

VITRO CERÂMICA

↑ I Encontro Nacional de Cerâmica Avançada
da Associação Brasileira de Cerâmica
23-24/10/1986

PROF. DR. EDGAR DUTRA ZANOTTO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
DEMA-DEPTO. DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

INTRODUÇÃO

Ouvimos a exposição do Dr. Bressiani, que deixou bem claro o processo de fabricação tradicional, mesmo em se tratando de cerâmicas especiais. Geralmente parte-se de um pó, que deve ser extremamente controlado, com estequiometria, pureza, tamanho e geometria das partículas controladas. Este pó é conformado, por uma das diversas técnicas conhecidas, e a peça é levada a um forno, a temperaturas de 1.000 a 2.000 graus celsius, dependendo do produto, para a sinterização. E aí, se tem o produto final.

De maneira simplificada, ter-se-ia um pó, a conformação e a sinterização, para se obter o produto final. Vou tentar mostrar aos Senhores, um método totalmente diferente de obtenção de materiais cerâmicos. Esse método, é a cristalização controlada de vidros, quer dizer, inicialmente também se tem um pó, que não é necessariamente tão controlado quanto o pó cerâmico, o qual é fundido, obtendo-se um vidro, que é tratado termicamente, para efetuar a cristalização do produto. Portanto, é uma maneira de se obter um material poli-cristalino, partindo-se de um vidro. A diferença é bastante simples: num caso o pó é conformado e sinterizado, e no outro, o pó é fundido, o artigo de vidro é conformado, e posteriormente, o tratamento térmico em temperaturas da ordem de 500 a 800°C leva à cristalização. Esses produtos são chamados vitro-cerâmicas.

Vou tentar organizar este seminário, da seguinte forma: uma breve definição de materiais cerâmicos, um histórico mostrando a importância científica e tecnológica das vitro cerâmicas; o processo de cristalização de vidros; tipos de vitro cerâmicas comerciais; algumas propriedades térmicas, elétricas e mecânicas de vitro cerâmicas; e finalmente, algumas aplicações.

DEFINIÇÕES

Uma área um pouco delicada é a de definições. Devo enfatizar que estas definições não são internacionalmente aceitas, cada país aceita ou adota uma definição particular. Mostrarei aquelas que me agradam mais, mas que necessariamente, não são as melhores.

Inicialmente a definição de material cerâmico. Já que estamos falando sobre cerâmica avançada, acho que é oportuno.

"Materiais Cerâmicos são materiais inorgânicos, não-metálicos (então, excluimos os polímeros e os metais), cuja produção ou aplicação geralmente envolve um tratamento térmico. Tendem a ser duros (difícies de ser riscados) mas frágeis, não se deformam plasticamente, pelo menos na temperatura ambiente e tendem a ser isolantes térmicos e elétricos". A Associação Brasileira de Cerâmica adota uma definição um pouco mais extensa, mas bem parecida. Acho que esta é uma definição operacional razoável.

Gostaria também de sugerir, que encarássemos a área global, chamada de área de materiais cerâmicos. Dentro desta área, se englobam os vidros, as cerâmicas e as vitro cerâmicas.

Uma definição nossa, didática, é "cerâmicas são os materiais cerâmicos predominantemente cristalinos". "Vidros, são os materiais cerâmicos, ou os sólidos não cristalinos, que apresentam o fenômeno de transição vítrea". Essa é uma definição moderna, razoavelmente aceita internacionalmente.

E finalmente, vidro cerâmicas, que é o objetivo deste seminário. De acordo com o Prof. MacMillan, que era uma autoridade neste assunto e faleceu recentemente, "vidro-cerâmicas são sólidos poli-cristalinos obtidos através da cristalização controlada de vidros".

Pelo menos, para efeito didático, nós batizamos a área de materiais cerâmicos e dentro desta área, pelo menos 3 classes distintas: as cerâmicas (ceramics), os vidros (glass) e as vidro-cerâmicas (glass-ceramics).

