

# OPTIMIZACIÓN DE LOS ELEMENTOS DE REFUERZO EN LA LÁMINA CERÁMICA

**A. Beltrán, E. Boix, I. Escrig, M.L. Soriano, G. Silva**

**Instituto de Tecnología Cerámica (ITC). Asociación de Investigación de las Industrias Cerámicas (AICE). Universitat Jaume I. Castellón. España.**

## RESUMEN

El reducido espesor y gran formato de las láminas cerámicas compromete sus prestaciones mecánicas para usos en los que estas sean relevantes.

Uno de estos usos es el de pavimento, principalmente para tránsito peatonal con desplazamiento de cargas ligeras o medias. Por tanto, para viviendas particulares o locales públicos comerciales y de servicios.

Para mejorar el comportamiento mecánico de las láminas, actualmente se está utilizando refuerzo mediante materiales compuestos que consisten en mallas de fibra de vidrio adheridas a las láminas por su parte posterior. Sin embargo, no existe un estudio metodológico que evalúe las propiedades que aporta el sistema de refuerzo actual a la lámina cerámica e intente optimizarlas o buscar alternativas que mejoren estas propiedades.

Para realizar este estudio, inicialmente se requiere un análisis estadístico de la influencia de los diferentes elementos que intervienen en el conjunto lámina cerámica-sistema de refuerzo, respecto a aspectos que pueden comprometer el comportamiento de la lámina cerámica en el pavimento, como son la resistencia a impacto y la respuesta frente a cargas concentradas.

Esta información sirve para definir las combinaciones lámina cerámica, tipo de tejido, fibras y adhesivo para la matriz que se evalúan frente a las prestaciones consideradas como relevantes en el uso como pavimento a evaluar. Las prestaciones consideradas son:

- Comportamiento frente a cargas estáticas que someten al sistema a compresión.
- Resistencia a impacto de cuerpos duros.
- Comportamiento frente a cargas dinámicas por rodadura.

Cuestión por considerar también, es el comportamiento de la lámina con refuerzo asociado a capas inferiores, rígidas o deformables, que condicionan el resultado del conjunto denominado sistema cerámico.

Todo lo indicado abre una vía de trabajo muy interesante respecto a la optimización de los elementos de refuerzo en la lámina cerámica que permitan asegurar un buen comportamiento como pavimento.

## 1. INTRODUCCIÓN

En este trabajo se considera lámina cerámica a las placas cerámicas con dimensiones de hasta 3,2 m de longitud y con espesores variables desde 3 mm hasta 6 mm. Estas placas se producen principalmente utilizando tecnologías de conformado específicas.

Existen aspectos que potencian este producto frente a las baldosas cerámicas de espesor tradicional. Al tratarse de una baldosa de bajo espesor, se disminuye sensiblemente el consumo de materias primas y energía requerido para su fabricación, siendo un producto a priori más sostenible, además, el menor peso de las placas resulta ventajoso desde el punto de vista arquitectónico.

Sin embargo, los requerimientos mecánicos derivados de los usos más exigentes, por ejemplo, uso como pavimento o como fachada, condicionan la expansión de la lámina debido al recelo que existe frente a las prestaciones de este material para estos usos.

Resulta por tanto esencial a la hora de abordar la introducción de la lámina cerámica en usos con elevados requerimientos mecánicos, asegurar un adecuado comportamiento que minimice el riesgo de disfunciones y patologías. Actualmente existen algunos fabricantes de lámina cerámica que utilizan sistemas de refuerzo en las mismas para mejorar el citado comportamiento mecánico.

Estos elementos de refuerzo son materiales compuestos o material composite, formados por dos o más componentes, de forma que las propiedades del conjunto son superiores que las de los componentes por separado. Los composites más empleados, por su ligereza y sus excelentes propiedades mecánicas, son los materiales compuestos de matriz polimérica con refuerzos en forma de tejido de fibras.

Actualmente, en el sector cerámico se ha reproducido la técnica utilizada en la fabricación de la piedra natural de dotar de una malla de refuerzo de fibra de vidrio a la lámina para intentar mejorar su comportamiento. Esto se ha realizado sin existir un estudio previo en profundidad sobre la utilización de otros tipos de mallas y materiales en la matriz y en las fibras que puedan optimizar el comportamiento de la lámina en usos que requieren de elevadas prestaciones mecánicas.

La mejora en el refuerzo de la lámina resulta muy relevante para minimizar los riesgos de aparición de problemas derivados de los requerimientos del propio uso, pero también derivados de deficiencias en el proceso de diseño o ejecución de las capas inferiores o en la propia instalación de las láminas cerámicas. Este refuerzo pretende mejorar el comportamiento frente a impacto y cargas y la estabilidad. Así pues, la optimización del refuerzo de las láminas cerámicas es una necesidad para facilitar la introducción de forma significativa de este tipo de baldosas en usos con requerimientos mecánicos más exigentes.

Por lo que, aplicado a la realidad de la lámina cerámica (formatos extra grandes y espesores muy reducidos), se va a desarrollar una línea de investigación para identificar las mejores combinaciones de tipos de mallas a utilizar, fibras que conforman las mallas y productos para la matriz que cohesiona tanto al propio refuerzo como al refuerzo con la lámina. Se va a considerar también la utilización de materiales naturales, que requieran poca transformación o reciclados y económicamente viables.

