

## Secagem, Queima e Acabamento de Produtos Cerâmicos

Muitos processos de conformação de peças cerâmicas requerem adição intencional de água à mistura de matérias primas iniciais. Uma vez que essas peças conformadas vão ser queimadas em altas



temperaturas, que transformaria essa água em vapor e literalmente levaria a explosão do produto, deve-se usar processos de secagem bem controlados para a remoção dessa água antes da etapa de Queima propriamente dita.

A Secagem é a remoção da água mecanicamente combinada e algumas vezes envolve a vaporização de aditivos orgânicos tais como plastificantes e ligantes. As cerâmicas que são conformadas sem a adição de água, incluindo muitos componentes eletrônicos, certas formas refratárias e isoladores como as velas de ignição, não requerem uma etapa de secagem antes da queima.

A Queima do produto cerâmico é uma das mais importantes etapas no seu processo de produção. É durante a queima que o produto à "verde" se "matura" - ou seja, que as suas propriedades e utilidades finais são desenvolvidas. São complexas as mudanças físicas, químicas e mineralógicas que ocorrem enquanto o material está sendo queimado.

Uma grande variedade de fornos (geralmente chamados de Kilns) são usados para efetuar a queima dos produtos cerâmicos e para a fusão de vidros. Métodos como lixamento, esmaltagem e soldagem a outros materiais são usados no acabamento de produtos cerâmicos.

## Secagem

A superfície e as partes mais finas de uma peça cerâmica vão sempre secar mais rápido. Isso leva ao desenvolvimento de trincas na superfície da peça. Para se evitar essa situação, costumasse aquecer inicialmente a peça em um ambiente fechado com uma umidade relativa mantida alta na superfície e nas partes mais finas da peça. Quanto maior for a umidade do ar circundante à peça, mais lenta vai ser a taxa de evaporação da água na superfície da peça. A peça vai secar uniformemente se inicialmente a taxa de evaporação na superfície for mantida praticamente igual à taxa de infiltração (ou difusão) da água do interior da peça para a sua superfície. A temperatura de secagem pode ir sendo gradualmente aumentada e a umidade gradualmente diminuída. O estágio final da secagem vai ser feito sob umidade muito baixa e a temperaturas maiores que 100° C, a temperatura de ebulição da água. Isso deve resultar em uma peça seca e isenta de trincas de encolhimento. Utiliza-se algumas vezes envolver as peças, principalmente suas partes mais finas em panos úmidos durante a parte inicial da secagem. Deve-se também usar uma ventilação constante do ar em volta da peça de forma a não deixar desenvolver uma camada saturada de água na sua superfície.

Produtos com seções transversais muito delgadas ou que tenham baixo conteúdo de água podem ser secos simplesmente por uma circulação de ar em uma área ligeiramente morna.

A maioria dos produtos, no entanto requerem que a secagem seja processada em fornos secadores onde temperatura, umidade e circulação de ar possam ser controlados. Para a facilidade de manuseio, o produto é usualmente colocado em carros transportadores que podem descarrilar-lhe tanto para dentro quanto para fora dos secadores. Hoje em dia já se está usando secagens assistidas por vácuo e por microondas.

Quando uma grande variedade de artigos estão sendo produzidos é necessário utilizar-se secadores ciclicamente programados. Esses secadores consistem de câmaras que uma vez preenchidas com os produtos a serem secos, são aquecidas através de uma programação envolvendo tempo-temperatura-umidade. Quando termina o ciclo de secagem, o forno secador é parcialmente resfriado e os produtos secos são removidos. Quando se esvazia o forno, um novo carregamento de produtos é efetuado, e o ciclo de secagem é repetido.

Secadores à túnel são secadores contínuos que são adequados para uma operação contínua de queima. Eles consistem de longas câmaras através das quais o produto é lentamente empurrado para dentro. Ao longo de toda a extensão do túnel, várias zonas de temperatura e umidade constantes são mantidas.

No caso de produtos cerâmicos granulados, como os cimentos por exemplo, pode-se usar bandejas secadoras com o material espalhado sobre elas, que se movem progressivamente através de uma câmara de secarem. Esses materiais também podem ser secos em um secador rotatório, que consiste de longo cilindro ligeiramente inclinado da horizontal e lentamente girado em torno de seu eixo. O ar quente é soprado a partir da parte mais baixa e retirado na sua parte mais alta. O material ainda úmido é alimentado na parte mais alta e descarregados já secos na parte mais baixa.

## Queima ou Cozimento do Corpo Cerâmico

A maturação de um corpo cerâmico pode ocorrer de duas maneiras:

Por **Vitrificação**: quando, durante a queima, ocorre a formação de uma quantidade grande de fase vítrea no produto.

Por **Sinterização**: quando pequena ou mesmo nenhuma quantidade de líquido é formada durante a queima do produto.

Em ambos os casos o resultado final da queima são os mesmos – ou seja, a redução ou a quase total eliminação dos poros, acompanhada pelo encolhimento e aumento na densidade do produto, e uma junção dos grãos cristalinos ou seus constituintes mineralógicos individuais de modo a formar um massa rígida e resistente.

A maioria das cerâmicas, incluindo todos os produtos de cerâmica branca, produtos estruturais de argila e refratários argilosos, sofrem vitrificação durante a queima. Os termos, não vitrificado, semi-vitrificado e vitrificado são descritivos da quantidade de porosidade presente no produto final (Normas ASTM C242-90a). A maioria dos produtos cerâmicos vitrificáveis contém argila ou talco junto com outros silicatos.

Quando se aumenta a temperatura do corpo, as impurezas carbonáceas são eliminadas, a água quimicamente ligada as matérias primas é evoluída e os carbonatos e sulfatos começam a se decompor. Todos esses processos produzem gases que devem escapar do produto passando para a sua superfície através dos seus poros.

Com o posterior aquecimento, alguns dos minerais começam a se transformar em novas formas estruturais, e os fluxos presentes começam a reagir com os minerais que estão se decompondo para formar líquidos de silicatos viscosos ou fases vítreas. (Se essa formação de líquido procede rapidamente pode começar a bloquear os poros antes que todos os gases sejam ventilados para fora e o corpo cerâmico pode inchar em um processo indesejável conhecido "bloating").

Quando a temperatura vai sendo ainda mais aumentada, mais líquido vai se formando que começa, por forças de tensões superficiais, a empurrar os grãos não derretidos para junto um dos outros, provocando o encolhimento e o aumento de densidade da peça. Se o processo de formação de fase vítrea (líquida) se estende por muito tempo (ou porque a temperatura é muito alta ou porque o tempo de permanência naquela temperatura é muito longo), a massa cerâmica vai se tornando muito líquida e não mais conseguindo suportar seu próprio peso. Quando isso ocorre, a massa vai se deformar e/ou empenar, e o artigo se torna sem utilidade. Algumas vezes pode-se eliminar esse empenamento suportando a peça com formas refratárias especiais conhecidas como mobília de fornos cerâmicos. Quando se tenha atingido um grau de maturidade próprio- densidade e quantidade remanescente de porosidade apropriadas – deve-se resfriar o artigo. O resfriamento provoca que a fase líquida (vítrea) se torne rígida e forme uma ligação rígida entre os remanescentes grãos cristalinos.

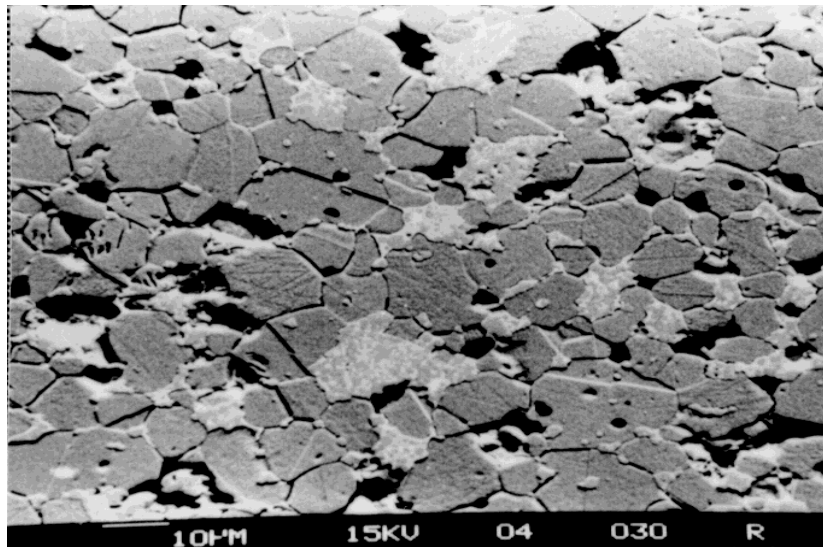
Uma microestrutura típica de uma cerâmica que tenha passado por vitrificação é dada por amostras de porcelana. Nela, grandes grãos de quartzo podem ser vistos circundados por fase vítrea. Vários cristais com aparência de agulhas são de mullita ( $3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ ) e alguns amontoados são de argilas não decompostas.

O papel dos grãos de "flint" de poteria (sílica) na vitrificação da porcelana é crítico. A sílica passa por várias mudanças de estrutura cristalina durante o aquecimento e resfriamento da peça. Essas mudanças, chamadas transformações polimórficas, resultam em uma mudança abrupta em volume com uma conseqüente tendência a provocar o trincamento dos grãos; tais trincas podem se propagar através do produto.

O quartzo comum se transforma abruptamente em uma forma conhecida como alto quartzo (quartzo  $\beta$ ) quando aquecido até  $573^\circ$ . Se o corpo ainda não está "maturado" tudo bem, essa grande mudança em volume devido a transformação polimórfica pode ser acomodada sem gerar trincas. Se tem fase líquida presente, esse alto quartzo pode lentamente ser convertido em outra forma cristalina (tridimita) em temperaturas acima de  $867^\circ C$  e para uma forma chamada cristobalita acima de  $1470^\circ C$ . Geralmente se forma alguma cristobalita quando o produto cerâmico é queimado em altas temperaturas, mas a maioria dos grãos de sílica permanecem não convertidos na forma de quartzo  $\beta$ . Deve-se portanto Ter cuidado com as transformações que podem ocorrer no resfriamento. Abaixo de  $600^\circ C$  o quartzo  $\beta$  vai abruptamente se transformar em quartzo comum com uma repentina mudança em volume. Se o corpo já está suficientemente maturado, ou seja rígido, essa transformação vai causar sérios problemas de trincas no produto final. Por essa razão o resfriamento do produto na faixa dos  $600-500^\circ C$  deve ser feito de maneira muito lenta. A moagem da sílica em partículas bem finas ajuda em alguns casos a superar esse problema. Nos produtos cerâmicos queimados em ciclos rápidos (fast-fire ceramics – como aqueles revestimentos cerâmicos feitos por mono-queima "single-fired"; o produto é queimado junto com o seu esmalte), substitui-se parte da sílica por alumina, que não sofre transformações alotrópicas nem no aquecimento e nem no resfriamento.

As cerâmicas que consistem de óxidos puros tais como as de  $Al_2O_3$ ,  $MgO$ ,  $BaTiO_3$  e as ferritas e que não contém qualquer constituinte de fase vítrea, não passam por vitrificação. Ao invés disso sofrem sinterização que é um processo acompanhado por vários tipos de mecanismos de movimentação atômica. Quando um artigo que consista de grãos desses óxidos compactados é aquecido, os seus átomos se movem um a um a partir de pontos de contato entre os grãos para as paredes dos poros, resultando numa união dos grãos individuais até a obtenção de uma massa coerente. Usualmente são necessárias temperaturas muito altas para conduzir, à uma taxa razoável, a densificação. A taxa de densificação é aumentada se o tamanho de grão inicial for diminuído. Frequentemente, pequenas adições de outros óxidos podem aumentar a taxa de sinterização de um material puro através da formação de pequenas quantidades de fase líquida nos pontos de contato entre os grãos. Quando a maioria da porosidade é removida, um alargamento gradual dos grãos (crescimento de grãos) pode ser observado.

Uma microestrutura típica de um produto sinterizado mostra os grãos principais, as fases intergranulares e alguma porosidade remanescente do próprio processo de sinterização ou arrancados durante a preparação ceramográfica.



## Atmosfera de Forno

A composição da atmosfera na qual um produto cerâmico é queimado tem uma forte influência nos resultados da operação, independentemente se o produto passa por vitrificação ou por sinterização. O teor de oxigênio da atmosfera dentro do forno é particularmente importante.