HISTÓRICO

Um histórico sobre as vidro cerâmicas, é o seguinte:

Por volta de 1930, um pesquisador francês colocou algumas garrafas de vidro num forno, e no dia seguinte descobriu que estas garrafas estavam opacas. O que ocorreu? Foi a cristalização descontrolada das garrafas. A partir das impurezas que ficam na superfície, nascem ou se nucleiam cristais que crescem em direção do interior das garrafas, tornando-as opacas. E isso leva também a ruptura do artigo. Algumas partes da garrafa se cristalizam, outras não se cristalizam, enfim, é a chamada devitrificação. Então, desde aquela época, se sabia que aquecendo artigos de vidro, em regiões acima de 500 a 600^o, eles se cristalizam, se tornam opacos. Somente em 1956, Stookey, que era um pesquisador da Corning Glass Works, dos EUA, descobriu as vidro-cerâmicas. Na época ele trabalhava com vidros foto-sensitivos (esses vidros tem pequenas quantidades de partículas de metais nobres, tipo prata e ouro, dispersas no interior) e resolveu, numa dada altura de sua pesquisa, aquecer alguns vidros foto-sensitivos que tinham partículas de ouro no interior. Qual não foi sua surpresa, quando no dia seguinte, este artigo estava totalmente opaco, mas em contraste com as garrafas que se cristalizaram descontroladamente, o artigo apresentou uma alta resistência mecânica e um baixo coeficiente de expansão térmica. Daí em diante, ele começou a caracterizar esses produtos obtidos através da cristalização controlada e patenteou as vidro-cerâmicas.

A diferença entre a cristalização descontrolada e a controlada, é que a primeira se processa através de certos centros na superfície; e a controlada, a partir do interior, no volume todo.

O que se tem no final, é um material cerâmico, obtido através da cristalização controlada de um vidro. Essa é uma grande diferença entre as cerâmicas obtidas por sinterização e as vitro cerâmicas, já que os vidros não tem poros, elas também não e apresentam um acabamento superficial parecido com do vidro, brilham. Todas as propriedades são modificadas, as químicas, térmicas, elétricas, ópticas, etc.

A primeira patente é de 1956. Já nesta patente, são mostradas várias formulações diferentes de vitro-cerâmicas. Esses produtos tem então 30 anos. Para que a cristalização se processe no interior dos vidros, na maioria dos casos, é necessária a presença de agentes nucleantes, partículas que de alguma forma, incitam esta cristalização a partir do volume todo. Existem vários tipos de agentes nucleantes, óxidos de titânio, de fósforo, de zircônio, agentes metálicos, etc...

IMPORTÂNCIA DAS VITRO-CERÂMICAS

Qual é a importância científica das vitros-cerâmicas? É bastante razoável. O estudo e desenvolvimento de vitro-cerâmicas levou a vários desenvolvimentos na área de cinética de transformações de fase, por exemplo.

Vários tipos novos de cristais apareceram, cristais sintéticos cuja obtenção só é possível através da cristalização de vidros. São cristais que não existem na natureza.

Estudos de estabilidade de vidros - por incrível que pareça, o grande problema dos vidreiros, é evitar a cristalização durante a fabricação do artigo de vidro. Quando se deseja obter um artigo de vidro, e ele se cristaliza durante a fabricação de maneira descontrolada, o artigo está danificado. Quem consegue controlar a cristalização, também consegue evitá-la. Isso levou a estudos sobre a estabilidade de vidros, ou como evitar a cristalização descontrolada.

Outro detalhe, como é possível controlar micro-estruturas? Variando a quantidade de agentes nucleantes e o tratamento térmico, pode-se variar os tamanhos dos cristais, isto é, o tamanho do grão, a quantidade desses grãos, sua geometria e o número de fases.

