



Foto: SCHOTT/C. Costard

# PREDICCIONES EXACTAS

## PREVISÕES CERTEIRAS

Un nuevo modelo matemático para calcular la resistencia mecánica de componentes vitrocerámicos ZERODUR® desarrollado por el experto en óptica de SCHOTT, Dr. Peter Hartmann, suministra valores característicos mejorados. Los clientes de campos como la aeronáutica, la astronomía y la litografía se benefician de la mayor seguridad operativa, fiabilidad y eficiencia de dichos componentes.

Um novo modelo matemático para cálculo da força dos componentes do vitrocerâmico ZERODUR®, desenvolvido pelo especialista em ópticas da SCHOTT, Dr. Peter Kartmann, fornece dados ainda melhores de desempenho. Clientes dos segmentos de aeronáutica, astronomia e litografia já estão sendo beneficiados graças a alta confiabilidade, segurança e eficiência desses componentes.

CHRISTINE FUHR

**P**ara contrarrestar la fuerza de atracción de la Tierra, los cohetes han de ser impulsados a una velocidad mínima de 8 kilómetros por segundo. Su despegue se produce basándose en el denominado principio de reacción: al quemar combustible se generan gases, que al ser expulsados a alta velocidad y bajo una gran presión, propulsan el cohete hacia arriba. El empuje, la aceleración,

**U**m foguete deve viajar, no mínimo, a uma velocidade de oito quilômetros por segundo a fim de resistir à atração gravitacional da Terra. A decolagem acontece com base no chamado princípio de propulsão: gases são produzidos pela queima do óleo que propulsiona o foguete para o céu em incrível velocidade sob alta pressão. Propulsão, aceleração, pressão e vibração exercem enormes



Medición de un espejo de bajo peso en ZERODUR® de 1,2 m de diámetro, que pesa únicamente 45 kg (Izda.). Las oquedades de forma triangular en su cara posterior permiten reducir en hasta un 90% el peso. Estas delicadas bases de espejo han de cumplir grandes requerimientos de resistencia mecánica, porque deben ser capaces de resistir las enormes fuerzas físicas que se dan durante el lanzamiento de los cohetes portadores de satélites y telescopios espaciales (arriba).

Medição de um espelho leve ZERODUR® com 1,2 metro de diâmetro, que pesa apenas 45 quilos (esq.). Os bolsões triangulares na traseira permitem redução de até 90% do peso. Altas exigências são postas na força desses substratos de vidro com filigranas. Apesar de tudo, eles devem ser capazes de resistir às forças físicas incrivelmente altas, resultantes do lançamento de satélites ou telescópios espaciais (acima).

la presión y las vibraciones someten tanto los cohetes portadores como los instrumentos que éstos transportan, a unas fuerzas físicas enormes. Para quienes desarrollan los sofisticados ingenios que toman fotografías de alta resolución y efectúan mediciones precisas adquiere gran importancia la comprensión lo más exacta posible de las propiedades físicas de todos los materiales utilizados. En el caso ideal se requiere una probabilidad de fallo lo más baja posible de los componentes respectivos bajo un esfuerzo máximo.

### Vidrio y vitrocerámica: frágiles, pero resistentes y duros

La resistencia mecánica es un factor decisivo cuando se trata de utilizar los frágiles materiales de vidrio y vitrocerámica en aplicaciones técnicas sofisticadas. SCHOTT lleva muchos años dedicado intensivamente a la I+D de temas como la resistencia mecánica y los esfuerzos de flexión. El objetivo es obtener un vidrio todavía más resistente (ver también la revista solutions 1/2013, pág. 30).

En teoría, el vidrio y los materiales vitrocerámicos resisten grandes esfuerzos de flexión, gracias a sus enlaces atómicos fuertes. Sin embargo, la realidad es que esta propiedad se deteriora tras la conformación con herramientas de desbaste de diamante, que provocan la aparición de microfisuras en la superficie, que si son suficientemente profundas pueden llevar a la rotura. Por esta razón, para los desarrolladores es obviamente muy importante entender con precisión cuándo ocurrirá esto. Los especialistas en materiales

forças físicas sobre os foguetes e cargas úteis de instrumentos, tais como satélites ou telescópios espaciais, por exemplo. A compreensão exata das propriedades dos materiais usados é importante para aqueles que desenvolvem os sofisticados aplicativos que orbitam a Terra, tirar fotos em alta resolução e realizar medições precisas no espaço. Idealmente, eles devem ter baixíssima probabilidade de falha dos respectivos componentes sob máxima tensão. Isso reduz a frustração por conta de um colapso de caros instrumentos de alta tecnologia em suportar tensões ambientais extremas.