## 2. DISEÑO DE EXPERIMENTOS Y ESTUDIO PREVIO DE LAS VARIABLES DEL SISTEMA DE REFUERZO

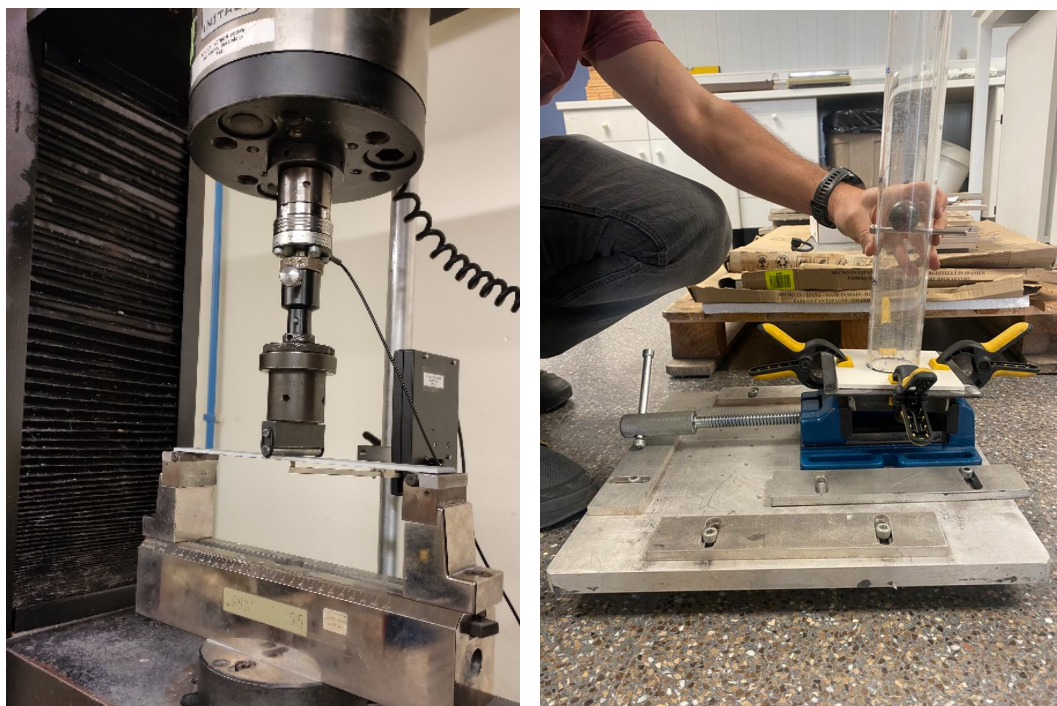
Como punto de partida se requiere conocer la influencia de las diferentes variables que conforman el conjunto de la lámina cerámica y el sistema de refuerzo. Para ello se realiza un diseño de experimentos.

En este estudio previo se contemplan como propiedades mecánicas significativas el comportamiento frente a flexión y la resistencia a impacto. Se buscan unas condiciones de ensayo (Figura 1) que permitan resaltar la incidencia en el comportamiento de las diferentes variables, aunque estas condiciones no sean representativas de las condiciones de uso reales.

Los valores a evaluar en el estudio son la carga a la cual rompe la probeta para el ensayo de flexión y la energía de impacto a la cual se generan desconchados (pérdida de material) o fisuras radiales de longitud superior a 10 mm.

A continuación, se recogen las variables y los factores que se han tenido en cuenta:

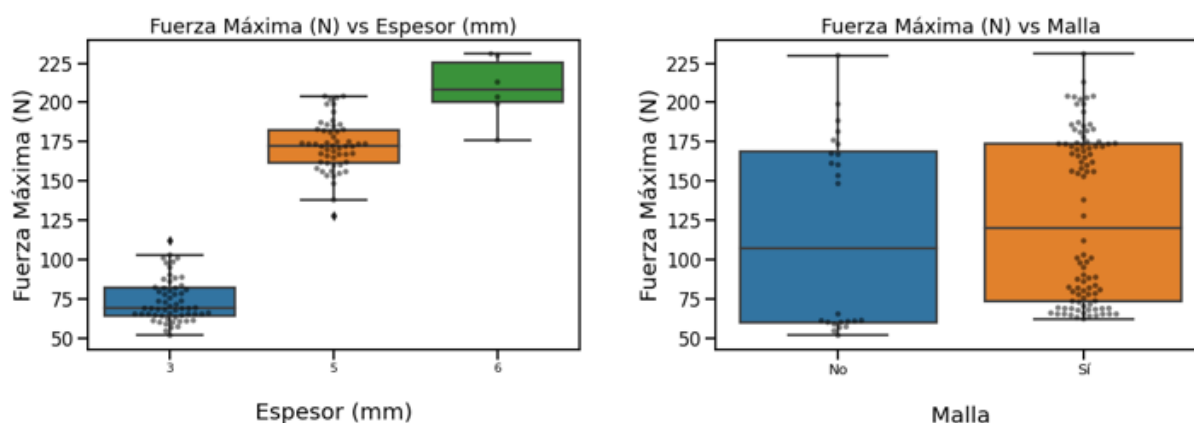
| Variable              | Tipos   |                     |                                      |         |
|-----------------------|---------|---------------------|--------------------------------------|---------|
| Fibra                 | Vidrio  | Carbono             | Aramida                              | Natural |
| Tejido                | Tafetán | Sarga               | Red (sólo impacto)                   |         |
| Espesor de la lámina  | 3 mm    | 5 mm (sólo flexión) | 6 mm                                 |         |
| Adhesivo de la matriz | Epoxi   | Poliuretano         | Poliuretano aplicado industrialmente |         |

