

# PONENCIA 88 C1

## ANÁLISIS DEL IMPACTO MECÁNICO SOBRE BALDOSAS CERÁMICAS. FACTORES QUE INFLUYEN

V. Cantavella<sup>(1)</sup>, A. Moreno<sup>(1)</sup>, C. Felú<sup>(1)</sup>, A. Muñoz<sup>(1)</sup>, J. Barberá<sup>(2)</sup>, A. Palanques<sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup> Instituto de Tecnología Cerámica (ITC). Asociación de Investigación de las Industrias Cerámicas (AICE)  
Universitat Jaume I. Castellón. España.

<sup>(2)</sup> Cerámica Saloni, S.A. San Juan de Moró. España.

Palabras clave: impacto, modelización, método de ensayo

### RESUMEN

Uno de los campos en que los materiales cerámicos suelen presentar peor comportamiento es el de la resistencia al impacto mecánico. Con el objeto de comprender mejor los mecanismos por los que se produce la rotura durante el impacto, así como establecer los factores que influyen en ella, se llevó a cabo una modelización por elementos finitos del impacto de un objeto rígido sobre una pieza esmaltada. Los resultados mostraron que las tensiones se desarrollan únicamente en la zona próxima al contacto. Además, el desarrollo de daño durante el impacto depende de la tensión máxima en el punto de impacto, y es poco sensible a la velocidad a la que se aplica esta carga.

La similitud en el daño producido en los impactos dinámicos y cuasi-estáticos permitió desarrollar un procedimiento de cuantificación de la resistencia al impacto, basado en la aplicación de una carga cíclica sobre una pieza mediante un indentador y la medida de la profundidad de penetración en función del número de ciclos.

Por último se ha analizado el efecto que tienen determinados factores sobre el daño producido en un impacto.

### 1 Introducción

Los materiales cerámicos, y las baldosas en particular, presentan un comportamiento frágil, lo que se hace evidente en el caso de sollicitaciones mecánicas asociadas al impacto por caída de objetos.

Durante el impacto se desarrollan una serie de tensiones que van cambiando con el tiempo. Estas tensiones producen esfuerzos de cizalla, tracción y compresión que, finalmente, pueden conducir un desconchado en el punto de impacto.

La normativa actual simplemente evalúa la resistencia al impacto empleando el coeficiente de restitución <sup>[1]</sup>, que mide el cociente entre las alturas final e inicial de una bola dejada caer sobre la pieza. Este parámetro muestra poca variación de un tipo de pieza a otro y es muy sensible al modo de colocación de la pieza.

Se han desarrollado métodos más rigurosos para medir la resistencia al impacto <sup>[2,3,4]</sup>; sin embargo, en la bibliografía consultada no se han encontrado estudios que analicen las tensiones que se producen en el momento del impacto. El conocimiento de estas tensiones podría ayudar en la comprensión de los procesos por los que se produce la rotura durante el impacto.

## 2 Modelización del impacto

### 2.1 Impacto dinámico

#### 2.1.1 Descripción del modelo

Para modelizar el impacto se consideró una baldosa formada por tres láminas elásticas: soporte, engobe y vidriado. Esta pieza se situó sobre una capa de mortero, que se consideró también elástica (figura 1).

El elemento de impacto fue un dardo (indentador), constituido por una punta semiesférica acoplada al final de un cilindro que le confería una determinada inercia al conjunto. Debido a la simetría axial del problema, se simuló únicamente una sección del conjunto pieza / dardo, lo que permitió reducir el problema original de 3D a 2D.

Los cálculos se llevaron a cabo utilizando el método de los elementos finitos, que básicamente consiste en dividir el sólido (tanto el dardo como la pieza) en una serie de celdas, denominadas *elementos*, y calcular la solución en los nodos de los elementos. El programa empleado fue Code\_Aster [5], distribuido por EDF bajo licencia de código abierto.

En la figura 2 se presenta el mallado utilizado y en la figura 3 un detalle del mismo cerca del punto de contacto. Las dos filas superiores de cuadriláteros de la pieza corresponden al vidriado, y las dos siguientes al engobe. El soporte y la capa inferior están mallados con triángulos, incrementándose la densidad de elementos cerca del punto de contacto con el dardo.

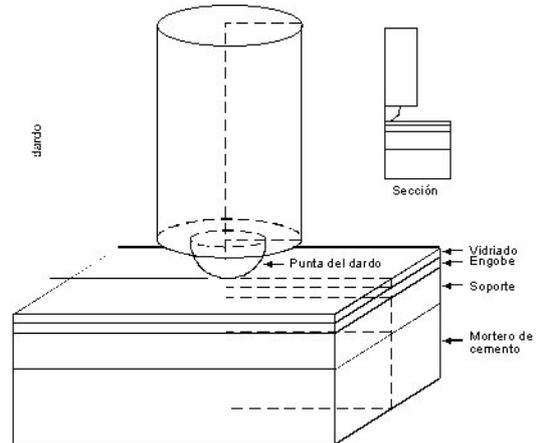


Figura 1. Esquema del dardo y la pieza empleados en el cálculo por elementos finitos. Debido a la simetría axial, sólo se ha modelizado una sección

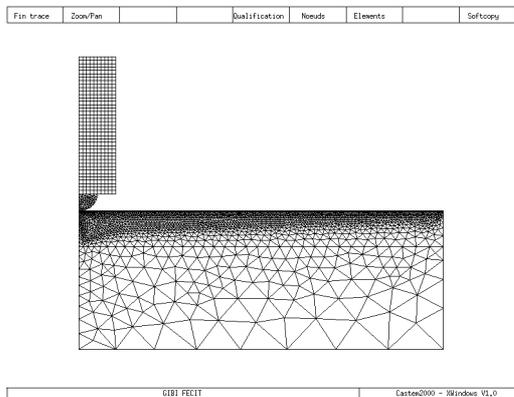


Figura 2. Mallado empleado en el cálculo por elementos finitos.