Se a atmosfera tem suficiente oxigênio para permitir que a cerâmica absorva algum oxigênio, essa atmosfera é dita oxidante; se a atmosfera tende a roubar oxigênio da cerâmica, é dito que a atmosfera é redutora. Quando uma cerâmica absorve oxigênio da atmosfera, ela pode queimar carbono e converte todos os compostos instáveis presentes para óxidos. Se ocorre uma atmosfera redutora, íons de valência variáveis presentes na cerâmica tenderão a mudar para seu estado menos positivo, resultando em mudanças nas características óticas (especialmente cor), elétricas etc.

As atmosferas dos fornos aquecidos por combustão terão uma mistura de gases como o  $CO_2$ ,  $N_2$ ,  $CO$ ,  $O_2$ ,  $H_2O$  e usualmente algum  $SO_2$ . Se presente em grandes quantidades o  $SO_2$  é bem prejudicial para as cerâmicas. Nesse caso, a prática comum tem sido o uso de muflas nos fornos. A mufla é um recinto no qual o produto pode ser colocado de forma que os gases de combustão que passam pelo lado de fora da mufla nunca entrem em contato com o produto. A mufla também protege o produto de ser inflamado o que pode provocar encolhimentos diferenciados durante a queima. Se não se tem disponível uma mufla, ou se proteção extra se faz necessária, "saggers" (caixas de argila refratárias em que se leva louças de barro para cozer) são utilizadas.

## Fornos Cerâmicos (KILNS) -

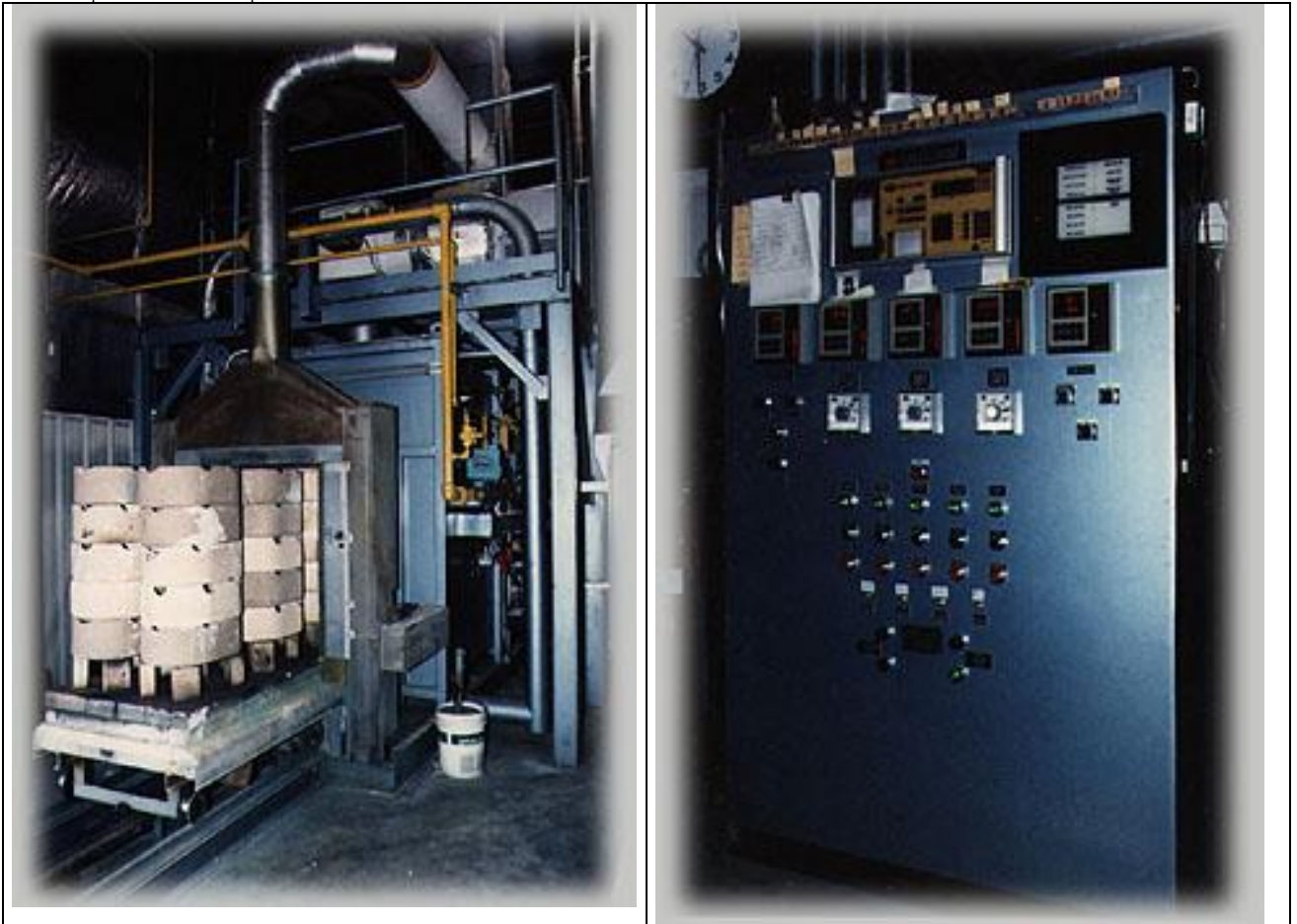
Estrutura na qual um material ou produto é queimado, calcinado, sinterizado, ou de outra forma submetido a temperaturas elevadas.



O forno no qual se dá a queima de produtos cerâmicos, comumente chamado de kiln, pode ser classificado ou como periódico (intermitente ou de bateladas) ou à túnel (contínuo), dependendo de sua construção e modo de operação.

Um kiln periódico é aquele no qual todo o forno é aquecido e resfriado de acordo com um programa (schedule) particular para aquele produto;

Um kiln à túnel, por outro lado, mantém continuamente certas zonas de temperatura e o produto é movido de uma zona para outra para atender o requerido ciclo de tempo-temperatura. A figura abaixo mostra um tipo de forno à túnel e seu painel de controle.



O forno periódico é mais flexível uma vez que se pode mudar os ciclos tempo-temperatura para diferentes tipos de produtos. O forno à túnel é mais econômico em termos de trabalho (para carregar e descarregar os produtos no forno) e combustível (embora os revestimentos fibrosos e o isolamento nos carros fornos -kiln car - tenham tornado os fornos periódicos eficientes) mas é relativamente inflexível, sendo limitado para a queima de longas jornadas envolvendo somente um tipo de produto. Muitas fábricas adotam ambos os tipos de fornos, sendo que os periódicos são usados para as linhas de produtos especiais e os fornos à túnel para os produtos de linha padrão e alto volume de produção. O investimento inicial para o forno à túnel é alto, e sistemas de controle mais sofisticados que os dos fornos periódicos são requeridos.

Entrar na home page indicada abaixo e obter informações sobre os diferentes tipos de fornos cerâmicos.

UNIQUE/PERENY has been designing and fabricating a broad range of kilns, furnaces, ovens and thermal systems for over 50 years. These include box type, car bottoms, shuttles, elevator, onveyorized and tunnel type units; many of which are exclusive designs not normally supplied by other companies. (<http://www.hed.com/index.html>)

Os fornos periódicos consistem de uma única câmara forrada e selada por refratários, possuem portinholas para entrada dos gases quentes (burner port) e saídas para os produtos de combustão. A



menos que seja construído com uma muflo, o forno aquece o produto pela passagem de gases quentes de combustão através dos produtos.

Nos fornos de sucção para baixo - downdraft kiln (corrente de ar descendente), também chamados de fornos colméia - beehive kiln, a soleira ou fornalha (hearth) é forrada com refratários perfurados com muitas aberturas para permitir que os gases saiam para o subsolo.

Deve-se ter cuidado que gases de baixo ponto de orvalho não comecem a condensar água nos produtos nas partes mais frias do forno durante os primeiros estágios de aquecimento.

Esses fornos são carregados e descarregados a mão, resultando em considerável custo de mão de obra. Eles não podem ser descarregados até que o forno esteja frio o bastante para permitir que as pessoas possam trabalhar no seu interior, o que significa que em períodos longos o forno fica improdutivo. Um ciclo total de várias semanas é comum para grandes fornos de sucção para baixo.

O forno "shuttle" é um forno popular do tipo periódico onde o produto é carregado em um carro que chega até a câmara de queima. Após a queima, a porta do forno é aberta e o carro do forno pode sair tão logo os refratários e os produtos estejam frios o suficiente para resistir ao choque térmico envolvido no processo. Dessa forma o forno não precisa ser completamente resfriado e se perde pouco tempo entre os ciclos.

Os fornos elevadores são também populares como fornos periódicos de turnos rápidos. A carcaça do forno (paredes e o teto) podem ser elevados (forno de cume tipo sino) enquanto que a sua base permanece no nível do solo. Depois que o produto é colocado na soleira (geralmente em um carro transportador), o resto do forno é abaixado até circundar toda essa base. Depois da queima, a carcaça do forno é levantada antes que o produto esteja completamente resfriado, encurtando o tempo improdutivo que representa o período de resfriamento. Em alguns projetos de fornos elevadores a carcaça do forno é fixada acima da base da fábrica, e a soleira (fornalha) é elevada até o nível para que então se dê a queima.

O forno à túnel ou forno contínuo consiste de uma câmara refratária, geralmente vários metros de comprimento, através dos quais o produto é lentamente movido para passar por um gradual aquecimento e um lento resfriamento. O túnel é mantido cheio de produtos ao longo de todo o seu comprimento. A zona de temperatura mais alta, ou zona de queima, é geralmente perto do meio do comprimento do túnel; essa é a zona onde a maioria dos queimadores estão localizados. A primeira seção do túnel onde o produto a verde entra no forno é chamada de zona de pré-aquecimento. Uns poucos queimadores são localizados nessa zona, com a maioria deles concentrados perto do começo da zona de queima. A seção final do túnel é chamada de zona de resfriamento. (na realidade, os modernos fornos à túnel e os fornos de soleira móvel têm várias subzonas controladas dentro das quais existem três principais zonas.)

Grandes ventiladores localizados no final da zona de resfriamento forçam a entrada de ar frio nessa zona. Esse ar frio passa pelos produtos que estão sendo resfriados, roubando calor deles e acelerando o processo de resfriamento. O ar quente resultante desse processo é soprado para a zona de queima, onde aumenta a eficiência da combustão e também assegura uma atmosfera oxidante. Os produtos de combustão quente são soprados da zona de queima para a zona de pré-aquecimento onde eles perdem calor ajudando a aquecer o produto não queimado. Finalmente esses produtos de combustão resfriados são exauridos através da chaminé da zona de pre-aquecimento antes que eles encontrem produtos tão frios que provoquem uma condensação desses gases na forma de umidade sobre os produtos. O modelo de fluxo nos fornos à túnel é portanto: o produto se move através do túnel em uma direção, pegando calor na zonas de pré-aquecimento e de queima e dando de volta esse calor na zona de resfriamento; os gases se movem através do túnel na direção oposta, pegando calor do produto nas zonas de resfriamento e de queima e dando calor na zona de pré-aquecimento. Uma eficiência térmica muito alta é o resultado dessa complicada operação. Geralmente o ar de fora é soprado através de uma dupla parede e duplo telhado para dentro da zona de resfriamento de modo a pegar qualquer desperdício de calor e ser aproveitado nos secadores.

O movimento de produtos através de grandes fornos à túnel são realizados por carros refratários que se deslocam em trilhos. Os carros são geralmente empurrados para dentro da zona de pré-aquecimento em escalas de tempo pré-fixadas. Uma vez que o túnel é mantido completamente cheio de carros, quando se empurra um para dentro da zona de pré-aquecimento se força um carro a sair da zona de resfriamento - ao mesmo tempo cada carro dentro do forno se move de um comprimento para frente. Algumas vezes são usadas correias transportadoras ao invés de carros-forno para transportar os produtos. Se parte do forno onde fica a fornalha é móvel é possível obter ciclos de queima bem rápidos e mais flexíveis que os dos fornos à túnel convencionais. Esses chamados "rollers kilns" são agora usados em muitos setores da indústria cerâmica para queimar uma diversidade de produtos desde os componentes de circuitos eletrônicos até produtos da indústria de sanitários.