Há vitro cerâmicas com tamanho de grãos desde 200 angstroms até alguns microns. O estudo de vitro-cerâmicas levou a várias relações entre propriedades e micro-estruturas, isto é, como variam as propriedades em função de parâmetros micro-estruturais. Além disso, permitiu o estudo do papel da fase vítrea nas propriedades dos materiais cerâmicos. Mesmo no estado poli-cristalino fica uma porcentagem residual da fase vítrea nos contornos de grão, assim como na maioria das cerâmicas obtidas por sinterização.

A importância tecnológica reside no fato que as vitro-cerâmicas são bastante homogêneas, em geral mais homogêneas que as cerâmicas obtidas por sinterização, a micro-estrutura pode ser finíssima, e tem ausência de poros. Uma dificuldade na sinterização das cerâmicas é eliminar os poros. As vezes, se consegue eliminar os poros abertos, que tem contato com a superfície, mas não se consegue eliminar os poros fechados. Esses materiais não tem poros, já que foram obtidos a partir de um vidro.

O acabamento superficial geralmente é muito bom, não é necessário um polimento. Pequena variação dimensional. Os materiais cerâmicos quando são sinterizados, geralmente se retraem bastante durante este processo. Os vitro-cerâmicos se retraem pouco. Retraem-se porque a densidade dos cristais é um pouco diferente da densidade da fase vítrea, mas tipicamente, a variação dimensional é da ordem de 3%, no máximo 5%, enquanto que as cerâmicas em certas situações, chegam a 40% de retração durante a sinterização. Fácil aderência a metais pelo fato de serem vítreos. Há muitos vitro-cerâmicos que são selados a metais. Usinabilidade - há um tipo excepcional de vitro-cerâmica, os "machinable glass ceramics". São materiais cerâmicos usináveis, assim como os metais. Peças de geometria bastante complexa podem ser obtidas. Têm propriedades dielétricas muito boas. São utilizados em eletrônica e em tecnologia de vácuo. Além disso, as vitro-cerâmicas utilizam os métodos de fabricação de vidros, que são altamente mecanizados, de alta velocidade de produção, porque inicialmente são conformados no estado vítreo. Portanto, tem vantagens tecnológicas consideráveis.

TIPOS E APLICAÇÕES DE VITRO-CERÂMICAS

Rapidamente, mostrarei alguns tipos de vidro cerâmicas:

Temos o sistema $\text{Li}_2\text{O Al}_2\text{O}_3 \text{SiO}_2$, com uma combinação dos agentes nucleantes: titânia; óxido de fósforo; ouro; platina e cobre. Esses vidros podem ser, por exemplo, usináveis quimicamente. Cristaliza-se de determinadas partes do material, depois estas partes são dissolvidas por certos ácidos, ficando a matriz com geometrias bastantes interessantes e complexas. Além disso, outras vidro cerâmicas desse sistema, apresentam um baixíssimo coeficiente de expansão térmica. São resistentes a choque térmico.

Há vidro-cerâmicas do sistema magnésia - alumina - sílica, que apresentam boas propriedades elétricas ou litia - magnésia e sílica que tem um alto coeficiente de expansão térmica e, então, podem ser soldados a metais.

Interessantes são as vidro cerâmicas do sistema cálcia magnésia alumina sílica, que podem ser obtidos a partir de matérias primas naturais do tipo basalto. Os basaltos, o Brasil tem muito, são ricos nesses 4 óxidos e além disso, intrinssicamente tem agentes nucleantes: ferro e cromo. É só uma questão de ajuste das composições químicas dos basaltos naturais. Com algumas adições, é possível obter vidro-cerâmicas.

Com escória de altos fornos, também. Tenho aqui uma peça, que me foi cedida por um professor inglês William Son, de uma fábrica de vidro cerâmica na Inglaterra, que utiliza escorias de alto-fornos. São vidro-cerâmicas que apresentam alta dureza, alta resistência a abrasão a alta durabilidade química.