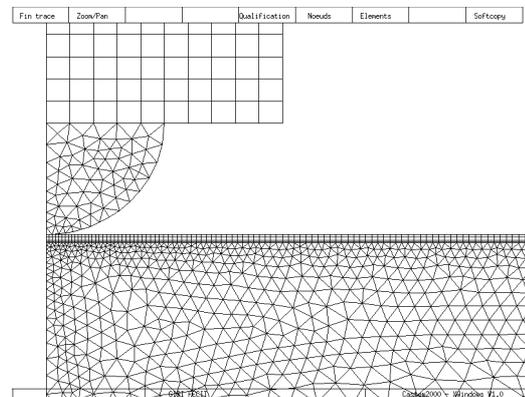


Figura 3. Mallado empleado en el cálculo por elementos finitos.

#### 2.1.2 Resultados de la simulación

Para llevar a cabo la simulación se utilizaron los siguientes parámetros:

##### Elemento impactante (dardo):

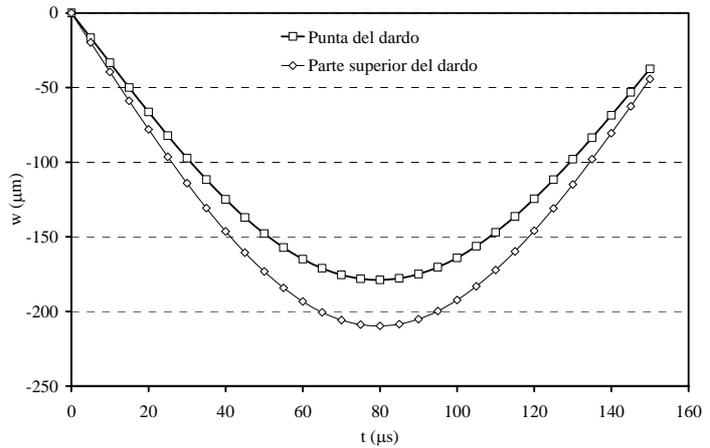
- Radio de la punta del dardo: 5 mm
- Longitud del dardo: 45 mm
- Módulo de elasticidad (acero): 210 GPa
- Coefficiente de Poisson: 0.25
- Masa: 100 g
- Altura de caída: 0.8 m

**Pieza cerámica:**

- Espesor soporte: 10 mm
- Módulo de elasticidad soporte: 30 GPa
- Espesor engobe: 125  $\mu\text{m}$
- Módulo de elasticidad engobe: 30 GPa
- Espesor vidriado: 250  $\mu\text{m}$
- Módulo de elasticidad vidriado: 75 GPa
- Coefficiente de Poisson [genérico para todas las capas]: 0.23

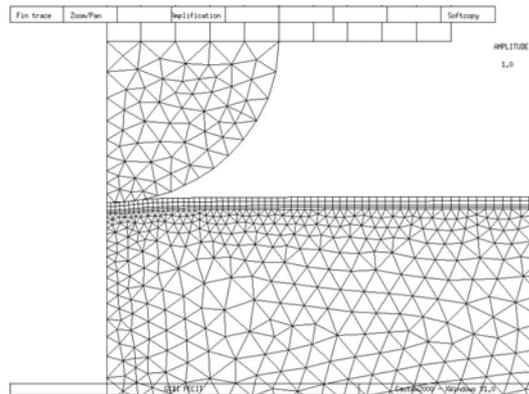
**Anclaje:**

- Espesor del mortero de cemento o capa de regularización: 30 mm
- Módulo de elasticidad cemento: 20 GPa
- Coefficiente de Poisson: 0.20

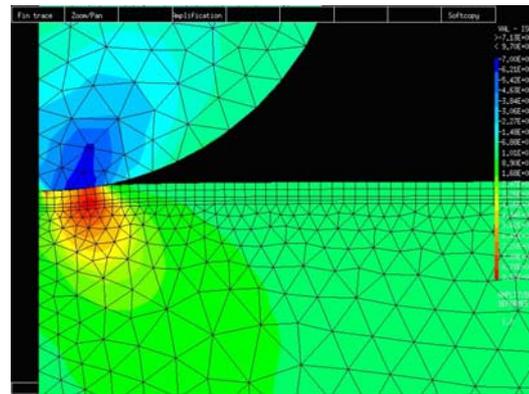


**Figura 4. Desplazamientos de la parte inferior (punta) y superior del dardo durante el impacto.**

En la figura 4 se han representado los desplazamientos inferior y superior del dardo durante el impacto. Inicialmente, justo en el momento en que se inicia el impacto, ambos desplazamientos son cero. A medida que transcurre el tiempo, el dardo desciende hasta alcanzar un valor mínimo, que corresponde al momento en que la fuerza entre el dardo y la pieza es máxima. La pequeña diferencia de desplazamiento entre la punta del dardo y su parte superior se debe a la compresión que sufre el dardo durante el impacto. A partir del momento en que se alcanza el máximo desplazamiento, el dardo comienza a subir, iniciándose el rebote. El cálculo se finalizó antes del momento en que el dardo se separaba de la superficie de la pieza



