA 07 - PREÇOS ESTIMADOS DAS CERÂMICAS AVANÇADAS (a) E PROJEÇÕES DE "BREAKTHROUGH" COMERCIAL (b)

## MOTORES CERÂMICOS



**FIGURA 08** - INVESTIMENTOS FEITOS EM CERÂMICA AVANÇADA, A PARTIR DE 1960.  
 FONTE: JOHNSON, L.R., ARGONNE NAT. LAB. ANL / CNSU - 38 (1983)



**FIGURA 09** - ARTIGOS PUBLICADOS SOBRE CERÂMICA AVANÇADA NO BRASIL, ENTRE 1980 E 1986

**20 EMPRESAS FINANCIAM O DESENVOLVIMENTO  
DE PESQUISA TECNOLÓGICA NAS UNIVERSIDADES**

**LINHAS: PROCESSAMENTO DE MATERIAIS CERÂMICOS  
MOTORES CERÂMICOS**

**SERVIÇOS PRESTADOS PELAS UNIVERSIDADES ÀS  
FIRMAS: ENSAIOS DE CONTROLE DE QUALIDADE  
PLANEJAMENTO DA PRODUÇÃO  
PROJETOS DE EQUIPAMENTOS  
DESENVOLVIMENTO DE PROCESSOS**

**Figura 10 — Relações entre universidades  
e indústrias nos Estados Unidos.**



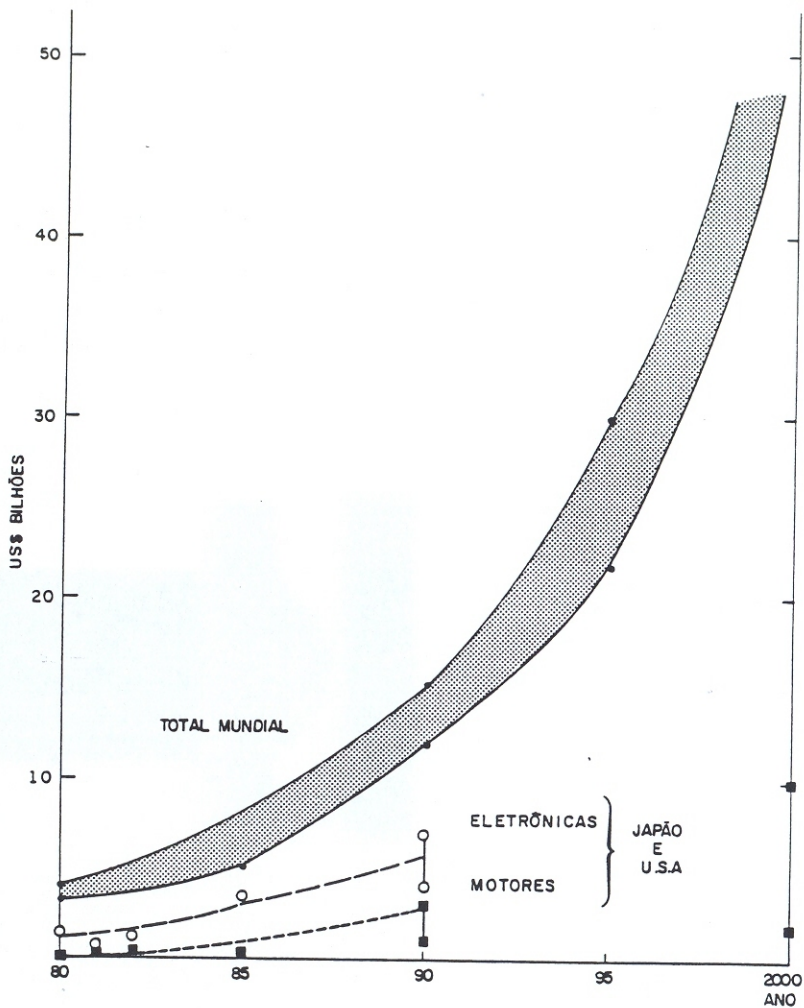


FIGURA 11 - MERCADO MUNDIAL DOS MATERIAIS CERÂMICOS DE ALTA TECNOLOGIA

## DEBATE

WILSON GESSER  
(FUNDIÇÃO TUPY)