PROPRIEDADES

As propriedades das vidro-cerâmicas em relação às cerâmicas mais tradicionais são: porosidade fechada e aberta zero; percentagem de fase vítrea variável de 3 a 30%, dependendo do tratamento térmico e do sistema químico, tamanho de grão variando de 200 a 50 mil angstroms, dependendo bastante dos agentes nucleantes do tratamento térmico; número de fases cristalinas de 1 a 5. Há vidro-cerâmicas monofásicas e vidro-cerâmicas com 5 fases cristalinas. Tudo depende da aplicação a que se destina o material.

São materiais que podem ter propriedades bastante unusuais, dependendo do tratamento. Resistência mecânica média, chegando a 1.400 MPa/cm^2 . A alumina, que é um material de alta resistência, tem 300 MPa/cm^2 .

A dureza não é tão alta, da ordem de 6 a 10 knoopes, giga Pascal, pelo método knoop. A alumina é bem mais dura, mais resistente à abrasão. Mas a resistência mecânica é alta e a resistência a impacto é razoável, da mesma ordem que a resistência a impacto da alumina, por exemplo.

Eu mostrei somente uma classe de vidro cerâmica. Há centenas de tipos variando desde 70 a $1.400 \text{ megapascal/cm}^2$.

A resistividade elétrica a temperatura ambiente, por exemplo, para a vidro cerâmica do sistema lítia óxido de zinco óxido de silício, o logarítimo da resistividade, vai de 13 a 16 ohms por cm^2 , que é da ordem da resistividade elétrica da alumina, por exemplo.

A rigidez dielétrica, também fica é da ordem de 20 a 40 kilovolts por milímetro, para uma peça de vidro cerâmica, na mesma ordem que uma alumina.

São valores típicos, variam extremamente de uma vidro-cerâmica para outra, depende da utilização a que se destina o material. Estou apenas tentando mostrar a flexibilidade destes materiais.

E rapidamente, um apanhado sobre as propriedades térmicas. Vejam que interessante: o coeficiente de expansão térmica, na faixa de 20 a 700°C , pode ser negativo, -8×10^{-6} , para uma vidro-cerâmica cuja fase cristalina é beta-eucryptita. Uma vidro-cerâmica com espodumênio como fase cristalina, tem um coeficiente muito baixo, quase nulo. Uma vidro-cerâmica que tenha quartzo em grandes quantidades, pode ter 24×10^{-6} , muito alto. É uma grande flexibilidade, desde negativo até muito alta. Para se comparar, os vidros variam de $0,5 \times 10^{-6}$, para um vidro de sílica pura, até 9,5 a 10 para um vidro comum da janela, cal-soda-sílica.

A temperatura de amolecimento é extremamente variável, depende da quantidade de fase vítrea e da composição química.

A condutividade térmica em calorias por segundo, por centímetro, por grau celsius, vai de 5 milésimos até 15 milésimos, da mesma ordem que a condutividade térmica dos vidros. Infelizmente, a condutividade térmica é baixa; se fosse mais alta, as vitro-cerâmicas estariam no lugar da alumina como substrato eletrônico.

Antes de finalizar, gostaria de apresentar alguns slides.

SLIDE 1 - Este é um tratamento térmico esquemático para a fabricação de vitro-cerâmicas. Primeiro: a etapa de fusão das matérias primas, conformação da peça, e aí um estágio duplo, de nucleação e crescimento. Nucleação é um estágio onde os pequenos cristais nascem, e elevando a temperatura, eles crescem. Através do tempo e da temperatura, quer dizer, variando esses dois estágios, pode-se ter desde vitro cerâmicas com uns poucos cristais muito grandes, até muitos cristais pequenos. A flexibilidade é muito grande, pode-se variar essas duas etapas, a composição química do vidro, e a quantidade e tipos de agentes nucleantes.

SLIDE 2 - Típicamente, é uma matriz vítrea com cristais crescendo. Tem-se que controlar a quantidade, o número e o tamanho desses cristais para se obter vitro-cerâmicas.