**Figura 5. Desplazamientos en la zona de contacto en el instante de máxima deformación. Cálculo dinámico.**



**Figura 6. Tensión  $\sigma_{rz}$  en el instante de máxima deformación. Cálculo dinámico.**

A partir de la figura 4 se puede obtener la profundidad de penetración y la duración del impacto (en torno a 160  $\mu\text{s}$ ). Este resultado es coherente con el que se puede obtener, de forma analítica, considerando una pieza homogénea.

Otra información que se puede obtener a partir del cálculo es la deformación de la pieza (figura 5) y las tensiones en la zona de contacto. La distribución de tensiones contiene diferentes componentes no nulas ( $\sigma_{rr}$ ,  $\sigma_{rz}$ ,  $\sigma_{\theta\theta}$ ,...). En la figura 6 se ha representado la tensión de cizalla ( $\sigma_{rz}$ ), las conclusiones que se presentan para esta componente pueden ser extensibles a las demás. Se observa que las tensiones pueden ser muy elevadas, pero se encuentran concentradas muy cerca del punto de contacto, en una extensión de unas pocas décimas de milímetros. Es precisamente esta pequeña superficie de contacto la que conduce a tensiones tan elevada. En algunos materiales cerámicos los esfuerzos de compresión pueden generar deformaciones plásticas que no se producen bajo otro tipo de esfuerzos [6].

## 2.2 Impacto cuasi-estático

El análisis realizado anteriormente contempla la aceleración del dardo y de la pieza. Existe la alternativa de analizar el impacto cuasi-estático, en el que no se consideran las aceleraciones en la pieza. Esta simplificación, en cambio, requiere introducir como dato el máximo desplazamiento del dardo, la fuerza que ejerce el dardo sobre la pieza o bien realizar una serie de cálculos estáticos con diferentes valores de fuerza y, a continuación, emplear la ecuación de conservación de la energía mecánica. La realización de ensayos cuasi-estáticos presenta una serie de ventajas:

- Permite verificar el papel de las aceleraciones. Si éstas no fueran importantes podrían plantearse experimentos estáticos, que son mucho sencillos de llevar a cabo que los dinámicos.
- El tiempo de cálculo en un ensayo cuasi-estático es mucho menor que el de un ensayo dinámico.
- El cálculo dinámico implica la resolución de ecuaciones en las que intervienen aceleraciones (derivadas segundas de los desplazamientos) lo que puede conducir a problemas en el cálculo (soluciones oscilatorias o falta de convergencia).

### 2.2.1 Resultados de la simulación

En el estudio del impacto cuasi-estático se utilizaron los mismos parámetros para el dardo, la baldosa y el anclaje, que habían sido utilizados para el impacto dinámico y se impuso un desplazamiento en el dardo igual al máximo desplazamiento calculado con el modelo dinámico (figura 4).

En la figura 7 se muestran los desplazamientos obtenidos y en la figura 8 las tensiones. Estas figuras son muy similares a las obtenidas en los ensayos dinámicos (figura 5 y figura 6). El valor máximo de la tensión de cizalla fue de 860 MPa mientras que en el cálculo dinámico se obtuvo un valor de 960 MPa. Los resultados indican, por tanto, que en el ensayo dinámico las tensiones son sólo un poco más elevadas que en un ensayo cuasi-estático.

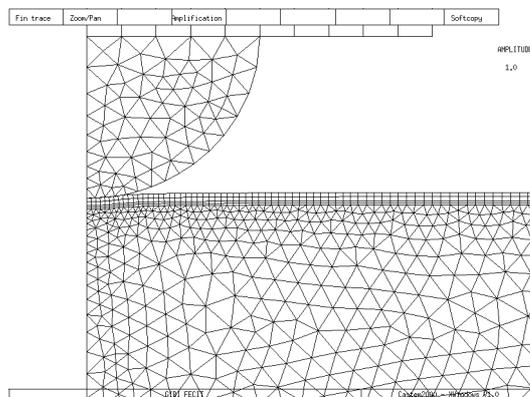


Figura 7. Desplazamientos en la zona de contacto en el instante de máxima deformación. Cálculo cuasi-estático.

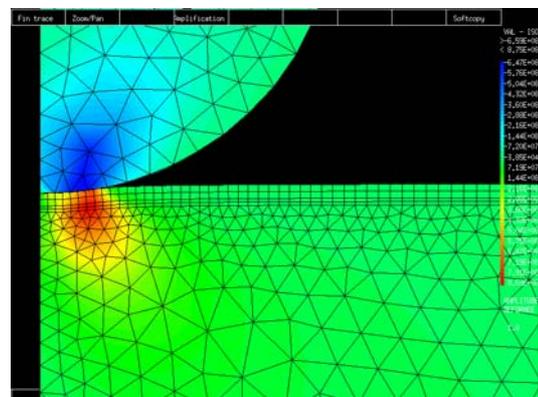


Figura 8. Tensión  $\sigma_{rz}$  en el instante de máxima deformación. Cálculo cuasi-estático.