Materiais cerâmicos não consolidados podem ser calcinados em fornos rotatórios, que são tubos cilíndricos de aço forrados com refratários. Os "rotatory kilns" podem ser bem longos (vários metros) com alguns metros de diâmetro

## Fusão de Vidros

A fusão de matérias primas para formar vidros é comumente realizada em fornos grande e rasos, tipo piscina - "pool-type", chamados tanques de vidros (glass tanks). A parte de baixo (base) do tanque é construída de blocos refratários especiais capazes de manter uma piscina de vidro derretido a vários metros de profundidade. Acima do nível da superfície do vidro estão as paredes que contêm as portas dos queimadores limitados por um teto na forma de coroa. O aquecimento praticamente ocorre por radiação a partir da coroa quente até o vidro. Compartimentos grandes recobertos com refratários, chamados de câmaras de checagem ou regeneradores, são dispostos ou em um terminal ou ao longo e abaixo do tanque. O propósito desses regeneradores é capturar uma parte do calor dos gases de exaustão e usá-lo para pre-aquecer o ar usado na combustão.

Uma parede refratária, chamada "bridge wall" divide alguns tanques em duas regiões distintas. Na seção mais larga, a matéria prima é continuamente alimentada e fundida até produzir um líquido viscoso cheio de bolhas. A seção maior é a de refino. Ali o líquido perde as bolhas e adquire uma viscosidade própria para a conformação. Em alguns tanques, o vidro flui da seção de fusão para dentro da seção de refino através de uma passagem na "bridge wall". Essa passagem, ou garganta, está submersa abaixo da superfície do vidro de modo que somente o material já fundido é que passa para a seção de refino. Outros tanques usam um bloco refratário que sobrenada e impede que o material ainda não fundido passe para a seção de refino. O fluxo constante de vidro da região de fusão para a de refino ocorre porque o vidro está sendo continuamente removido do terminal de refino e enviado para a seção de conformação. É prática comum aumentar o aquecimento usando além do aquecimento da câmara por combustão um tipo de aquecimento elétrico. Esse procedimento utiliza o próprio vidro como um resistor e passa grandes quantidades de corrente através da piscina de vidro entre eletrodos de metal refratário imersos no banho.

Os vidros especiais e óticos não são normalmente fundidos em tanques. Grandes "containers" ou "pots" refratários são usados tanto para a fusão quanto para o refino desses vidros. Os "pots" são colocados dentro de um grande forno para aquecimento.

## Combustão

A fonte de calor da maioria dos processos industriais, incluindo a secagem e a queima de cerâmicas, é a combustão direta de um combustível com o ar. Os combustíveis mais usados nas indústrias cerâmicas são o gás natural, óleo combustível, gases do petróleo líquido e carvão. O ideal é queimar todo o carbono, hidrogênio e que o combustível tenha pouco enxofre. Para se Ter uma grande quantidade de gases quentes provindos da combustão desses combustíveis deve-se usar mais ar do que teoricamente seria necessário. Os produtos de combustão (quando se usa excesso de ar) de um combustível isento de enxofre geralmente consistem de CO<sub>2</sub>, CO, H<sub>2</sub>O, O<sub>2</sub> e N<sub>2</sub>. O N<sub>2</sub> vem do ar usado para fornecer oxigênio para a combustão. As quantidades relativas desses gases dependem do excesso de ar e da eficiência total da operação de combustão. Monitora-se a composição química dos produtos de combustão para otimizar essa operação. Hoje em dia já estão disponíveis muitos instrumentos para monitorar automaticamente a atmosfera do forno para um ou dois dos gases mais importantes tais como excesso de oxigênio e combustíveis não queimados.

O combustível mais conveniente para o uso é o gás natural.

## Acabamento

Muitos produtos cerâmicos podem ser tomados diretamente do forno, inspecionados e enviados para o cliente. Outros produtos entretanto precisam ser mais processados para poderem satisfazer as especificações dos clientes. Nesses casos o produto ainda não está totalmente formado até que a sua superfície tenha sido modificada e/ou revestimentos funcionais ou decorativos tenham sido aplicados.

Esses processos pós-queima são agrupados na categoria geral de operações de acabamento e podem incluir lixamento e polimento, aplicações de recobrimentos de proteção ou decoração, ou outras necessidades especiais. As cerâmicas avançadas devem ser cuidadosamente examinadas quanto a presença de falhas antes de serem embaladas para transporte até os clientes. Algumas vezes essas falhas tais como trincas podem ser visualmente detetadas. Outras vezes se fazem necessárias inspeções por líquidos penetrantes, técnicas de raios X e ultrassônicas.

Processos de impressão através de telas perfuradas ("screen") são largamente usados para imprimir filmes espessos de condutores, resistores e dielétricos sobre substratos cerâmicos e filmes decorativos sobre ladrilhos, utensílios institucionais (de estabelecimento, de prédios, artigos sanitários por exemplo, "institutional ware") e uma variedade de produtos cerâmicos domésticos. Impressão por almofada de transferência e transferência por decalques ("decals") são usados para impressão em superfícies planas ou contornadas.

## Lixamento

Pode-se alisar a superfície de um produto cerâmico usando-se os processos de esponjamento ou rebarbação. Retífica superficial e torneamento superficial são usados para produzir recessos recortados, superfícies contornadas e superfícies rosçadas (filetadas).

Fita cerâmica à verde (antes de ser sinterizada) para substratos eletrônicos é colocada no tamanho e forma desejados por recorte e puncionamento.

## Esmaltagem

Muitos produtos cerâmicos são esmaltados depois de sinterizados. Um esmalte é um vidro especial designado para ser fundido sobre a superfície de um corpo cerâmico e para aderir a sua superfície durante o resfriamento. Os esmaltes são usados principalmente para selar a superfície de cerâmicas porosas evitando a absorção de água ou outras substâncias. A superfície que se obtém é lisa e impermeável, também mais atrativa e mais fácil de limpar. Em isoladores de alta tensão, um esmalte assegura a manutenção de boas propriedades elétricas mesmo em durante dias chuvosos. Cores e texturas especiais podem ser desenvolvidas no esmalte proporcionando efeitos decorativos e apelos de venda.

O principal constituinte de um esmalte é sílica geralmente finamente moída, com a adição de constituintes ricos em alcalinos tais como óxidos de sódio e potássio para abaixarem o ponto de fusão do vidro e óxidos de alcalinos terrosos como o óxido de cálcio para conferir durabilidade química. O óxido de chumbo e o óxido de bórico são também freqüentes constituintes dos esmaltes (vidrados). A composição total é sempre ajustada de modo a controlar a expansão térmica do esmalte, que deve ser igual ou ligeiramente menor que a do corpo subjacente. Para colorir ou tornar os esmaltes opacos são usados aditivos. As técnicas para formulação de um esmalte de conhecida composição são discutidas no capítulo 9.

A maioria dos vidrados são preparados por moagem a úmido de várias matérias primas junto com uma "frita" especialmente preparada e comercializada. A frita é um vidro contendo todos os materiais originalmente solúveis, todos os óxidos colorantes e aqueles materiais que são tóxicos na forma não combinada. As fritas são produzidas comercialmente pela fusão e têmpera de um vidro feito dos constituintes químicos requeridos. A têmpera pode ser realizada vazando-se a frita fundida diretamente em água ou por têmpera entre rolos de laminação na qual a frita é temperada entre rolos de aço resfriados a água. Após a têmpera, a frita é moída, seca, embalada e enviada aos consumidores para uso em formulações de esmaltes e vidrados.

Para preparar o esmalte, a frita é colocada em um moinho de bola junto com argilas, água e outros materiais insolúveis e moídos até um tamanho de definido de partículas. Ligantes tais como detrina e goma arábica podem ser adicionados na aplicação. O "slip" (a lama) de vidrado moído pode ser aplicado à cerâmica por meio jateamento ou imersão, e modelos de decoração podem ser adicionados por impressão. Alguns processos para decorar superfícies e aplicar revestimentos de vitrificado (esmaltes ou vidrados cerâmicos) são conhecidos como bandagem ("banding"), pincelamento ("brushing"), vazamento ("pouring") e jateamento ("spraying").

Jateamento é usado em muitos processos industriais automatizados. O esmalte seca rapidamente sobre a superfície da cerâmica e usualmente a peça segue direto para a queima.

Aplicação de esmalte é comum na indústria de louças de mesa. Um operador coloca os pratos em suportes rotatórios que conduzem-os até as cabinas de jateamento do esmalte. Impressoras de almofadas múltiplo estágios são utilizadas para transferir imagens gravadas em uma placa que tem lama de esmalte colorida aplicada nela.

Os vidrados podem ser aplicados as cerâmicas à verde e/ou as cerâmicas completamente vitrificadas; entretanto, o produto é geralmente queimado até a consistência de "biscoito" (bisque fired). A queima até a consistência de biscoito consiste na queima té uma temperatura baixa suficiente para remover os voláteis e atingir o encolhimento quase que total do produto. Isso assegura melhor sucesso a operação de esmaltagem. O corpo e o esmalte seguem então para a queima de acabamento (glost-fired) que confere o brilho final do processo de esmaltagem. Os produtos de cerâmicas elétricas são freqüentemente maturados e depois esmaltados a uma temperatura mais baixa que a temperatura de maturação do corpo. Itens de custos mais baixos como as poteries cerâmicas podem freqüentemente serem jateadas no estado a verde e o corpo e o esmalte podem ser maturados juntos. (No processo chinês o corpo cerâmico é primeiro queimado até sua maturação; então se aplica o esmalte e matura-se o conjunto por queima em uma temperatura mais baixa. No processo da porcelana, o corpo queimado até a consistência de biscoito e o vidrado são maturados juntos na operação de "glost-firing"). Usualmente é necessário aquecer previamente o produto vitrificado antes da aplicação de lamas de vidrados; de outra forma pode não haver boa adesão.

Vários defeitos de esmaltagem podem ocorrer nos diferentes estágios de produção. Recobrimento imperfeito (crawling) ocorre quando a lama de esmalte não molha satisfatoriamente o corpo cerâmico. Pode-se corrigir isso mudando ou aumentando a quantidade de ligante orgânico na lama de vidrado. Reticulados de finas trincas (crazing) ocorrem se o vidrado maturado tiver coeficiente de expansão térmica mais alto que o do corpo cerâmico. Lascamento de esmalte em alguns pontos ocorre quando o esmalte maturado tiver um coeficiente de expansão térmica muito baixo comparado ao do corpo.

## **Metalização**

Algumas vezes se precisa juntar partes cerâmicas diretamente com partes metálicas, um processo que é especialmente comum na indústria de eletrônicos. O processo consiste de primeiro metalizar a superfície da cerâmica e então soldá-la com partes de hardware.

# **Aplicações Selecionadas para as Cerâmicas Avançadas**

São tão diversos os produtos cerâmicos hoje utilizados em aplicações técnicas sofisticadas que fica difícil uma perfeita classificação deles. Geralmente esses materiais são individualmente projetados para servir a uma aplicação específica de modo a otimizar um conjunto particular de propriedades requeridas. Muitas dessas cerâmicas técnicas modernas exibem propriedades que nunca antes sonhadas pelos ceramistas do passado. Em geral, a maioria desses produtos sofisticados são feitos a partir de matéria prima de alta pureza (muitas delas sintéticas e por isso mesmo caras), geralmente utilizando novas técnicas de conformação, tratamento especiais de sinterização e freqüentemente requerem extensivos acabamentos e testes antes de serem colocados em uso. Para distinguir essas cerâmicas técnicas de cerâmicas mais tradicionais, o termo cerâmicas avançadas, e simplesmente novas cerâmicas têm sido usados.

Uma listagem parcial das cerâmicas avançadas poderia incluir as cerâmicas estruturais de alta temperatura, as ferramentas de corte cerâmicas, os materiais para implantes de biocerâmicas, os revestimentos para o ônibus espacial ( e outros materiais que funcionam como barreiras térmicas aeroespaciais), blindagem cerâmica, materiais para janelas aeroespaciais, fibras óticas, dielétricos com alta permissividade para capacitores , materiais para selagem, substratos multicamadas, materiais eletro-óticos, cerâmicas supercondutores, combustíveis nucleares cerâmicos, uma ampla variedade de recobrimentos cerâmicos, eletrólitos sólidos para baterias de alta temperatura, células à combustível, materiais magnéticos, materiais termistores, varistores, e assim por diante.