SLIDE 3 - Um produto comercial. Esse aí, especificamente, tem um coeficiente de expansão térmica muito pequeno. Pode ir direto para a geladeira ou para o forno de microondas e vice-versa, sem se romper por choque térmico, visto que ele não se expande com o aumento de temperatura.

SLIDE 4 - Isso é a tampa de um fogão. Essa placa branca é vitro-cerâmica. Ela é aquecida por baixo e pode se utilizar toda a parte superior para aquecimento. A vantagem é a limpeza. Limpeza de fogão é bastante complicada. A limpeza desse é só com pano úmido e o problema está resolvido.

SLIDE 5 - Neste slide, se vê a pessoa fritando um ovo com bacon, diretamente em cima da placa, nem é necessária a frigideira. Também é uma vitro-cerâmica com quase zero de coeficiente de expansão térmica. Pode ser aquecido sem problemas de choque térmico.

SLIDE 6 - Este é um ralo de indústria química, sujeito à corrosão. É uma vitro-cerâmica mais barata, utilizando escória de alto forno.

SLIDE 7 - Um bico de jateador de areia. É uma vitro-cerâmica também feito a partir da escória de alto forno. Nos países socialistas, como a Hungria, a Bulgária, a União Soviética, e mesmo na Inglaterra, já há várias fábricas de vitro-cerâmica que utilizam basalto, escória de alto-fornos, e outros tipo de escória. É um material que resiste à abrasão.

SLIDE 8 - Isolantes elétricos de vitro-cerâmica.

SLIDE 9 - Peças e partes de bombas mecânicas sujeitas a ataque químico e à abrasão. Misturas, por exemplo, de água e areia, argila e água, suspensões e barbotinas são igualmente abrasivas.

SLIDE 10 - Tubos resistentes à corrosão química.

SLIDE 11 - Peças elétricas: isolantes elétricos em geral.

SLIDE 12 - Um vidro e, ao lado, a vitro-cerâmica. Vidros tratado termicamente utilizados em narizes de mísseis e em domos de radares.

SLIDE 13 - Um reator químico da PFAUDLER, de aço, mas revestido internamente com uma camada de vitro-cerâmica, visto que se adere razoavelmente a metais. É uma proteção para o reator de aço.

SLIDE 14 - Esse é um espelho telescópico muito grande, com expansão térmica nula. O espelho telescópico não pode se expandir com as variações de temperatura ambiente: isso causaria erros de leitura. Esse espelho leva da ordem de dois anos para um resfriamento controlado e cristalização.

SLIDE 15 - E, finalmente, até aplicação em Eletrônica, com substratos de vitro-cerâmicas.

De maneira simplificada, essa era a visão que eu gostaria de ter passado. Obrigado.

Pergunta:

Netto, da Termoservice

Dr. Zanotto: o senhor, na sua explanação, nos disse que as vitro-cerâmicas são obtidos a partir do vidro. Nós poderíamos considerar então, a obtenção da vitro-cerâmica como sub-produto do vidro? E outra pergunta, se eu tiver uma vitro-cerâmica poderia reaproveitar, para depois produzir o vidro? Ou reaproveitar na produção do vidro?

Resposta:

Eu não chamaria de sub-produto, porque esse vidro que eu lhe mostro, não existe como produto, por si; ele só serve para obtenção do vitro-cerâmica. Não existe um vidro comercial que possa ser transformado em vitro-cerâmica, pelo menos, que eu saiba. É um vidro projetado, com uma certa quantidade de agentes nucleantes, especial para a fabricação da vitro-cerâmica.

As garrafas, talvez eu não tenha deixado claro, se cristalizam de maneira descontrolada, e o produto se rompe logo após a cristalização. Para se obter uma vitro-cerâmica é necessário uma cristalização no volume, controlada.

Quanto à segunda pergunta, você poderia reaproveitar, mas não há interesse comercial em fazer isso? Fundido, ele vira vidro novamente!