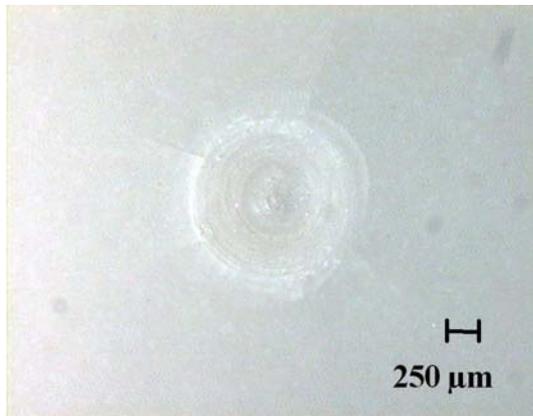
### 2.2.2 Comparación experimental entre ensayos dinámicos y cuasi-estáticos

Para comprobar la equivalencia entre ensayos cuasi-estáticos y dinámicos se hicieron experimentos con un péndulo de impacto<sup>[7]</sup> dotado de una célula de carga que registraba la fuerza desarrollada durante el impacto (figura 9), utilizando un dardo con una punta de 3 mm de radio de curvatura y realizando impactos sobre una pieza de gres de pasta roja con un esmalte de gres porcelánico esmaltado, registrándose la curva de fuerza en función del tiempo. A partir de esta curva se obtuvo la fuerza máxima.

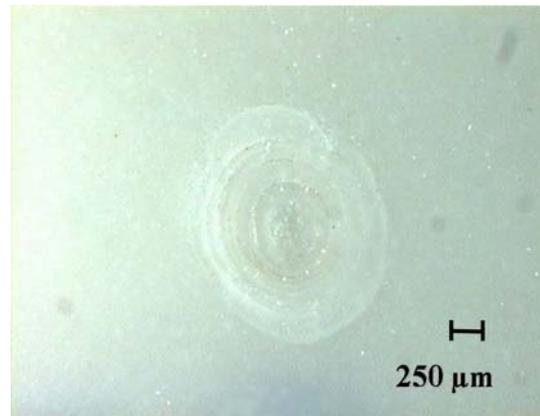
A continuación se situó esta misma punta en un adaptador para realizar el ensayo en condiciones estáticas, aplicando la fuerza máxima medida en los ensayos dinámicos. En la figura 10 se muestra un ejemplo de los resultados obtenidos. Se observa que, para un determinado nivel de carga máxima, el daño realizado es similar en el ensayo cuasi-estático y en el dinámico, corroborando los resultados obtenidos teóricamente.



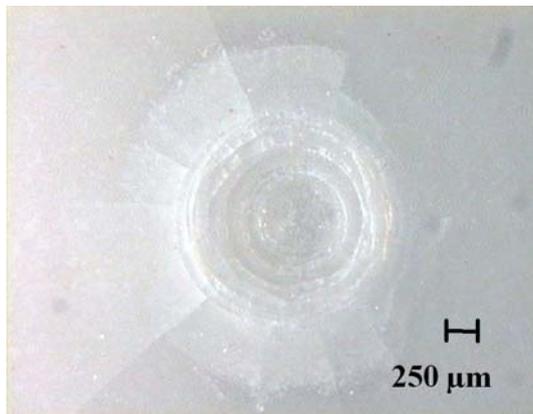
Figura 9. Vista general del dispositivo empleado para la determinación de la resistencia al impacto.



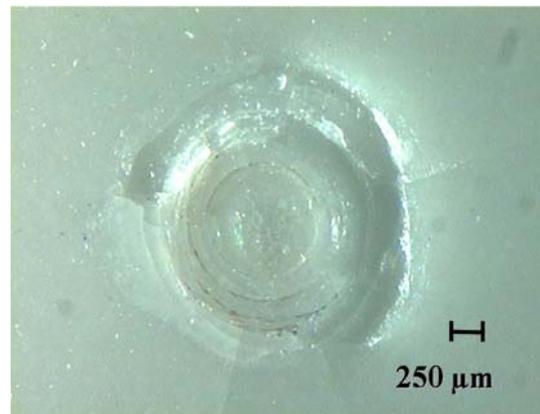
a.  $F_{\max}=2030$  N. Cuasi-estático.



b.  $F_{\max}=2030$  N. Dinámico.



c.  $F_{\max}=4080$  N. Cuasi-estático



d.  $F_{\max}=4080$  N. Dinámico

Figura 10. Aspecto del daño producido a diferentes cargas en ensayos de impacto cuasi-estático y dinámico.