### Vidro e vitrocerâmico: frágil, mas estável e duro

Força é um fator decisivo quando se trata de usar o frágil vidro e materiais vitrocerâmicos em aplicações técnicas mais sofisticadas. A SCHOTT, companhia especializada em vidro e tecnologia, trabalha intensamente há anos em pesquisa e desenvolvimento de temas como força e tensão de flexão. O objetivo é tornar o vidro muito mais forte.

Teoricamente, vidro e materiais vitrocerâmicos resistem a altas tensões de flexão devido às suas fortes ligações atômicas. Na realidade, porém, essas capacidades deterioram-se consideravelmente depois de modelados com ferramentas de corte com diamante, que geram microfissuras na superfície. Se elas são profundas demais, podem levar a rupturas e, assim, componentes inteiros vêm a falhar. Por esta razão, é obviamente muito importante para os desenvolvedores compreender precisamente quando isso irá ocorrer. Agora, os especialistas em materiais da SCHOTT estão em condições de oferecer os melhores dados sobre o vitrocerâmico de baixíssima expansão térmica ZERODUR®.

Antes, os dois parâmetros de distribuição Weibull eram o método mais usado para prever a força do vitrocerâmico. Aqui, a resistência a ruptura e a probabilidade de falha da amostra gerada em um teste duplo de anel são mostradas em megapascal (MPa), e extrapolada. Como o especialista em ópticos da SCHOTT Dr. Peter Hartmann demonstrou em seu trabalho “ZERODUR®: Abordagem Determinística para Design de Força”, que inclui uma quantidade considerável de amostragens, esta abordagem convencional já não é suficiente e deve ser melhorada para outra (Weibull) que leve três parâmetros em conta. Esta nova abordagem oferece um valor de resistência mínimo para condições definidas de superfície e permite que a vida útil seja calculada sob estresse especificado, considerando a fadiga do material por estresse. Existe uma outra vantagem para o método em relação ao anterior: este modelo reduz incertezas e os fatores de segurança excessivamente conservadores, o que permite que as resistências mecânicas substancialmente elevadas sejam aplicadas aos componentes do ZERODUR®. Clientes das áreas de astronomia, aeronáutica e litografia interessados no uso do vitrocerâmico ZERODUR® com perfis estático e dinâmico significativamente mais altos, agora poderão fazê-lo, graças às previsões mais exatas de sua força.

O vitrocerâmico ZERODUR® é usado na fabricação de substrato de espelho leve com filigranas, para satélites e telescópios espaciais. Seu peso pode ser reduzido em até 90% com estruturas triangulares



Con su trabajo sobre la resistencia mecánica de la vitrocerámica termoestable ZERODUR® el experto en óptica Dr. Peter Hartmann recibió el Premio SCHOTT por logros destacados en el campo de la investigación y el desarrollo de 2013.

O especialista em ópticos Dr. Peter Hartmann foi agraciado com o Prêmio SCHOTT para realizações especiais na área de pesquisa e desenvolvimento por seu trabalho sobre força de resistência a temperatura do vitrocerâmico ZERODUR®, em 2013.

esculpidas na parte de trás. Os componentes ZERODUR® também executam tarefas de alta precisão nas indústrias de eletrônicos e semicondutores. Eles são usados como substratos de espelho em dispositivos de litografia para a fabricação de milhares, e até mesmo milhões, de circuitos para controlar as cores exibidas em monitores LCD, bem como na produção de chip, onde os tamanhos se reduzem cada vez mais até chegar a apenas alguns nanômetros nos

de SCHOTT están ahora en condiciones de suministrar datos mejorados acerca de la resistencia mecánica de ZERODUR®, una vitrocerámica con un coeficiente de dilatación extraordinariamente bajo. Para predecir la resistencia de una vitrocerámica se utilizaba hasta ahora normalmente el método de “distribución de dos parámetros Weibull”, consistente en representar el esfuerzo (en megapascuales/MPa) y en extrapolar la probabilidad de rotura de muestras sometidas a un ensayo de doble anillo. Como el especialista en óptica de SCHOTT Dr. Peter Hartmann pudo demostrar en su trabajo “ZERODUR®: Planteamiento determinista para el diseño de la resistencia” este método convencional no resulta suficiente, sino que debe ser complementado con un planteamiento (Weibull) modificado, que utiliza tres parámetros. Este nuevo planteamiento proporciona un valor de resistencia mínima para unas condiciones superficiales definidas y permite calcular la durabilidad para un esfuerzo dado. Este planteamiento tiene, además, otra ventaja: el modelo reduce las anteriores incertidumbres estadísticas y los factores de seguridad demasiado conservadores, permitiendo así someter los componentes de ZERODUR® a esfuerzos mecánicos admisibles notablemente superiores a los que se aplicaban hasta ahora.