Pergunta:

Cyro Takano - CBMM

Primeiro, quero cumprimentar o Dr. Zanotto, pois é a primeira vez que a gente fora de área de Cerâmica, ouve falar sobre vitro-cerâmica. Para mim foi interessantíssimo. A pergunta que faço é: em que estágio estamos aqui no Brasil nessa área? Que tipos de fornos são necessários para isso? Qual a temperatura que se trabalha para a fusão?

Resposta:

Obrigado pelo elogio. Veja bem, o material não é tão novo quanto parece: a primeira patente já tem 30 anos e já é comercializada nos EUA desde o início da década de 60.

Temperaturas típicas de fabricação do vidro, 1550° - 1600°, para se fundir os vidros que vão levar à vitro-cerâmicas. Estágio atual no Brasil? que eu saiba, não se fabrica vitro-cerâmica no Brasil. Sei de duas tentativas de comercialização: a primeira foi da própria Corning, com o chamado "Vision", que são vitro-cerâmicas, que mesmo após o tratamento térmico continuam transparentes; tornam-se cristalinos, mas o tamanho do grão é tão pequeno que não espalham a luz; ainda são transparentes e tem coeficiente de expansão térmica quase zero. Esses materiais são interessantes, porque você pode utilizá-los como panelas, que vão direto ao fogo, e não é necessário transferir a comida da panela para um Pyrex e levar à mesa. É forno/mesa diretamente! Além disso, é interessante ver o processo de uma carne ou verdura cozinhando. Não tenho os detalhes exatos, mas parece que a Corning importou uma certa quantidade e fez uma pesquisa de mercado em Campinas. Ao que me consta vendeu bem. Depois eles podem fornecer detalhes. A segunda tentativa, que eu saiba, é da Brastemp, que lançou os fogões com placas de vitro-cerâmicas importadas da SCHOTT, Alemanha. Também fizeram pesquisa de mercado, acho que foi em Curitiba e não venderam. A dona de casa é meio-refratária a essas mudanças. Além disso, são produtos caros.

Comentário:

Dilson Collaneri - (Corning)

Esse teste do "Vision" feito em Campinas teve resultados excelentes. Um dos problemas foi o investimento necessário para produzir esse vidro aqui, e o volume ainda muito pequeno de demanda. Outro problema do teste, é que as donas de casa diziam que não dariam o produto para empregada, que poderia derrubar e quebrar. (Vou continuar usando a panela de alumínio, mesma). Mas o principal motivo mesmo, foi o investimento.

Pergunta:

Manoel - Alcoa

Edgar, você falou sobre as vantagens desse material, mas não falou da parte das desvantagens. Eu falo como material de Engenharia mesmo. De tudo isso que você descreveu, ouvimos falar, por exemplo, em termos de pesquisa de motores cerâmicos, e pelo que você descreve desse material, seria talvez o material ideal para se fazer um motor cerâmico, por exemplo, como se poderia fundir grandes blocos ou grandes volumes deste material e atingir propriedades excelentes? Como você vê isso? Existe algum estudo nesse sentido?

Resposta:

De meu conhecimento, os materiais candidados aos motores são zircônia; alumina - zircônia, carbetto e nitreto de silício e um tipo de vitro-cerâmica, que é o litio - aluminato de silício. São realmente as vitro-cerâmicas que tem coeficiente de expansão térmica muito baixo, quase zero. Esses seriam ideais, pois num motor, várias partes são sujeitas a choque térmico. O único problema é que eles tem uma quantidade residual de fase vítrea, isto é, eles são bons para temperaturas relativamente baixas, mas em temperaturas altas eles amolecem: o módulo de elasticidade cai e a resistência mecânica cai muito.

Eu realmente não estou ao par sobre estado da arte, mas sei que é um material candidato. A grande limitação seria o amolecimento, a impossibilidade de se trabalhar em temperaturas muito altas. Mesmo a alumina-zircônia tem essa impossibilidade. Os melhores materiais, no momento, para trabalhar em altas temperaturas, ainda são o carbetto e o nitreto de silício e os compósitos deles, os co-valentes. Talvez o Alexandre, que aí está, esteja melhor informado sobre o estado da arte dos motores.