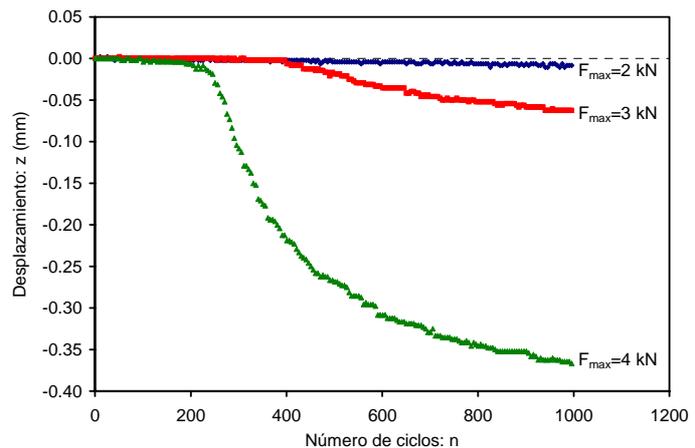
### 3 Propuesta de un método de cuantificación de la resistencia al impacto

#### 3.1 Descripción del ensayo

Los resultados presentados en el apartado anterior plantearon la posibilidad de realizar ensayos cuasi-estáticos con el fin de cuantificar la resistencia al impacto de una baldosa cerámica. Se llevaron a cabo experimentos en los que se aplicaban cargas cíclicas con un dardo (indentador) sobre una pieza colocada con resina epoxi sobre un sustrato de hormigón. La carga máxima aplicada oscilaba sinusoidalmente entre un valor máximo  $F_{\max}$  y uno

mínimo  $F_{\min} = F_{\max}/10$ , seleccionando  $F_{\max}$  como una variable. A medida que se aplicaba la carga sinusoidal, el desplazamiento del dardo iba cambiando también de forma sinusoidal. Si el material fuera elástico y no se produjeran fracturas, el desplazamiento máximo del dardo se alcanzaría cuando la fuerza fuera máxima y sería constante en el tiempo. En cambio, si el material sufriera algún tipo de deterioro, este desplazamiento máximo podría ir aumentando a medida que se fueran realizando los ciclos.

Se llevaron a cabo ensayos cíclicos con fuerzas máximas de 2, 3 y 4 kN; para cada una de estas cargas se varió el número de ciclos y la frecuencia de la oscilación. Con el fin de reducir errores se realizaron 3 ensayos en cada una de las condiciones anteriores.



**Figura 11. Penetración del dardo en función del número de ciclos para diferentes cargas máximas.**

En la figura 11 se muestra el resultado típico de un ensayo cíclico. En esta figura se ha representado la penetración del indentador ( $z$ ) en función del número de ciclos ( $n$ ), para los tres valores de fuerza máxima ensayados. En esta gráfica se observan tres etapas:

- *Etapa inicial:* en el que la pendiente es prácticamente constante para una carga dada. Se empieza a producir el deterioro del material.
- *Etapa intermedia:* en el que la pendiente aumenta de forma muy marcada. El deterioro del vidrio es muy significativo.
- *Etapa final:* en el que la pendiente de  $z$  en función del tiempo se reduce de nuevo. Posiblemente esta reducción sea una consecuencia de que, al aumentar el deterioro, la superficie de contacto entre la punta del dardo y la pieza es mayor. Esto reduce la presión en la zona de contacto y, por tanto, la intensidad del campo de tensiones que hace avanzar las grietas.

### 3.2 Parametrización de la resistencia al impacto

Con el objetivo de obtener información cuantitativa de estos ensayos cíclicos se procedió a ajustar las curvas de la figura 11 una ecuación empírica de la forma:

$$\text{Ec. 1} \quad z = z_0 - m_1 n - A(1 - m_2 n) \left(1 - e^{-(n-n_0)/\tau}\right) u(n - n_0)$$

donde  $u(x)$  es la función escalón unidad, definida como:

$$u(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } x < 0 \\ 1 & \text{si } x \geq 0 \end{cases}$$

- $z_0$ : Corresponde al desplazamiento inicial. No depende de las características del material a analizar. (mm).
- $m_1$ : Es la pendiente del tramo inicial de la curva  $z(n)$ . (mm/ciclo).
- $m_2$ : Parámetro relacionado con la pendiente del tramo final de la curva  $z(n)$ . (mm/ciclo).
- $A$ : Diferencia en la ordenada de la recta inicial ( $-m_1 n$ ) y la asíntota a la que tiende  $z(n)$ . (mm).
- $n_0$ : Número de ciclos al cual se produce la transición entre las etapas inicial e intermedia.
- $b$ : Cuantifica la rapidez (expresada en número de ciclos) de la transición entre el tramo medio y el final. Al aumentar  $b$  la transición se produce más lentamente.

El significado físico de las constantes  $z_0$ ,  $m_1$ ,  $m_2$ ,  $A$ ,  $n_0$  y  $b$  se muestra gráficamente en la figura 12.

El parámetro que se correlaciona más con la resistencia al impacto es  $m_1$ , que es el que controla el inicio del daño producido en la pieza. Cuando se alcanza la etapa intermedia, el daño es ya excesivamente elevado.

## 4 Factores que influyen sobre la resistencia al impacto

### 4.1 Anclaje de las baldosas (colocación)

#### 4.1.1 Resultados de la simulación

Con el objeto de analizar las tensiones que se desarrollan durante un impacto en condiciones de anclaje deficiente se realizó una simulación por elementos finitos, utilizando la geometría indicada en el apartado 2.1.2, y considerando una carga aplicada de 3 kN. En la figura 13 se muestran los mallados utilizados para simular el anclaje correcto y el deficiente. Éste último se simuló creando un hueco cilíndrico de 20 mm de diámetro debajo de la pieza, sobre la vertical del dardo.