Os compósitos de matriz cerâmica (também chamados de CMCs) têm se tornado mais comuns nos últimos tempos. Os materiais compósitos com matriz cerâmica reforçados com fibras, whiskers ou plaquetas representam uma área bastante promissora. Um relatório recente do Centro de Análise de Informação em Cerâmica do Departamento de Defesa Americano previu que o mercado americano para compósitos de matriz cerâmica vai crescer a uma taxa anual de quase 15% e atingir os U\$ 500 milhões por volta de ano 2000.

Enquanto que as cerâmicas tradicionais são usualmente desenvolvidas em laboratórios de pesquisa e desenvolvimento industriais, uma grande variedade de cerâmicas avançadas resultaram de trabalho fundamental feito em laboratórios de universidades e governamentais. Esses desenvolvimentos ocorreram mundialmente, com o Japão na liderança por várias instâncias.

Uma medida da importância das cerâmicas avançadas para a moderna tecnologia é indicada pela existência de organizações tais como Associação de Cerâmicas Avançadas dos Estados Unidos ( United States Advanced Ceramic Association), e "Electronics, Nuclear Engineering Ceramics", e "Glass and Optical Materials Division of the American Ceramic Society". O mercado mundial para cerâmicas utilizadas em eletrônicas, automóveis, dispositivos óticos integrados, sistemas avançados de energia, biocerâmicas, e indústrias aeroespaciais está previsto ser de cerca de U\$ 18.8 bilhões por volta do ano 2000.

Além dos amplos espectros de propriedades úteis , existem motivos chaves para o sucesso da aplicação de cerâmicas avançadas.

Um desses motivos é o desenvolvimento de novos níveis de compreensão da ciência do processamento e fabricação de tais materiais que permitem fazer produtos com requisitos para tolerância de tamanho bastante extremos e com alto grau

de reprodutibilidade de suas características. Um segundo motivo chave é o reconhecimento que diferentes critérios, daqueles usados para materiais dúcteis, são necessários quando se projeta o uso de materiais duros, frágeis como os cerâmicos.

Tem sido crucial desenvolver métodos de testes que produzam valores “verdadeiros” para propriedades que possam ser usadas em cálculos críticos de projeto. Outros testes mais comuns são apropriados somente para julgamentos envolvendo controle de qualidade. Uma das razões para a formação da Associação Americana de Cerâmicas Avançadas foi a necessidade dos fabricantes trabalhar com novos procedimentos de testes adequados para cerâmicas avançadas.

Para dar uma visão dentro do espectro de características especiais e aplicações sofisticadas das cerâmicas avançadas, três tipos importantes – cerâmicas estruturais, eletrônicas e óticas – serão discutidas aqui em algum detalhe.



## Cerâmicas Estruturais



O termo cerâmicas estruturais é aplicado a materiais que possuem geralmente pequenos tamanhos de grãos, são virtualmente isentos de poros e possuem resistência à fratura muito alta, alta tenacidade à fratura e grande dureza.

Esses materiais encontram aplicações como componentes em motores e outras máquinas, anteriormente feitos de ligas metálicas. Muitas vezes têm formas intrincadas, são leves porém resistentes. Essas cerâmicas geralmente trabalham sob condições de carregamento dinâmico, envolvendo tensões de tração e de impacto, e freqüentemente devem funcionar a altas temperaturas e em ambientes corrosivos. Elas não devem ser confundidas com os produtos estruturais de argila que, apesar de usados como materiais de construção com importantes implicações como suporte de carga, são de estrutura grosseira, bem porosos e utilizados na sustentação de cargas compressivas estáticas em estruturas relativamente estacionárias e em ambientes não nocivos. Da mesma forma, as cerâmicas estruturais não devem ser confundidas com refratários pesados usados primariamente em aplicações de suporte de cargas compressivas em temperaturas elevadas, embora exista uma tendência crescente para se fazer usos de cerâmicas estruturais em lugares antes ocupados por refratários mais convencionais, ou seja certas zonas mais requisitadas de fornos e vasos de processamentos.

Os materiais de maior interesse como cerâmicas estruturais são carbetos de silício (SiC), nitreto de silício (Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>), certos óxidos como a zircônia (ZrO<sub>2</sub>) especialmente processados e uma variedade de compósitos de matriz cerâmica.

No caso de carbetos de silício e nitreto de silício, os materiais puros não se sinterizam sob condições ordinárias, de modo que eles freqüentemente são prensados à quente (hot pressed ou hot-isostatic pressed), geralmente com aditivos que forneçam uma pequena quantidade de fase líquida para assistir na obtenção de uma matriz com tamanho de grão refinado.

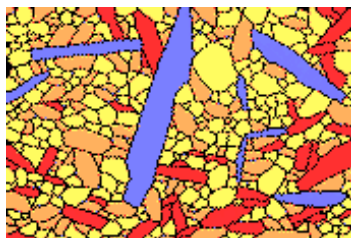
Várias técnicas têm sido desenvolvidas para a conformação desses materiais sem quase nenhum encolhimento durante a sinterização ou quase nenhuma necessidade de usinagens depois da fabricação. Esse processamento é conhecido como near-net-shape-forming.

Carbeto de silício (SiC): O chamado carbeto de silício ligado por reação (reaction bonded) é feito misturando-se pó de carbeto de silício com uma quantidade relativamente pequena de pó de carbono muito fino, compactando-se essa mistura para a forma desejada e em seguida aquecendo-se o compactado enquanto se infiltra nele silício fundido. O silício fundido reage com o carbono finamente granulado no interior do compactado para formar um carbeto de silício adicional, que serve para ligar os grãos de carbeto de silício originais. Após o resfriamento, o silício não reagido permanece como uma segunda fase que preenche poros na estrutura. Um material como esse, é na realidade um compósito de carbeto de silício e silício, e constitui um bom material cerâmico para uso abaixo da temperatura de fusão do silício.

Nitreto de silício (Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>): Pode-se também fabricar peças de nitreto de silício pelo método de ligação através de reação. Uma mistura de pós de nitreto de silício com pós de silício muito fino é prensado ou de outro modo conformado até formar um compactado poroso que é em seguida aquecido (abaixo da temperatura de fusão do silício) em atmosfera rica em nitrogênio. O nitrogênio penetra dentro dos poros, onde reage com as partículas finas de silício e formam nitreto de silício adicional que age para ligar o resto de pó presente na peça compactada.

O produto final tem uma porosidade residual, porém é bastante adequada para muitas aplicações estruturais.

Exemplo de microestrutura de cerâmicas de nitreto de silício. A forma alongada de alguns grãos faz aumentar a tenacidade dessas cerâmicas.



**Aumento da Tenacidade da Zircônia:** O uso de processos para aumentar a tenacidade da zircônia - ou seja, torná-la mais resistente à propagação de pequenas trincas, e portanto mais capaz de reter sua integridade estrutural sob condições de carregamento quando de outra forma poderia sofrer uma fratura frágil catastrófica - tem resultado na adoção desse material para muitas aplicações de cerâmica estrutural.

O aumento da tenacidade é dado por meio de uma distribuição uniforme de inclusões muito finas de zircônia na forma tetragonal (instável) dentro da matriz de zircônia estabilizada na forma cúbica (essa cerâmica é conhecida como zircônia parcialmente estabilizada). Quando uma trinca encontra uma dessas inclusões, parte da energia de propagação de trinca é absorvida na transformação da inclusão para a sua forma estável (monoclínica). Dessa forma a trinca é freada ou mesmo parada no seu movimento de propagação.

O mecanismo de reforço por meio de uma dispersão de finas inclusões de zircônia instável pode ser aplicado também a outros materiais tais como as cerâmicas de alumina. Essas cerâmicas resistentes e tenazes podem ser usadas em aplicações que sofrem alto desgaste tais como ferramentas de corte, matrizes de trefilação de fios e até mesmo com lâminas de corte em facas e tesouras que permanecem amoladas quase que indefinidamente. Nessas aplicações de alto desgaste também podem ser usadas cerâmicas de carbetto de boro (B4C), compósitos de matriz cerâmica e até mesmo diamante.

Um certo número de partes de um motor de combustão interna estão sendo feitas de cerâmicas estruturais. Essas partes incluem rotores e estatores para turbinas a gás ou "superchargers", enxertos em cabeçotes de pistão, cabeçotes e acentos de válvulas.

Em aplicações onde ainda não se faz adequado o uso de peças monolíticas inteiramente cerâmicas, se usa recobrir peças metálicas com barreiras térmicas cerâmicas para proteger o metal contra o calor e a corrosão.

Além do poder de manter a resistência em temperaturas muito altas, as cerâmicas estruturais são também menos densas que os metais, de modo que a grande redução em peso e inércia podem ser considerados como benefícios adicionais para a utilização de partes cerâmicas nos motores. Motores todo cerâmico poderiam operar sem resfriamento (os chamados motores adiabáticos), o que poderia aumentar a eficiência térmica; muito trabalho de desenvolvimento na direção desse objetivo está sendo conduzido.

Uma aplicação especialmente importante das cerâmicas estruturais envolve seus usos como blindagens de uso militar, protegendo veículos ou pessoas. Nesse campo de aplicação a chave é a capacidade de absorver energia cinética de uma bala ou qualquer partícula penetrante pela formação de um reticulado de microtrincas propagantes.

Compósitos de matriz cerâmica reforçadas com fibras apresentam-se bastante promissores para substituir monólitos de cerâmicas estruturais nas aplicações de blindagens. Além de suas qualificações como absorvedores de choque e de frenagem de projéteis, as blindagens cerâmicas possuem um benefício adicional de serem leves quando comparadas com as metálicas de igual potência.

Certos materiais cerâmicos podem ser usados em aplicações estruturais no corpo humano, essencialmente como substituições para o osso. Cerâmicas de alumina, especialmente preparadas, carbono vítreo, apatita sintética (fosfato de cálcio) e mesmo certos vidros são biocompatíveis; o corpo humano não vai somente tolerá-lo como implantes mas também incorporá-los pelo inter-crescimento de tecido para dentro dos poros. A necessidade de ganhar a aprovação da US Food and Drug Administration e a complexidade e demora nos testes clínicos associados com o processo de licenciamento desses materiais têm retardado a implementação de implantes biocerâmicos, porém os resultados de testes em animais são bastante promissores.

## Cerâmicas Eletrônicas



Literalmente existem centenas de aplicações de cerâmicas avançadas que dependem primariamente da reação do material a campos elétricos ou magnéticos aplicados. Alguns desses materiais são enumerados aqui junto com uma



breve descrição das características especiais que os tornam úteis para certas aplicações. Em muitos casos, existem também requisitos quanto as propriedades térmicas e mecânicas que devem ser satisfeitos.

### Isoladores de Cerâmicas Tradicionais.



***Porcelain housed surge arresters of type MWB protecting cable end terminals***

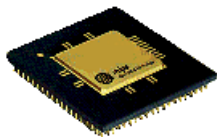
Muitos materiais cerâmicos são isolantes elétricos. Conseqüentemente têm sido usados durante anos com isoladores de corrente elétrica contínua e alternada de baixa freqüência, isoladores suspensos em linhas de transmissão de alta voltagem, bases de lâmpadas e chaveamentos. Esses isoladores têm sido tradicionalmente feitos de porcelanas a base de argilas e não são usualmente incluídas na categoria de cerâmicas avançadas. Por outro lado, a utilização de cerâmicas avançadas adequadas para aplicações exóticas estão crescendo muito rapidamente.

### Isoladores Elétricos de Cerâmicas Avançadas

Os mais usados são as cerâmicas de alumina,  $Al_2O_3$ , berília, BeO, nitreto de alumínio, AlN, e uma gama de vidros especiais, incluindo aqueles que podem ser convertidos em formas cristalinas após conformação (vitro-cerâmicas). As propriedades elétricas mais importantes desses materiais isolantes são a condutividade muito baixa, baixa constante dielétrica (uma baixa tendência à polarização ou armazenar carga), uma alta resistência dielétrica (resistência à ruptura sob altas quedas de voltagem) e para aplicações de alta freqüência, baixas perdas dielétricas (baixa propensão para converter a energia no campo alternado em calor).

### Substratos Eletrônicos:

Uma variedade de formas pode ser feita a partir de cerâmicas isolantes, muitas delas são tão intrincadas que podem ser feitas por moldagem por injeção ou prensagem isostática seguida de usinagem e acabamento. Uma aplicação especialmente importante de isolamento cerâmico é como substratos para deposição de circuitos de filmes espessos e finos. Os substratos são geralmente feitos de placas finas (uns poucos mm) por meio da tecnologia de "tape-casting" (colagem de fitas).