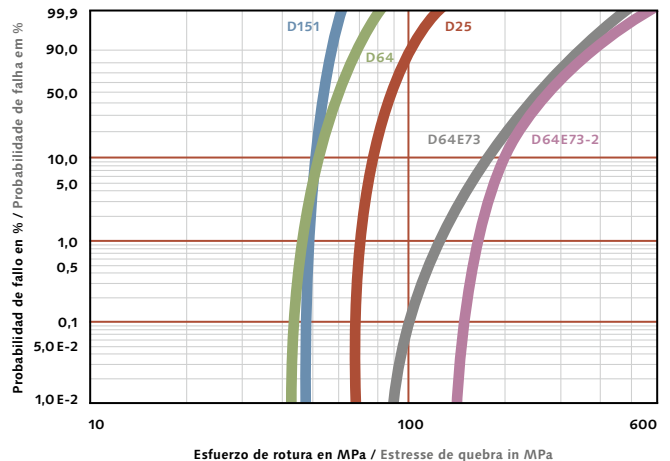
Ahora los clientes de los campos de la astronomía, la aeronáutica y la litografía interesados en utilizar vitrocerámica ZERODUR® con unos perfiles de esfuerzos estáticos y dinámicos cada vez más elevados estarán en condiciones de hacerlo gracias a unas predicciones de resistencia mecánica más precisas. La vitrocerámica ZERODUR® se utiliza para fabricar delicadas bases de espejo de bajo peso para satélites y telescopios espaciales. Los componentes de ZERODUR® asumen también funciones de alta precisión en las industrias electrónica y de semiconductores, donde se utilizan como

## LA RESISTENCIA MECÁNICA DE ZERODUR®

Probabilidad de rotura para diferentes condiciones superficiales

## A FORÇA DO ZERODUR®

Probabilidade de quebra para diferentes condições de superfície



Fuente Fuente : SCHOTT/P. Hartmann

En función de las condiciones superficiales, las curvas Weibull de tres parámetros tienden todas hacia una probabilidad de rotura igual a cero. Los valores mínimos son ahora mucho más altos que los 10 MPa hasta ahora utilizados, lo cual hará posible utilizar en el futuro ZERODUR® bajo cargas mecánicas más elevadas.

As três curvas de parâmetro Weibull todas caem a zero probabilidade de quebra a depender das condições de superfície. Agora, os valores mínimos são muito mais elevados que os previamente usados de 10 MPa, o que significa que o ZERODUR® pode ser usado com cargas mecânicas mais elevadas no futuro.

próximos años. Basicamente, os componentes vitrocerâmicos ZERODUR® são encontrados em aplicações que requerem a mais elevada precisão, confiabilidade e segurança de funcionamento dos elementos utilizados, a fim de assegurar que esses complexos pro-

substratos de óptica de espejo en equipos litográficos para la fabricación de miles o, incluso, millones de circuitos para controlar los colores en monitores LCD, así como para la fabricación de chips, en la que los tamaños de las estructuras seguirán disminuyendo en los años venideros, hasta alcanzar tan solo unos pocos nanómetros. “Gracias a este modelo de cálculo optimizado y a estos datos fiables sobre resistencia mecánica hemos sido capaces de probar que la vitrocerámica ZERODUR® es incluso más resistente y sólida bajo condiciones más exigentes que lo que habíamos asumido inicialmente. Esto abre a los usuarios nuevas expectativas a la hora de diseñar sus instrumentos y dispositivos”, explica el Dr. Peter Hartmann, que ha obtenido el Premio a la I&D de SCHOTT por su modelo.