Comentário:

Alexandre - Metal Leve

Eu não entendo muita coisa sobre vitro-cerâmica; a única notícia que tenho é que, em 1977, o Roy quando começou a fazer pesquisa em termos de motores cerâmicos, um dos materiais testados foi o LAS=LITHUM-ALUMINUM-SILICATE, e os resultados foram ruins, pois tem uma condutividade térmica baixa, e não resiste ao trabalho que é solicitado dentro do motor.

Resposta:

Dr. Zanotto:

Provavelmente vai ficar com nitreto-carbetto e, por aí, para motores.

Pergunta:

Em termos de custo de produção, o que você poderia nos adiantar relativamente às cerâmicas as vitro-cerâmicas?

Resposta:

Não tenho dados, mas acho que um bom chute seria o seguinte:

Devem estar na faixa das cerâmicas especiais, na faixa de alumina-zircônia, do nitreto, nessa faixa de preço. Sei que são caros. Há um ano e meio comprei uma panelinha de "Vision" e paguei 25 dólares. Isso é preço de venda; assumo que o custo de fabricação seja alto também. Uma tesourinha de alumina-zircônia está custando cerca de 50 dólares. Qualquer peçinha de cerâmica especial custa de 30 dólares para cima.

Pergunta:

Então poderíamos considerar as vitro-cerâmicas como substitutos das cerâmicas tradicionais? Eles competem em que tipo de aplicação?

Resposta:

Diria que são materiais cerâmicos especiais, dentro daquela classificação que fizemos. Os materiais cerâmicos compreendem vidros convencionais e vidros especiais; cerâmicas tradicionais e cerâmicas especiais. As vitro-cerâmicas são materiais cerâmicos especiais. Competem em qualquer aplicação que demande baixo coeficiente de expansão térmica, alto grau de acabamento superficial e peças de formato complexo. Como são obtidas primeiramente no estado vítreo, é possível se fazer, por exemplo, um tubo muito fininho, uma peça de geometria complicada, de parede muito fina de vitro-cerâmica. Ao passo, que já é muito difícil fazer peças de cerâmicas especiais, com parede muito fina. Solicitações de ataque químico, por exemplo. Como não tem poros, eles tendem a resistir mais que um material poroso. Quanto às aplicações típicas, e mais uma vez peço auxílio do pessoal da Corning, o que vem como carro-chefe das vitro-cerâmicas são produtos domésticos: fogões, produtos para fornos de microondas, etc. Os "machinable glass ceramics" vendem bem, e tem também um material que deve começar a vender muito bem, que é o "papel-cerâmico": é um papel que não pega fogo, que tem propriedades elétricas muito boas, e é uma vitro-cerâmica; a Corning lançou faz 1 ano e pouco, e esperam ter um mercado bom.

Pergunta:

Qual seu "feeling" em termos de horizonte que esses materiais cerâmicos viriam a deslocar de forma significativa os metais?

Resposta:

"Feeling"? Vai demorar. O custo é muito alto ainda.

Pergunta:

Meu nome é Eustáquio, de Belo Horizonte (CETEC).

Gostaria de perguntar se através desse processamento é possível eliminar completamente a fase vítrea, e, além disso, obter mono-cristais? Orientar esses grãos, de forma a se obter mono-cristais?

Resposta:

Não; obter mono-cristais é muito difícil. Seria necessário uma baixíssima velocidade de nucleação e alta velocidade de crescimento, de forma que se teria 3 ou 4 grãos, e cada grão desses seria mono-cristalino. Isso dificilmente vai ocorrer, mas há micro-estruturas com os grãos orientados; já há patentes. Pode-se fazer extrusão a quente. O processo de cristalização se dá durante o processo de extrusão, e a micro-estrutura fica alinhada. Todos os grãos alinhados na direção de extrusão. Obviamente o material fica anisotrópico.