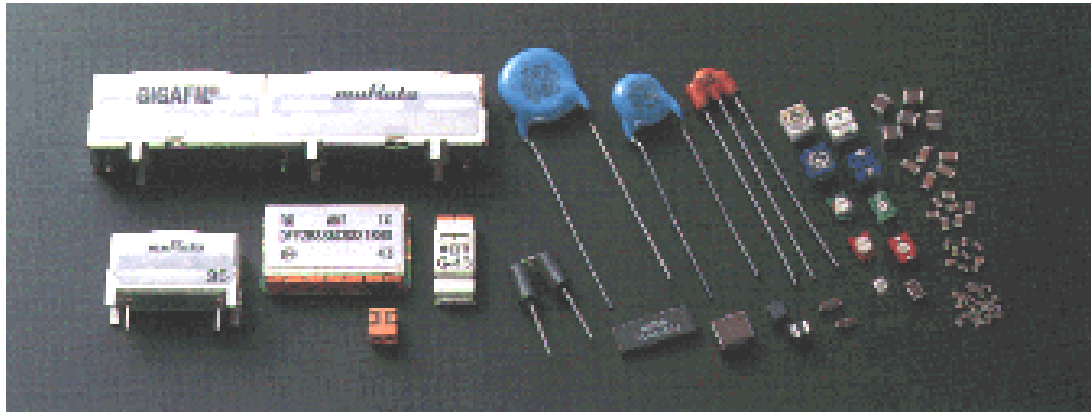
Freqüentemente, dispositivos eletrônicos discretos tais como chips de silício ou capacitores discretos são fixados ao circuito formando o que é conhecido como circuitos híbridos. Também são usados substratos cerâmicos em multicamadas. Esses substratos de multicamadas são feitos por impressão de circuitos em fitas cerâmicas à verde - não sinterizadas - (fitas ou tapes - porque são feitas por tape-casting) usando tintas metálicas, empilhando-as uma sobre as outras, laminado-as para formar uma estrutura sanduíche e em seguida co-queimando a cerâmica e a tinta metálica para formar um único substrato de multicamadas.

### Substratos em Multicamadas

Os circuitos elétricos sobre as diferentes camadas de uma estrutura em multicamadas são conectados em pontos apropriados por meio de furos preenchidos por metais, chamados de vias, nas camadas cerâmicas que precisam se conectar umas com as outras.

Os substratos não somente suportam a distribuição dos circuitos como também funcionam como um meio para dissipar o calor gerado nos circuitos elétricos, absorvendo ou transferindo esse calor para um sistema de escoamento de calor

conctado a eles. Quando os substratos e seus circuitos elétricos associados são ajustados com as conexões externas e são encapsuladas para proteger os circuitos do ambiente atmosférico, diz-se que a montagem inteira é um pacote eletrônico (electronic package).

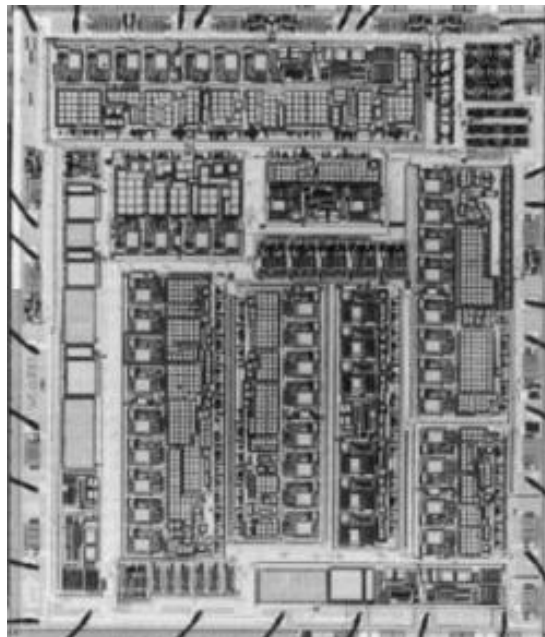


## Dielétricos para Capacitores

### Componentes Discretos -

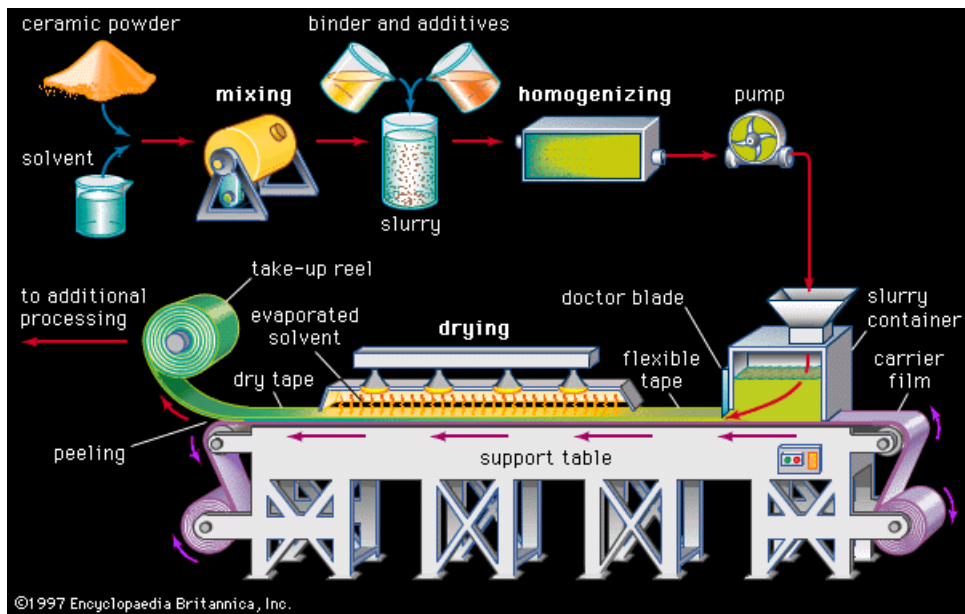
Os isoladores cerâmicos são também comumente usados como dielétricos em capacitores - isto é, como o material colocado entre as placas de um capacitor para servir como meio armazenador de carga. Qualquer material isolante pode ser usado nessa aplicação, mas é desejável se usar materiais que permitam a maior quantidade de carga armazenada (capacitância) no menor dispositivo possível. Essa consideração significa que deve-se usar materiais com alta constante dielétrica. Além dessa alta constante dielétrica, um dielétrico usado em capacitores deve ter alta resistência dielétrica, baixas perdas dielétricas e exibir mínimas variações nessas propriedades com a temperatura e/ou voltagem. O grupo mais importante dos materiais dielétricos cerâmicos consiste de combinações do titanato de bário ( $\text{BaTiO}_3$ ) com uma variedade de outros óxidos usados para modificar suas propriedades fundamentais. Os dielétricos usados em capacitores são freqüentemente fabricados na forma de pequenos e finos discos ou como tubos ocos de finas paredes, com uma camada metálica depositada sobre cada lado por técnicas de filmes espessos.

### Chip Capacitor



### Chip com larga escala de Integração - Vista interna do Integrado

Uma forma muito importante, e que está crescendo rapidamente, de capacitor cerâmico de alta capacitância, chamado "chip Capacitor", é feito por um processo similar ao usado para substratos cerâmicos multicamadas. Tiras muito finas de dielétricos a base de titanatos são produzidos por "tape casting", e um modelo (pattern) de eletrodos é impresso sobre um dos seus lados. Muitas camadas de fitas são então empilhadas umas sobre as outras e laminadas juntas.



Processamento Cerâmico para obtenção de máscaras para Chips (tape-casting).

Chips individuais são cortados desse laminado e queimados (sinterizados) para maturar o sanduíche metal-cerâmica. Esses diminutos chips capacitores são soldados diretamente sobre as placas de circuito impresso

## Condutores Iônicos

Alguns materiais cerâmicos são isoladores elétricos com respeito ao movimento dos elétrons porém exibem condutividades elétricas mensuráveis por causa da possibilidade de certos íons se moverem através do material quando um campo elétrico é aplicado. Tais materiais são conhecidos como Condutores Iônicos. Se a condutividade for relativamente alta, eles são chamados de condutores iônicos rápidos ou eletrólitos sólidos. Os mais importantes são o AgI ( $\text{Ag}^+$  sendo o íon que se conduz),  $\text{CaF}_2$  ( $\text{F}^-$  sendo o íon que se conduz), as chamadas aluminas-betas (que têm aproximadamente a fórmula  $\text{M}_{11}\text{O}_{17}$ , sendo M a prata ou um alcalino tal como o sódio, que se conduz), zircônia ( $\text{ZrO}_2$ ) dopado com cal ( $\text{CaO}$ ) ou óxido de ítrio (como  $\text{O}^{2-}$  sendo o íon que se conduz) e um número de vidros especiais (usualmente com íons alcalinos proporcionando a condução).

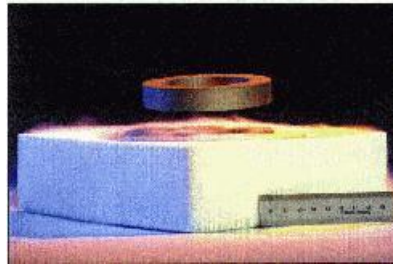
Geralmente, a condutividade dos condutores iônicos aumenta rapidamente com um aumento na temperatura, de modo que eles são quase sempre utilizados em temperaturas acima da temperatura ambiente, e algumas vezes em temperaturas bem altas. O comportamento dos condutores puramente iônicos permitem que eles sejam usados como eletrólitos sólidos em materiais de altas temperaturas e pilhas a combustível, e o fato de que somente um tipo particular de íon se move em um campo elétrico torna-os úteis como sensores daquele específico íon ( um exemplo é o uso da zircônia estabilizada como sensor de oxigênio em sistemas de exaustão de automóveis para sentir a eficiência do processo de combustão e ativar mudanças nas razões ar/combustível).

## Como Semicondutores:

Entre os mais usados para essas aplicações estão os óxidos dopados ou ligeiramente reduzidos (especialmente o ZnO) e o carbeto de silício. Esses materiais são comumente usados como varistores (resistência muda com a voltagem aplicada) e termistores (resistência muda com a temperatura). Os varistores são comumente usados para protegerem dispositivos de serem danificados por surtos de linha (tais como os causados por quedas de raios atmosféricos). O varistor funciona como uma válvula que está fechada a passagem de corrente normalmente porém se abre quando o varistor se torna altamente condutivo devido ao pico de voltagem, desviando assim a corrente de passar pelo dispositivo.

Os termistores podem ser usados como medidores de temperatura, e, se dopados de modo a ter um coeficiente de resistência positivo em relação a variação na temperatura (sua resistência aumentando com o aumento de temperatura) eles podem ser usados como elementos de aquecimento auto-limitadores (self-limiting heater elements). Nesse tipo de aplicação estão os "choke" (enriquecem a mistura combustível de um motor restringindo a entrada de ar no carburador). Os elementos "choke" se aquecem automaticamente nos motores de automóveis de modo que o "choke" se fecha rapidamente após a partida. Quando fabricados na forma de monocristais os materiais semicondutores podem ser usados para formar diodos de junções pn, e esses podem ser usados como transistores ou como diodos que emitem luz (os chamados LEDs- Light-Emitting Diodes) e mesmo como diodos laser (esses dois últimos pertencem a classe das cerâmicas óticas ou fotônicas).

## Como Supercondutores



Uma tremenda quantidade de interesse tem sido focalizado sobre um grupo de materiais cerâmicos especiais que funcionam como supercondutores em "altas temperaturas". Os supercondutores têm características extraordinárias por apresentarem resistência elétrica nula e repelirem completamente campos magnéticos. (Esse último efeito é chamado efeito Meissner). A primeira característica promete a substituição dos condutores comuns para garantir mais eficiência na transmissão de eletricidade e também a capacidade de construção de magnetos muito mais poderosos (sendo este o principal uso dos supercondutores atualmente). O efeito Meissner tem despertado grande interesse como um meio possível de levitação magnética de veículos, especialmente trens, para eliminar virtualmente todo atrito de trilhos e portanto permitir maiores velocidades e grandemente reduzir o consumo de potência. Todo material "supercondutor" reverte-se para "comum" acima de uma certa temperatura crítica. Entre a descoberta do fenômeno da supercondutividade em 1911 e 1986, um número de elementos metálicos e compostos têm sido verificados apresentarem o comportamento supercondutor, porém todos eles têm temperaturas extremamente baixas, com requisito de resfriamento em nitrogênio líquido ou mesmo hélio liquefeito para manter a supercondutividade; esse requisito (sistemas de resfriamentos grandes e caros) tem limitado a utilização prática de materiais supercondutores. Assim, em 1986, um material cerâmico (realmente um óxido complexo de cobre, bário e lantânio) foi descoberto com uma temperatura crítica de 40K.