*Eu tenho uma dúvida, acho que é bastante elementar, mas eu não conheço quase nada de cerâmica. Perguntaria em que estágio se encontram os estudos para que seja factível a maior utilização da cerâmica avançada em motores, principalmente quanto à diminuição da fragilidade e quanto ao impacto e choque térmico.*

EDGAR ZANOTTO

Hoje em dia, a esperança dos ceramistas no aumento da resistência à fragilidade seriam os compósitos cerâmicos, materiais cerâmicos reforçados com fibras cerâmicas ou reforçados com partículas cerâmicas. Os compósitos cerâmicos têm uma resistência a impacto bem maior do que os materiais convencionais monolíticos. É portanto, nessa linha de desenvolvimento de compósitos cerâmicos, que se vislumbra a solução para este problema.

WILSON GESSER

*Zanotto, eu só queria ser um pouco provocativo e fazer a seguinte colocação: o Japão não tem metais refratários, enfim não tem nada de metal lá, o Brasil tem nióbio, titânio, zircônio, tungstênio; será que esse modelo de cerâmica avançada cabe para um país que tem esse tipo de reservas? Veja, eu não estou colocando uma opinião, eu estou tentando provocar um pouco a discussão.*

EDGAR ZANOTTO

Do titânio obtém-se, quero dizer, do minério já se obtém o óxido de titânio que é um dos principais componentes das cerâmicas eletrônicas. Os capacitores cerâmicos atuais são à base de titanato de bário e titanato de estrôncio. Então, o titânio é uma cerâmica quase pronta na natureza e só um leve beneficiamento do minério. Não precisa reduzir, obter um metal, etc. O nióbio também, cujo óxido tem aplicações de altíssima constante dielétrica. Então, veja bem, a idéia não é substituir

todos os metais, a idéia é substituir quando for vantajoso. Nada impede que uma parte das reservas de titânio seja reduzida e o titânio metálico seja obtido e outra parte seja relegada para a cerâmica. A gente não tem que levar pelo lado da paixão, é o custo-benefício, quero dizer, quando for vantajoso o uso do metal se usa o metal, quando for vantajoso o uso da cerâmica se usa a cerâmica. Mas todos esses minérios que você situou têm aplicação em cerâmica.

## JORGE

(CERÂMICA E VELAS DE IGNIÇÃO NGK DO BRASIL)

*Na qualidade de fabricante de cerâmicas avançadas a gente vê que aqui no Brasil, pouco se tem preocupado com as normas técnicas. Tanto o Professor Edgar quanto o Professor Egon mostraram um aspecto geral de como está a cerâmica avançada tanto a nível mundial e pouco do que se faz aqui no Brasil. Então, uma preocupação que nós temos quando está tentando expandir para um mercado externo é exatamente alguma coisa que possa nortear o produto, a qualidade do produto, então a pergunta que eu tenho é como se encontra essa situação da normatização técnica aqui no Brasil?*

## EDGAR ZANOTTO

Bem, esse ponto é muito bem levantado e importante, e a resposta é zero, se encontra no nível zero. Nós estamos aprendendo ainda a trabalhar com cerâmica avançada. Muito pouca gente trabalhando, muito pouca gente formada, que eu saiba não há ninguém preocupado, ninguém trabalhando em relação à normatização.

## JORGE

*Então é o seguinte: nós estamos trazendo essa preocupação, começamos a discutir esta questão não só dentro da fábrica mas estamos tentando levar isso para fora. Uma sugestão que eu deixaria aqui, (principalmente para o Professor Egon que faz parte da Diretoria da Associação de Cerâmica) é que durante o Congresso de Cerâmica, que deverá haver no próximo ano, se inicie algum debate em torno desse tema. A pesquisa está aí, o mercado é super-competitivo e quando se está tentando ir para o exterior depende-se disso; então a sugestão é que no próximo congresso a gente abra um fórum de debates em torno desse tema.*