“Este trabajo documenta un alto grado de profesionalidad científico-técnica y demuestra los sobresalientes conocimientos expertos en materiales y tecnológicos existentes en SCHOTT”, explicó el Dr. Hans-Joachim Konz, miembro de su Consejo de Dirección, durante la ceremonia de entrega del premio. “Aparte de esto, este trabajo subraya nuestro objetivo de ofrecer a nuestros clientes ventajas por medio de nuestro profundo conocimiento de los materiales. Es un ejemplo de exitoso maridaje de ciencia, por una parte, y marketing técnico, por otra”, agregó. <  
[peter.hartmann@schott.com](mailto:peter.hartmann@schott.com)

cessos funcionem sem problemas. “Graças a esse modelo de cálculo otimizado e aos dados confiáveis sobre a força, comprovamos que o ZERODUR® é ainda mais forte e estável sob condições severas do que afirmávamos antes. Isso abre novas perspectivas para os designers na construção de seus instrumentos e dispositivos”, explica o Dr. Peter Hartmann, vencedor do Prêmio SCHOTT R&D por seu modelo.

“Este trabalho atesta o alto grau de profissionalismo técnico e científico, e demonstra a excepcional expertise material e tecnológica que a SCHOTT tem”, disse o Dr. Hans-Joachim Konz, membro do Conselho Diretivo, na cerimônia de premiação. “Este trabalho reforça nossa meta de oferecer benefícios aos clientes através de nosso profundo domínio dos materiais”, acrescentou. <  
[peter.hartmann@schott.com](mailto:peter.hartmann@schott.com)

## DILATACIÓN EXTRAORDINARIAMENTE REDUCIDA

La vitrocerámica ZERODUR®, compuesta principalmente por óxido de litio, óxido de aluminio y óxido de silicio (LAS), se funde como vidrio y se transforma a continuación en vitrocerámica mediante un proceso de ceramización. Para ello se calienta en primer lugar el vidrio hasta una temperatura que activa la aparición controlada de vidrios semilla, que luego crecen en un segundo paso. Tras el enfriamiento resulta un material compuesto por cristalitas de tamaño nanométrico, incrustadas en una fase de vidrio residual. Seleccionando hábilmente el tipo de cristal y teniendo un conocimiento exacto de cómo se forman las semillas y crecen los cristales, se pueden controlar con precisión las propiedades de estas vitrocerámicas. El coeficiente de dilatación negativo de los cristales LAS compensa el coeficiente de dilatación positivo del vidrio residual y convierte a ZERODUR® de SCHOTT en un material de dilatación cero extraordinariamente homogéneo. Aquí el “cero” se entiende en términos de propiedades físico-técnicas, sujeto a un intervalo de error. El grado de tolerancia de ZERODUR® más estrecho disponible es de  $\pm 0,007 \times 10^{-6}/K$ , equivalente a un coeficiente de dilatación CTE\* (Coefficient of Thermal Expansion) 1000 veces inferior al de los vidrios convencionales y aprox. 2000 veces inferior al de los metales. Si es necesario se puede adaptar el comportamiento de dilatación de ZERODUR® al perfil de temperaturas concreto de la aplicación de un cliente. <

\*CTE (0°C; 50°C) describe el coeficiente de dilatación lineal medio (CTE) dentro de un intervalo de temperaturas de 0 a 50°C.

## BAIXÍSSIMA EXPANSÃO TÉRMICA

O vitrocerâmico ZERODUR®, que consiste principalmente de óxido de lítio, óxido de alumínio e óxido de silício (LAS), é fundido como vidro e, então, transformado em vitrocerâmico através do processo de ceramização. Primeiramente, o vidro é aquecido até uma temperatura que dá início ao cultivo de cristais primários, que vêm a crescer em uma segunda etapa. Após ser resfriado, fica para trás um material que consiste de nano-cristalitos, incorporados na fase de vidro residual. Se os cristais forem escolhidos de forma inteligente e houver conhecimento preciso de como as sementes se formam e os cristais crescem, as propriedades do vitrocerâmico podem ser controladas com precisão. A expansão térmica negativa dos cristais LAS compensa a expansão térmica positiva do vidro residual, e torna o ZERODUR® da SCHOTT um material extremamente homogêneo, com expansão zero. Aqui, o zero é compreendido em termos de propriedades físicas/técnicas, e é expresso fisicamente em um intervalo de erro. Para cientistas e engenheiros, o mais restrito grau de tolerância disponível para o ZERODUR® é  $\pm 0,007 \times 10^{-6}/K$ . Isso equivale a um CTE\* (Coeficiente de Expansão Térmica) 1000 vezes menor que o de vidros convencionais e cerca de 2000 vezes menor que o de metais. Se necessário, o comportamento de expansão do ZERODUR® pode ser ajustado para se adequar à progressão de temperatura real na aplicação de um cliente. <

\*CTE (0°C; 50°C) descreve o coeficiente médio de expansão térmica linear (CTE, na sigla em inglês), na faixa de temperatura entre 0°C a 50°C.