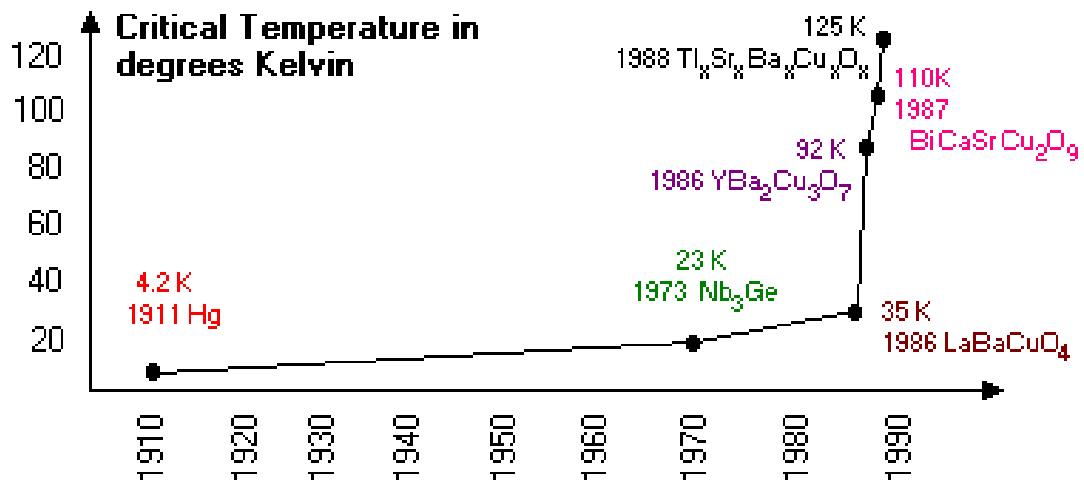
### At What Temperature Is High Temperature Superconductivity?

#### RELATIVE TEMPERATURE SCALE

Kelvin (K)	Celsius (C)	Fahrenheit (F)
160	-113	-171
93	-180	-292
77	-196	-320
50	-223	-370
36	-237	-394
20	-253	-423
4	-269	-452

O tremendo surto de interesse na investigação de composições cerâmicas similares resultou na descoberta em 1987 de um material com uma temperatura crítica tão alta quanto 90K. Desde então um número de óxidos cerâmicos supercondutores têm sido produzidos, a maioria deles contendo cobre, um alcalino terroso (tal como Sr ou Ba) e uma terra rara (tal como Y ou La). Tais condutores "supercondutores" oferecem a possibilidade mais barata de resfriamento com nitrogênio liquefeito.

O paço dessas descobertas tem dado esperança de que um dia um material supercondutor possa ser encontrado com uma temperatura crítica tão alta quanto a temperatura ambiente (cerca de 300K), que não precisasse de nenhum resfriamento para permanecer como supercondutor. Muita pesquisa continua na direção de produzir materiais com temperaturas críticas mais e mais altas, porém a temperatura ambiente está ainda muito acima das maiores temperaturas críticas conhecidas até hoje.



A maior parte dos usos potenciais de supercondutores requerem que o material esteja sob a forma de fios finos, uma forma bastante difícil de se produzir um material frágil como são os óxidos. Conseqüentemente, um grande esforço de pesquisa nesses materiais está concentrado em novas tecnologias de fabricação.

### Como Ferritas

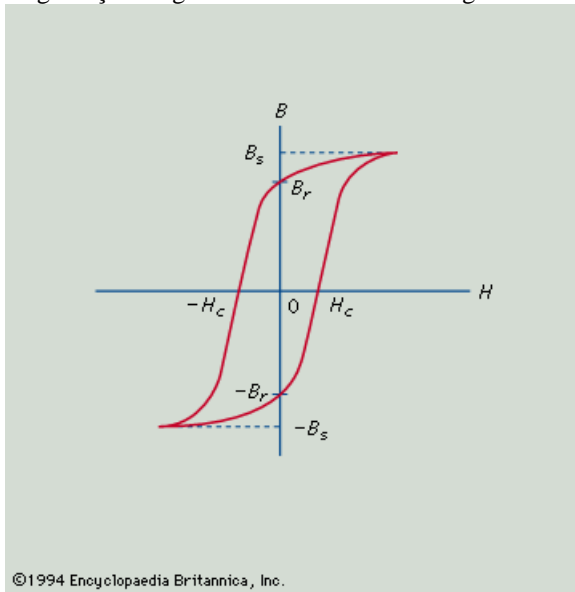


Existem três famílias de cerâmicas avançadas que encontram aplicações por causa de suas especiais propriedades magnéticas; esses materiais são chamados de *ferritas*. As ferritas espinélicas (estrutura cristalina típica dos espinéis - grupo de minerais do tipo AB<sub>2</sub>O<sub>4</sub> onde A é um metal ou mistura de metais divalentes, tais como Mg, Zn, Mn, Co, Ca, Cu, Ba, Ni, Sr e B é um metal trivalente, tal como o Al, Fe (íon férrico), e Cr).

As ferritas espinélicas são conhecidas como materiais magnéticos "moles", significando que é fácil reverter a direção de magnetização delas com um pequeno campo magnético aplicado. As ferritas espinélicas têm a fórmula geral MO.Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, onde M é um metal divalente tal como o Ni, Zn, Mg, Mn, Fe ou Co. As ferritas moles são usadas usualmente em núcleos de transformadores ou indutores de baixas perdas, onde suas baixas condutividades elétricas



inibem o aquecimento por correntes parasitas induzidas, que comumente leva a perdas quando se usa materiais magnéticos metálicos. Um uso especialmente importante das ferritas espinélicas é como partículas dispersas em meios de gravação magnéticos tais como fitas magnéticas e discos de memória de computador.



©1994 Encyclopaedia Britannica, Inc.

Curva de Histerese de uma ferrita.  $H_c$  - Campo Cercivo,  $B_r$  - Magnetização Remanescente e  $B_s$  - Magnetização de Saturação. Para ferritas moles  $H_c$  é pequeno e para ferritas duras  $H_c$  é grande.

As ferritas hexagonais magnetoplumbitas são conhecidas como *ferritas "duras"* ou magnetos permanentes por que eles são magnetizados por um forte campo aplicado durante a manufatura e vão reter essa forte magnetização permanentemente a partir de então.

As ferritas magnetoplumbitas têm a fórmula geral  $MO_6Fe_2O_3$ , onde M é primariamente Ba, porém outros íons alcalinos terrosos divalentes podem substituir alguma parte do Ba. Os materiais magnéticos duros são usados em trincos magnéticos, em motores elétricos, em auto-falantes e como materiais magnéticos nos processos de separação de minérios. Existe também certo interesse nas partículas de ferritas hexagonais como meio de disketes de computador de alta densidade.

Uma terceira classe de materiais cerâmicos magnéticos é conhecida como *ferritas de garnets*. Esses materiais têm a fórmula geral  $3M_2O_3 \cdot 5Fe_2O_3$ , onde M é uma terra rara tal como Y ou Gd; entretanto, extensiva substituição do M e do Fe por outros íons leva a uma capacidade de se poder projetar as propriedades magnéticas, uma potencialidade que tem feito esses materiais importantes nas aplicações de baixas perdas em microrondas. A composição mais comum nessa série de materiais é o garnet de ítrio e ferro, também conhecido como YIG.

### Cerâmicas Piezoelétricas:

Um grupo especial de cerâmicas isolantes encontram aplicações porque exibem o efeito piezoelétrico - ou sejam quando elas são elasticamente deformadas, elas geram uma voltagem, e quando uma voltagem é aplicada, elas sofrem uma deformação elástica.



# Piezo Ceramics

Tais materiais podem ser usados em vários transdutores eletro-mecânicos, incluindo geradores e detetores "sonar", limpadores ultrason, ressonadores de frequência fixa, captadores fonográficos e de microfones, e geradores de centelhas e ignidores (acendedores). Enquanto muitos materiais são conhecidos por mostrarem o efeito piezoelétrico na forma monocristalina (sendo o quartzo o exemplo mais comum), somente o grupo de materiais cerâmicos conhecido como



ferroelétricos (titanatos e zirconatos que exibem polarização elétrica espontânea, histerese elétrica e piezoeletricidade) podem apresentar a piezoeletricidade facilmente na forma policristalina. O material cerâmico ferroelétrico mais importante é o titanato de bário ( $\text{BaTiO}_3$ ), o zirconato titanato de chumbo (várias combinações de  $\text{PbTiO}_3$  e  $\text{PbZrO}_3$ , também designados cerâmicas PZT), e zirconato titanato de chumbo dopado com lantânio (também designado como cerâmicas PLZT).

## Cerâmicas Óticas ou Fotônicas

Para melhor apreciar como as cerâmicas eletro-óticas funcionam, é necessário se considerar a natureza da luz e de sua interação com dielétricos e semicondutores. A palavra fotônica tem sido usada para descrever o coletivo de propriedades óticas dos materiais e a aplicação dessas propriedades para torná-los dispositivos de úteis e um controle cuidadoso e entendimento melhor das propriedades dos materiais tem levado ao desenvolvimento de cerâmicas eletro-óticas.

Materiais com banda de energia proibida (gap) larga, tais como as cerâmicas isolantes, são inerentemente transparentes à luz na extensão de comprimentos de onda próximos ao visível, contanto que elas não contenham heterogeneidades internas que possam servir como sítios espalhadores de luz, os quais servirão para reduzir a transparência para translucidez ou até mesmo para uma total opacidade. Consequentemente, monocristais cerâmicos, vidros isentos de poros podem ser utilizados em aplicações fotônicas que requerem feixes de luz transmitida.

Se dizer que um material é transparente não significa que o material não interaja com a luz que o atravessa. Por exemplo, a velocidade com que ondas de luz viajam varia de material para material, tendo o seu valor mais alto no vácuo (essa velocidade sêda a constante universal  $c=3.00 \times 10^8$  m/s). Em todos os outros meios a luz viaja mais lentamente que  $c$ , com a razão de  $c$  para a velocidade real no material sendo chamada de índice de refração do material. Um feixe de luz irá curvar-se ao passar de um material para outro que tenha um índice de refração diferente. Esse princípio é usado quando lentes provocam a focalização ou divergência de feixes de luz. Na maioria dos materiais, esse comportamento é chamado de dispersão, e fundamenta a separação de diferentes comprimentos de onda a partir de um feixe de luz em diferentes quantidades de curvatura.

As ondas de luz que constituem um feixe de luz oscila perpendicularmente à direção de propagação do feixe. Sob condições normais, as oscilações são aleatoriamente orientadas em volta da direção de propagação. Entretanto, alguns materiais são capazes de modificar o feixe de luz que os atravessa, de modo que somente certas direções de oscilação passa. Esse fenômeno é chamado de polarização e aplicações muito importantes de luz requerem ou utilizam o fenômeno de polarização. Por exemplo, se um feixe de luz com uma certa polarização incide sobre um material que somente transmite a luz de uma polarização diferente, esse material efetivamente bloqueará a passagem do feixe.



Enciclopédia Britânica: Cerâmicas Óticas

Optical materials derive their utility from their response to infrared, optical, and ultraviolet light. The most obvious optical materials are glasses, but ceramics also have been developed for a number of optical applications. This article surveys several of these applications, both passive (e.g., windows, radomes, lamp envelopes, pigments) and active (e.g., phosphors, lasers, electro-optical components).

## OPTICAL AND INFRARED WINDOWS

In their pure state, most ceramics are wide-band-gap insulators. This means that there is a large gap of forbidden states between the energy of the highest filled electron levels and the energy of the next highest unoccupied level. If this band gap is larger than optical light energies, these ceramics will be optically transparent (although powders and porous compacts of such ceramics will be white and opaque due to light scattering). Two applications of optically transparent ceramics are windows for bar-code readers at supermarkets and infrared radome and laser windows.