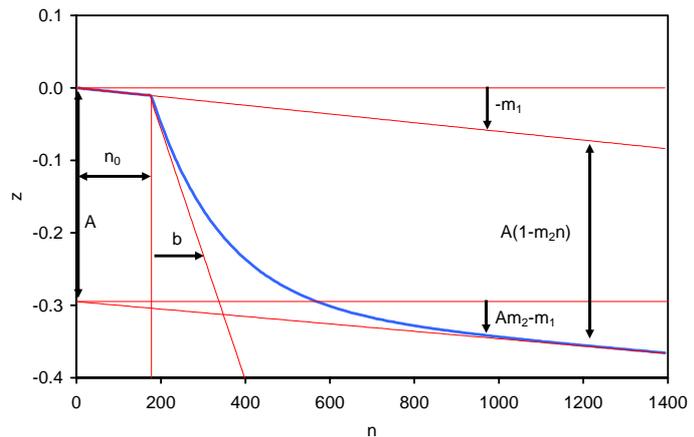


Figura 12. Significado geométrico de los parámetros de la ec. 1.

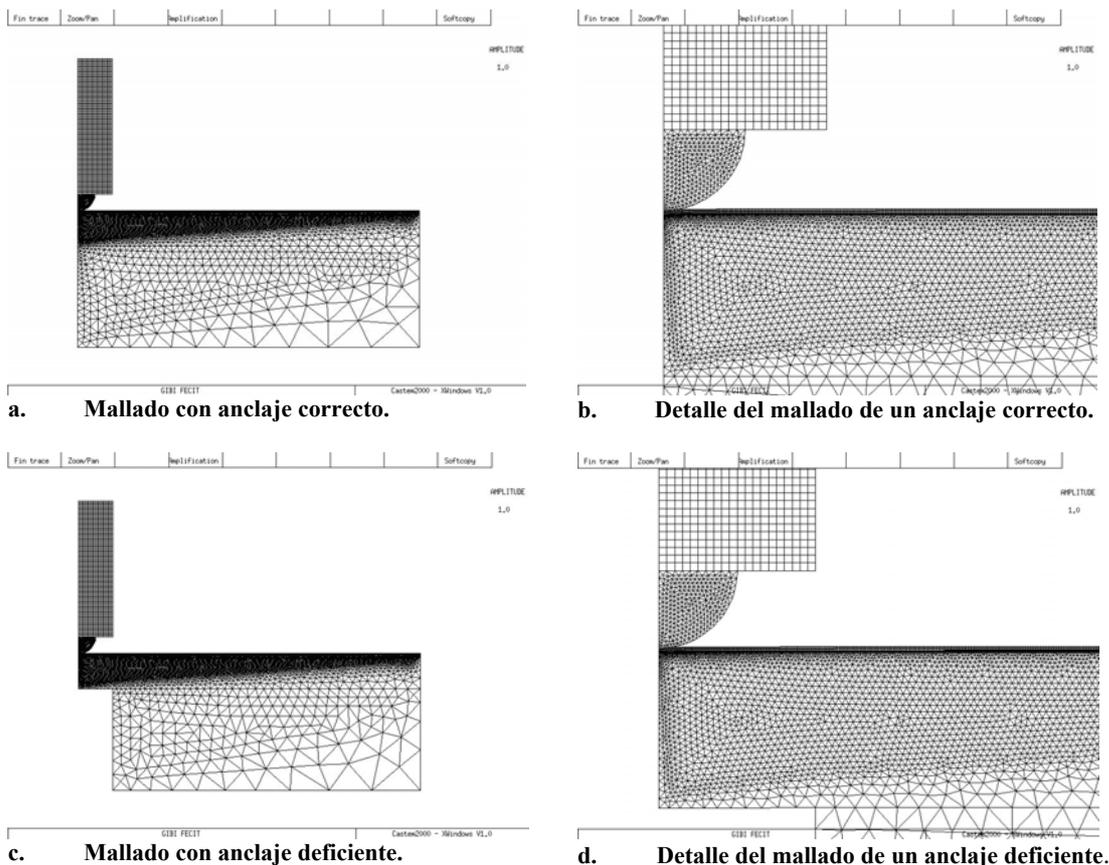


Figura 13. Mallado realizado para calcular el efecto de una anclaje correcto (a y b) y deficiente (c y d).

Al aplicar la carga, el perfil de tensiones en la pieza, en la zona de contacto con el dardo, es muy similar en ambos casos (anclaje correcto y deficiente). Los mayores cambios en el perfil de tensiones se dan en la parte inferior del soporte. La figura 14 muestra la tensión residual en el caso de una colocación correcta, siendo el valor máximo de la tensión 5 MPa. La figura 15 presenta, en cambio, el perfil de tensiones en el caso de un anclaje deficiente. Se observa claramente que aparece una tensión de tracción muy elevada y concentrada en la

parte inferior de la pieza; esta tensión alcanza los 22 MPa, es decir, más de 4 veces el valor que tendría si el anclaje fuera correcto. Si la fuerza aplicada fuera superior, esta tensión podría producir la rotura de la pieza por flexión. En esta última situación la tipología de la fractura sería muy distinta: no se llegaría a producir un desconchado, sino una fisuración de la pieza.