Safira azul, espécie natural.

transparent to translucent, natural or synthetic variety of corundum (q.v.; aluminum oxide,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) that has been highly prized as a gemstone since about 800 BC.



Corundum, da espécie safira.

Sapphire (a single-crystal form of aluminum oxide,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) has been used for supermarket checkout windows. It combines optical transparency with high scratch resistance. Similarly, single-crystal or infrared-transparent polycrystalline ceramics such as sodium chloride ( $\text{NaCl}$ ), rubidium-doped potassium chloride ( $\text{KCl}$ ), calcium fluoride ( $\text{CaF}_2$ ), and strontium fluoride ( $\text{SrF}_2$ ) have been used for erosion-resistant infrared radomes, windows for infrared detectors, and infrared laser windows. These polycrystalline halide materials tend to transmit lower wavelengths than oxides, extending down to the infrared region; however, their grain boundaries and porosity scatter radiation. Therefore, they are best used as single crystals. As such, however, halides are insufficiently strong for large windows: they can plastically deform under their own weight. In order to strengthen them, single crystals are typically hot-forged to induce clean grain boundaries

and large grain sizes, which do not decrease infrared transmission significantly but allow the body to resist deformation. Alternatively, large-grained material can be fusion-cast.

## LAMP ENVELOPES

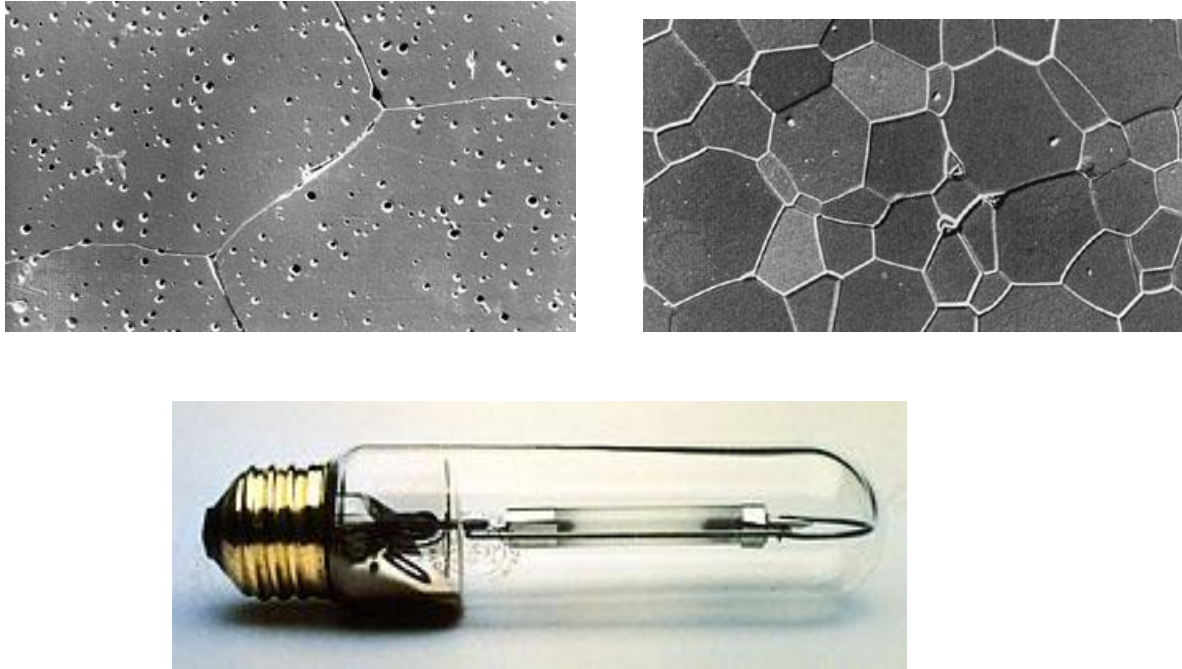


Figure 1: Opaque and translucent alumina.

(Top) In alumina solidified without chemical sintering aids, pores are trapped within the grains, scattering light and contributing to the material's opacity; (centre) with the use of magnesia as a sintering aid, pores remain on the boundaries between grains and diffuse from the material, contributing to its translucence; (bottom) translucent alumina can be made into cylindrical envelopes containing the hot gases that provide illumination for sodium-vapour lamps.

Electric discharge lamps, in which enclosed gases are energized by an applied voltage and thereby made to glow, are extremely efficient light sources, but the heat and corrosion involved in their operation push optical ceramics to their thermochemical limits. A major breakthrough occurred in 1961, when Robert Coble of the General Electric Company in the United States demonstrated that alumina (a synthetic polycrystalline,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) could be sintered to optical density and translucency using magnesia (magnesium oxide,  $\text{MgO}$ ) as a sintering aid. This technology permitted the extremely hot sodium discharge in the high-pressure sodium-vapour lamp to be contained in a material that also transmitted its light (see Figure 1). The plasma within the inner alumina lamp envelope reaches temperatures of  $1,200\text{ C}$  ( $2,200\text{ F}$ ). Energy emission is within the yellow portion of the visible spectrum. The sodium-vapour lamp is nearly three times as efficient as its nearest competitor. It is now so common that the skylines of major cities are dominated by its amber glow.

## PIGMENTS

The ceramic colour or pigment industry is a long-standing, traditional industry. Ceramic pigments or stains are made of oxide or selenide compounds in combination with specific transition-metal or rare-earth elements. Absorption of certain wavelengths of light by these species imparts specific

colours to the compound. For example, cobalt aluminate ( $\text{CoAl}_2\text{O}_4$ ) and cobalt silicate ( $\text{Co}_2\text{SiO}_4$ ) are blue; tin-vanadium oxide (known as V-doped  $\text{SnO}_2$ ) and zirconium-vanadium oxide (V-doped  $\text{ZrO}_2$ ) are yellow; cobalt chromite ( $\text{CoCr}_2\text{O}_3$ ) and chromium garnet ( $2\text{CaO} \cdot \text{Cr}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{SiO}_2$ ) are green; and chromium hematite ( $\text{CrFe}_2\text{O}_3$ ) is black. A true red colour, unavailable in naturally occurring silicate materials, is found in solid solutions of cadmium sulfide and cadmium selenide ( $\text{CdS}$ - $\text{CdSe}$ ).

Powdered pigments are incorporated into ceramic bodies or glazes in order to impart colour to the fired ware. Thermal stability and chemical inertness during firing are important considerations.

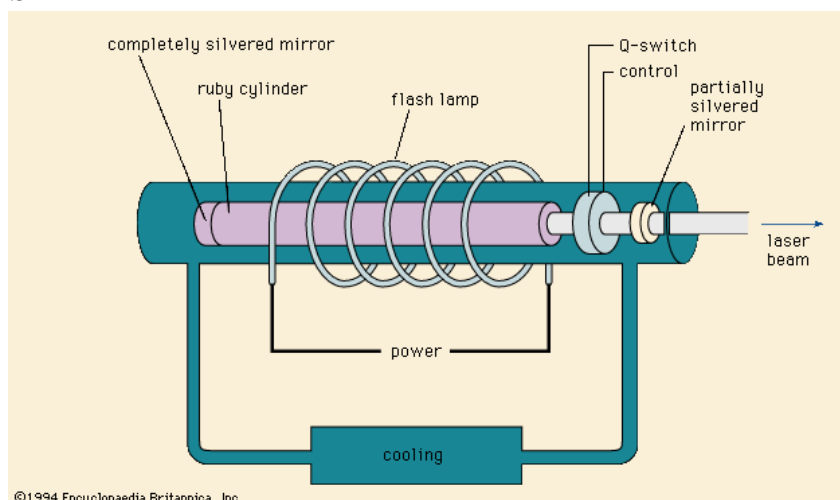
Active devices

## PHOSPHORS

Ceramic phosphors are employed for both general lighting (as in fluorescent lights) and for electronic imaging (as in cathode-ray tubes). Phosphors function when electrons within them are stimulated from stable, low-energy positions to higher levels by an appropriate means--e.g., thermal, optical, X-ray, or electron excitation. When the energized electrons drop back to lower energy levels, light can be emitted at one or more characteristic wavelengths. These wavelengths are determined by controlled dopants, referred to as activators. Examples of activated phosphors (and their resulting colour emissions) are lead-activated calcium tungstate (blue), manganese-activated zircon (green), lead- or manganese-activated calcium silicate (yellow to orange), europium-activated yttrium vanadate (red). There are countless other examples. Two major applications of phosphor ceramics are in cathode-ray tubes (CRTs) for television sets and computer monitors. Thin layers of phosphor powders are applied to the inside of the display screen of CRT. Electrons are accelerated from the cathode toward the screen, directed by magnetic coils. Light emission (phosphorescence) occurs wherever the electron beam strikes the phosphor layer, and images are formed by high-speed scanning of the electron beam over the surface of the screen. Colour screens employ interspersed small dots of phosphors of each of the three primary colours (red, yellow, and blue), with separate electron beams to address each colour.

Efficient indoor lighting is usually accomplished by fluorescent lamps. Phosphors of a suitably doped calcium halophosphate are deposited as thin powder layers on the inner surfaces of thin-walled glass tubes. The tubes are evacuated and backfilled with a mixture of mercury vapour and an inert gas. An electric discharge through the gas causes the mercury vapour to emit energy in the ultraviolet range, which strikes the phosphor layer and stimulates visible light emission. The resulting combination of blue and orange emission is comparable to that of incandescent lamps. Phosphors must be manufactured by clean-room methods in order to eliminate unwanted impurities that can "kill" phosphorescence.

## LASERS



©1994 Encyclopaedia Britannica, Inc.

Figure 2: Ruby laser being used in a Q-switch, a special switching device that produces Giant output pulse.

Os lasers são dispositivos capazes de produzirem feixes de luz muito intenso todos com o mesmo comprimento de onda e em fase. O nome laser é um acrônimo –palavra resultante da junção das primeiras letras de cada uma das partes de uma locução - para "light amplification by stimulated emission of radiation," .

Lasing takes place in various media, including glasses and single-crystal ceramics. The first laser, operated by Theodore H. Maiman in 1960, consisted of a rod of synthetic ruby (single-crystal  $\text{Al}_2\text{O}_3$  doped with chromium) that was excited by a flash lamp. (See Figure 2.) Excitation, or pumping, involves promoting electrons within the dopant centres to higher energy levels by optical or electronic means. The decay of the stimulated electron to a lower energy state yields emission of light, which is contained within the lasing solid between two mirrors (one completely silvered and one partially silvered). As the emitted light reflects back and forth, it stimulates other centres until an intense, coherent, narrow beam of monochromatic light is released. Two well-known ceramic lasing materials are the chromium-doped  $\text{Al}_2\text{O}_3$  known as ruby and a neodymium-doped yttrium aluminum garnet known as Nd-YAG.

Laser – amplificação de luz por emissão de radiação estimulada.

Lasers de intensidade muito alta podem ser usados para aquecimento e fusão localizada porém certos tipos de lasers podem ser usados para produzirem sinais de luz modulados muito puros e dessa forma são adequados para gerarem feixes codificados usados nos sistemas de comunicações por fibras óticas.

Para funcionarem os lasers precisam ser “bombeados”- ou seja, é requerida uma entrada de energia para promover elétrons dos centros dopantes para níveis mais altos de energia que quando voltam para um estado de energia mais baixo produzem a emissão de luz, confinada entre dois espelhos (um completamente e outro somente parcialmente prateado) dentro do sólido laser. Enquanto a luz reflete para frente e para trás dentro do laser ela mesmo estimula outros centros até que uma luz muito intensa, coerente e praticamente monocromática é liberada. Dois materiais cerâmicos produtores da ação laser bem conhecidos são a Alumina dopada com Cr conhecida como rubi e um garnet de alumínio ítrio dopado com neodímio conhecido como Nd-YAG.

## ELECTRO-OPTICAL COMPONENTS

Electro-optical ceramics are materials that combine optical transparency with voltage-variable optical, or electro-optical (EO), behaviour. Single-crystal EO materials include lithium niobate ( $\text{LiNbO}_3$ ) and lithium tantalate ( $\text{LiTaO}_3$ ); polycrystalline EO materials include a lanthanum-modified lead zirconate tantalate known as PLZT. Among other EO properties, these materials exhibit voltage-dependent birefringence. Birefringence is the difference between the refractive index parallel to the optical axis of the crystal and the refractive index perpendicular to the optical axis. Because the propagation velocity is different in the two directions, a phase shift occurs, and this phase shift can be varied by an applied voltage. Such EO behaviour is the basis of a number of optical devices, including switches, modulators, and demodulators for high-speed optical communications. EO ceramic thin films also can be integrated with silicon semiconductors in so-called optoelectronic integrated circuits (OEICs).