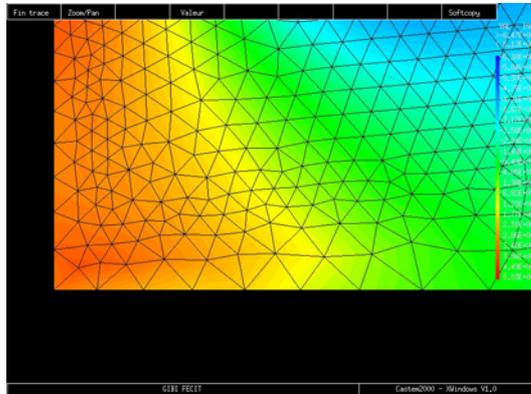


Figura 14. Tensión  $\sigma_{rr}$  en la zona inferior del soporte. Anclaje correcto.

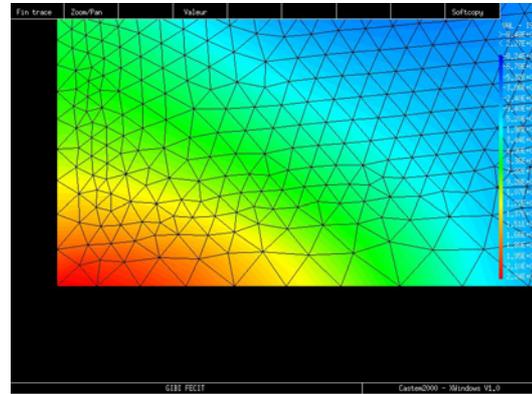


Figura 15. Tensión  $\sigma_{rr}$  en la zona inferior del soporte. Anclaje deficiente.

#### 4.1.2 Ensayos de laboratorio para reproducir un anclaje deficiente

Para verificar, en condiciones de laboratorio, el efecto de un anclaje deficiente, se situó una pieza sobre una arandela de nylon (figura 16) y, a continuación, se aplicó una fuerza mediante el dardo, de manera que éste se alineara con el centro de la arandela. Los resultados obtenidos (figura 17) muestran que, aunque el dardo genera una ligera huella, no se produce desconchado sino la rotura de la pieza.



Figura 16. Tensión  $\sigma_{rr}$  en la zona inferior del soporte. Anclaje correcto.

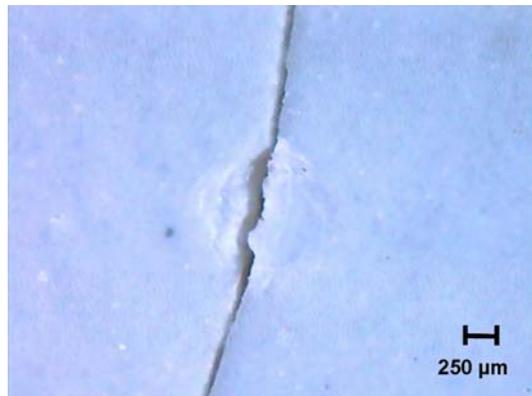


Figura 17. Tensión  $\sigma_{rr}$  en la zona inferior del soporte. Anclaje deficiente.

## 4.2 Naturaleza del engobe y del esmalte

Para establecer el efecto del engobe y del esmalte en la resistencia al impacto se diseñaron ensayos, en condiciones industriales, en los que se varió el tipo de engobe y de esmalte. Las piezas se colocaron con resina epoxi sobre un sustrato de hormigón y se determinó su resistencia al impacto utilizando el parámetro  $m_1$  de la ec. 1. En la tabla 1 pueden verse los resultados de las probetas en que se varió el tipo de engobe (estándar y refractario).

Se observa que las piezas que contienen el engobe refractario presentan un valor de  $m_1$  más elevado. Este resultado puede deberse a que la mayor refractariedad puede conducir a un menor módulo de elasticidad y a una mayor deformabilidad del engobe, lo que, a su vez, incrementa las tensiones en el esmalte.

**Tabla 1. Características de las piezas industriales de prueba ensayadas.**

Referencia	Soporte	Engobe	Esmalte	Curva cocción	$m_1$ (nm/ciclo)
T1	Porcelánico	Porcelánico estándar	Mate gres porcelánico	Gres porcelánico	$51 \pm 10$
T2	Porcelánico	Porcelánico refractario	Mate gres porcelánico	Gres porcelánico	$158 \pm 16$

En la tabla 2 se muestran los resultados obtenidos al variar el tipo de esmalte. Se constata que, trabajando con dos tipos de esmaltes bastante diferentes, la resistencia al impacto es prácticamente la misma.

**Tabla 2. Características de las piezas industriales de prueba ensayadas.**

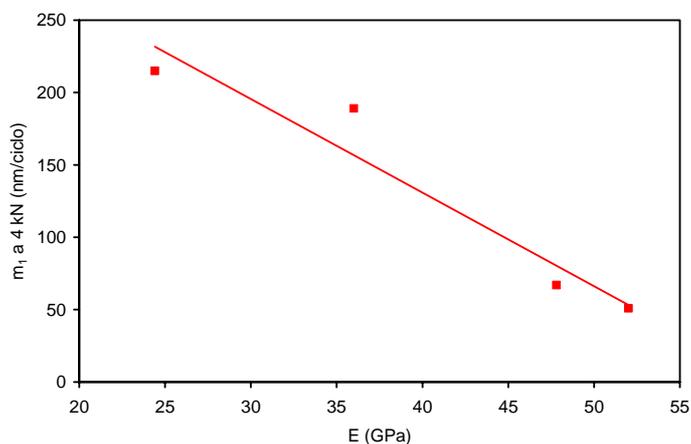
Referencia	Soporte	Engobe	Esmalte	Curva cocción	$m_1$ (nm/ciclo)
T3	Porcelánico	Gres	Brillo gres	Gres	$215 \pm 18$
T4	Porcelánico	Gres	Mate gres	Gres	$200 \pm 17$