Alguns vidros que sofreram tratamentos térmicos de alívio de tensão e muitos cristais são óticamente isotrópicos, isto é o índice de refração é o mesmo independentemente da direção do feixe de luz. Entretanto, certos tipos de cristais vão dividir o feixe de luz incidente em dois feixes separados, cada um deles sendo polarizado (Luz polarizada é luz na qual a direção de suas ondas de vibrações é limitada de alguma forma. Normalmente a luz que vemos é feita de ondas vibrantes

numa mistura de direções. A luz é uma forma de radiação eletromagnética e portanto feita de um campo elétrico e um campo magnético que vibram-se a ângulos retos de cada um. Se todos os campos elétricos em um raio de luz vibra somente em uma direção, essa luz é descrita como luz polarizada. A polarização ocorre quando a luz passa através de alguns cristais ou quando ela é refletida por uma superfície. As ondas de luz vibrantes em uma direção passam através ou são refletidas, enquanto que ondas vibrantes em todas as outras direções são absorvidas. Um material que polariza a luz é conhecido como um polarizador. Os polarizadores são usados em óculos de sol; a luz do sol que é refletida do solo é parcialmente polarizada, de modo que os óculos de sol devem ser usados para cortarem uma proporção mais alta do clarão do sol do que o fazem com outra luz. A luz de um laser é também polarizada.)

Vidros com tensões residuais apresentam comportamento polarizador. Esse fenômeno da polarização é chamado birefringência, e os materiais que apresentam esse comportamento são duplamente ativos opticamente. Esse fenômeno é a base para vários tipos de dispositivos óticos e também usado para revelar tensões residuais em vidros e plásticos (se não tivessem as tensões residuais esses vidros seriam isotrópicos opticamente).

Nenhum material é perfeitamente transparente; alguma parte da luz que entra no material poder ser absorvida e convertida em calor ou outras formas de energia. Materiais que não absorvem mais fortemente em um comprimento de onda do que em outro aparece como sendo sem cor porém muitos materiais transparentes apresentam absorção seletiva e portanto podem Ter aparência colorida.

Campos elétricos e magnéticos aplicados podem modificar o índice de refração dos materiais; esses efeitos são chamados de efeitos eletro-óticos e magneto-óticos.

Um efeito antigo e particularmente interessante desse fenômeno é que um campo aplicado pode fazer com que um material normalmente isotrópico apresente birefringência, que desaparece quando o campo é removido. Se pode tirar vantagens desses efeitos, utilizando materiais que apresentam esses efeitos óticos na construção de certos dispositivos.

As aplicações fotônicas dos materiais cerâmicos dependem de uma ou de uma combinação de propriedades discutidas acima. Por exemplo, janelas (janelas de instrumentos e dispositivos óticos e de prédios e veículos) requerem a transmissão simples sem alteração de feixes de luz. Por outro lado, os filtros precisam ser transparentes para certos comprimentos de onda e fortemente absorvedores de outros. Um único material com as características apropriadas de absorção pode servir como janela e filtro seletivo.

As lentes óticas são janelas feitas com superfícies não paralelas umas as outras, e são feitas para mudar a forma e a direção de um feixe de luz. Elas trabalham usando o processo de refração, que provoca a mudança de direção de propagação de uma onda quando ela passa de um material para outro. A velocidade das ondas de luz em um vidro comum é somente cerca de  $\frac{3}{4}$  da velocidade delas no ar, de modo que a luz pode ser curvada quando ela passa do ar para dentro de vidro e sai novamente. As lentes de vidros e plásticos transparentes são feitas de forma convexa e côncava. O lugar que um feixe de luz (incidente em uma lente) é convergido para um único ponto é chamado de foco da lente; a distância do foco para a lente é chamada de distância focal.

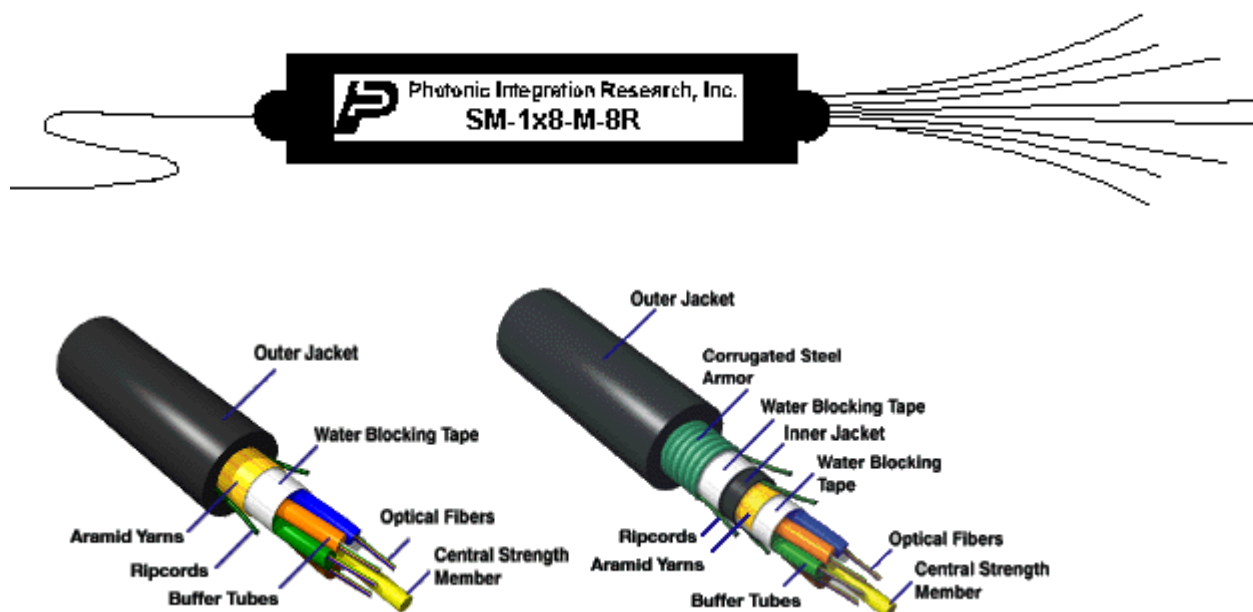
Nossos olhos têm lentes que focalizam toda a luz que os atingem vindos de um objeto particular em um único ponto sobre a retina na parte de trás do olho. O comprimento focal das lentes do olho podem ser ajustados porque as lentes são flexíveis e suas formas podem ser mudadas pelos músculos que as cercam; isso permite que o olho focalize objetos em distâncias diferentes. As lentes de vidro que fazem o mesmo trabalho em uma câmera não são flexíveis de modo que têm que ser movidas para focalizar e possibilitar que as fotografias sejam feitas a diferentes distâncias.

Uma aplicação fotônica importante do vidro ocorre nas fibras óticas. A função dessa fibras é transportar um feixe de luz de um ponto para outro sem apreciável atenuação devido a absorção ou a escape de luz pelos lados das fibras. A aplicação mais freqüente está nas comunicações, onde a informação é codificada na forma de modulações de feixe de luz comumente usando-se *diodos lasers*. Vidros especiais são os mais usados para fazer as fibras óticas. Para garantir baixa absorção, o vidro deve ser extremamente puro e isento de inclusões. Para prevenir fuga de luz pelas laterais das fibras, elas são usualmente fabricadas com um núcleo (core) central de vidro com índice de



refração mais baixo que o índice de refração do material que o envolve (cladding). A diferença de índices de refração provoca uma reflexão perfeita dos feixes de luz que incidem na interface, garantindo dessa forma que toda a luz que atravessa o núcleo da fibra permanecerá lá não importando o quanto possa ser curvado um cabo de fibra ótica.

Nas telecomunicações, as fibras óticas estão substituindo os cabos metálicos para a transmissão de chamadas telefônicas. Cada voz da pessoa que está ao telefone é mudada em sinal digital e usada para fazer com que a luz de um laser ligue e desligue milhares de vezes a cada segundo. Na medicina, as fibras óticas permitem que os médicos olhem dentro do corpo humano sem a necessidade do uso de cirurgias. As fibras óticas são muito finas e podem ser inseridas dentro do corpo para transmitir a imagem do estômago por exemplo para fora até atingir a ocular no terminal do instrumento. Um cabo de fibra ótica pode conter até 2000 finos fios de vidros.



Lasers pulsados são usualmente bombeados (estimulados) por meio de um flash altamente brilhoso de luz.; esses lasers são geralmente feitos de vidros especialmente dopados ou de monocristais de  $Al_2O_3$  dopado com Cr (laser rubi) ou de granadas (garnets) de alumínio ítrio dopados com neodímio (Nd-YAG). Outros tipos de lasers podem fornecer saídas contínuas dessa forma devem estar sendo continuamente estimulados, o que frequentemente ocorre por meio de energia elétrica. Um tipo especialmente interessante de laser contínuo pode ser feito a partir de um cristal semiconductor ou isolante que tenha sido seletivamente dopado para dar origem a uma junção pn. Quando uma voltagem elétrica dc (dc-direct current – corrente contínua) é aplicada através dessa junção em uma direção que tenda a forçar a passagem de elétrons para a direção do lado p e buracos na direção do lado n (polarização direta – forward biasing), a recombinação do excesso de elétrons e buracos na região da junção vai liberar fótons de luz provocando a emissão de um brilho na junção. Quando a entrada elétrica for pequena, as ondas de luz geradas não estarão em fase, e a junção brilhosa é chamada de diodo emissor de luz (LED-light-emitting diode). Os LEDs são dispositivos populares usados em vários displays eletrônicos. Quando a entrada elétrica for grande, e outros requisitos geométricos forem atendidos, a luz emitida pela junção será intensa e em fase, a magnitude da luz emitida variará com a magnitude do sinal elétrico, e o comportamento laser também “desliga-se” precisamente quando o sinal de estímulo cair até um certo nível. Consequentemente os diodos lasers são particularmente bem apropriados para conversão de sinais elétricos em feixes moduladores de luz e dessa forma são especialmente valiosos como geradores de sinais nos sistemas de comunicação por fibras óticas. No terminal receptor de um sistema de comunicação por fibra ótica, deve existir um detetor capaz de receber um feixe modulado de luz e converte-lo de volta em um sinal elétrico. Um diodo de junção pn desempenhará essa função se



uma voltagem contínua (dc) uniforme for aplicada de tal forma que tenda a mover elétrons para o lado n e buracos para o lado p (polarização reversa). Uma luz absorvida na região de junção do diodo como esse vai gerar elétrons e buracos que serão varridos para fora da junção pela voltagem de polarização (biasing voltage), resultando em um sinal elétrico proporcional à intensidade da luz absorvida. Dessa forma, o sistema de comunicação de fibra ótica mais simples deve Ter um diodo laser com sua saída controlada por um estímulo de sinal elétrico modulado acoplado a um terminal da fibra e um diodo detetor acoplado ao outro terminal . Na prática real, repetidores são também necessários a intervalos regulares ao longo da fibra para corrigir inevitáveis atenuações de intensidade ao longo dos comprimentos dos cabeamentos de fibras óticas.

Materiais eletro-óticos transparente e policristalinos, como as cerâmicas de PLZT (titanato zirconato de chumbo dopado com lantânio), podem ser usados em uma variedade de dispositivos nas quais a transmissão de um feixe de luz é limitada ou controlada pela mudança nas características óticas do material com um campo elétrico aplicado. O uso inclui janelas que se escurecem rapidamente quando for necessário protegerem pilotos ou outras pessoas de feixes intensos como os de uma explosão nuclear ou de uma arma a laser, para óculos de soldador, displays óticos e mesmo dispositivos de armazenagem de imagens. Sempre que uma cerâmica policristalina for projetada para uso como material transparente, muito cuidado deve ser tomado com o processamento cerâmico, começando com a escolha correta das matérias primas até com a execução das etapas de conformação e sinterização usando técnicas mais adequadas para eliminar poros e inclusões espalhadoras de luz. Não é incomum utilizar-se prensagem a quente de tais cerâmicas para assegurar a ausência de porosidade.