### 4.3 Naturaleza del soporte

Para analizar el efecto del soporte se prepararon las piezas que se indican en la tabla 3, en los que se varió el tipo de soporte (gres / gres porcelánico) y la curva de cocción. En el caso de las piezas cocidas con la curva del gres porcelánico fue necesario situar la pieza sobre una placa refractaria. En la tabla 3 se indican asimismo el módulo de elasticidad ( $E$ ), la resistencia mecánica ( $\sigma_R$ ) y el parámetro  $m_1$ .

Se observa que no existen grandes diferencias entre el valor de  $m_1$  para las piezas de gres y gres porcelánico cocidas con la misma curva de temperatura. Si se compara cada material cocido con su curva correspondiente, la conclusión que se extrae es que el gres porcelánico presenta mejores prestaciones frente al impacto.

Existe un paralelismo entre las propiedades mecánicas ( $E$ ,  $\sigma_R$ ) y la resistencia al impacto, cuantificada como  $m_1$ . En la figura 18 se ha representado  $m_1$  en función de  $E$ , observándose que a medida que  $E$  aumenta,  $m_1$  disminuye (se incrementa la resistencia al impacto).



**Figura 18. Evolución del parámetro  $m_1$  en función del módulo de elasticidad.**

**Tabla 3. Características de las piezas industriales de prueba ensayadas.**

Referencia	Soporte	Esmalte	Curva cocción	E (GPa)	$\sigma_R$ (MPa)	$m_I$ (nm/ciclo)
T5	Gres	Brillo gres	Gres	$36.0 \pm 1.2$	$36.7 \pm 1.7$	$189 \pm 38$
T3	Porcelánico	Brillo gres	Gres	$24.4 \pm 0.6$	$27.7 \pm 1.2$	$215 \pm 18$
T6	Gres	Mate porcelánico	Gres porcelánico sobre refractario	$47.8 \pm 1.5$	$45.2 \pm 1.9$	$67 \pm 10$
T1	Porcelánico	Mate porcelánico	Gres porcelánico	$52.0 \pm 1.0$	$52.4 \pm 1.7$	$51 \pm 10$

## 5 Conclusiones

- Se ha comprobado que durante el impacto aparece una tensión muy elevada, pero también muy concentrada en las proximidades del punto de impacto.
- Los resultados de las simulaciones indican que el impacto de un objeto sobre una baldosa no involucra aceleraciones importantes en la pieza. Esto hace posible considerar el impacto como un proceso cuasi-estático. Este resultado ha sido verificado en condiciones de laboratorio.
- Se ha desarrollado un método que permite cuantificar la resistencia al impacto de una pieza cerámica. Este método se basa en determinar el deterioro que sufre la pieza como consecuencia de la aplicación de una carga cíclica, y conduce a un parámetro  $m_I$  que cuantifica este deterioro.
- La existencia de un anclaje deficiente conduce a la rotura de la pieza, sin que aparezca un desconchado significativo. Los cálculos efectuados indican que la rotura se produce porque en la parte inferior de la pieza aparece una tensión de tracción muy significativa.
- El uso de engobes más o menos refractarios tiene una influencia importante sobre la resistencia al impacto. Al aumentar la refractariedad disminuye la resistencia al impacto, posiblemente como consecuencia de una reducción en el módulo de elasticidad.
- La naturaleza del vidriado tiene poca influencia sobre la resistencia al impacto.
- El soporte ejerce un papel muy importante en la resistencia al impacto. En general, soportes con módulos de elasticidad más elevados conducen a mejores comportamientos frente al impacto. Este resultado se debe a que, al aumentar el módulo de elasticidad, se reduce la deformación en el vidriado, reduciéndose las tensiones de cizalla y tracción.

## 6 Bibliografía

- [1] UNE-EN ISO 10545-5. Baldosas cerámicas - Determinación de la resistencia al impacto por medición del coeficiente de restitución.
- [2] SILVA, G et al. Development of a new method of evaluating impact resistance. *Key Eng. Mater.*, 206-213, 1815-1818, 2002.
- [3] MARCO, J. et al. Aplicación de la acelerometría a la medida de propiedades mecánicas de materiales. *Téc. Cerám.*, 303, 621-635, 2002.
- [4] BEAKE, B.D. et al. Micro-impact testing: a new technique for investigating fracture toughness. *Thin Solid Films*, 398-399, 438-443, 2001.
- [5] Code Aster. <http://www.code-aster.org> [Consulta: 2007-09-27].
- [6] FISHER-CRIPPS, A.C. Stress Analysis of contact deformation in quasi-plastic ceramics. *J. Am. Ceram. Soc.*, 79 (10), 2609-2618, 1996.
- [7] SILVA MORENO, G. *Estudio experimental de la durabilidad de baldosas cerámicas: resistencia al impacto y a la abrasión*. Castellón: UJI, 2005. [Tesis Doctoral]