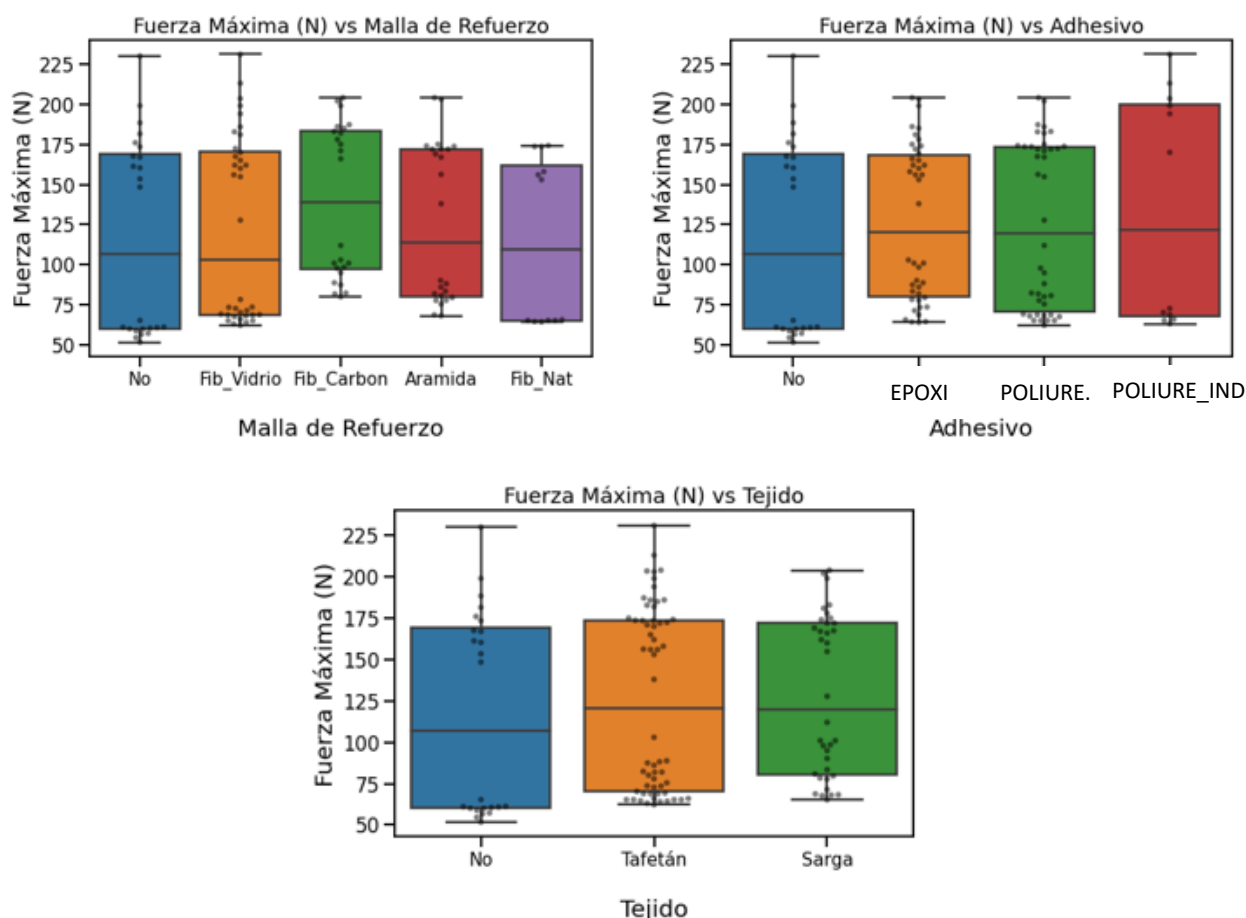


**Figura 1:** Izquierda: Ensayo de flexión. Probetas de 30x300 mm, distancia entre apoyos 180 mm. Derecha: Impacto, probetas de 130x130 mm apoyadas sobre un marco con un hueco central de 100x100 mm

## 2.1 COMPORTAMIENTO A FLEXIÓN

En primer lugar, se realiza un análisis descriptivo y gráfico para el cual se generan los diagramas Box-Plot con el fin de identificar diferencias y asimetrías, valores atípicos y homogeneidad de varianza.





**Figura 2:** Diagramas Plot-box del conjunto de ensayos de resistencia a flexión

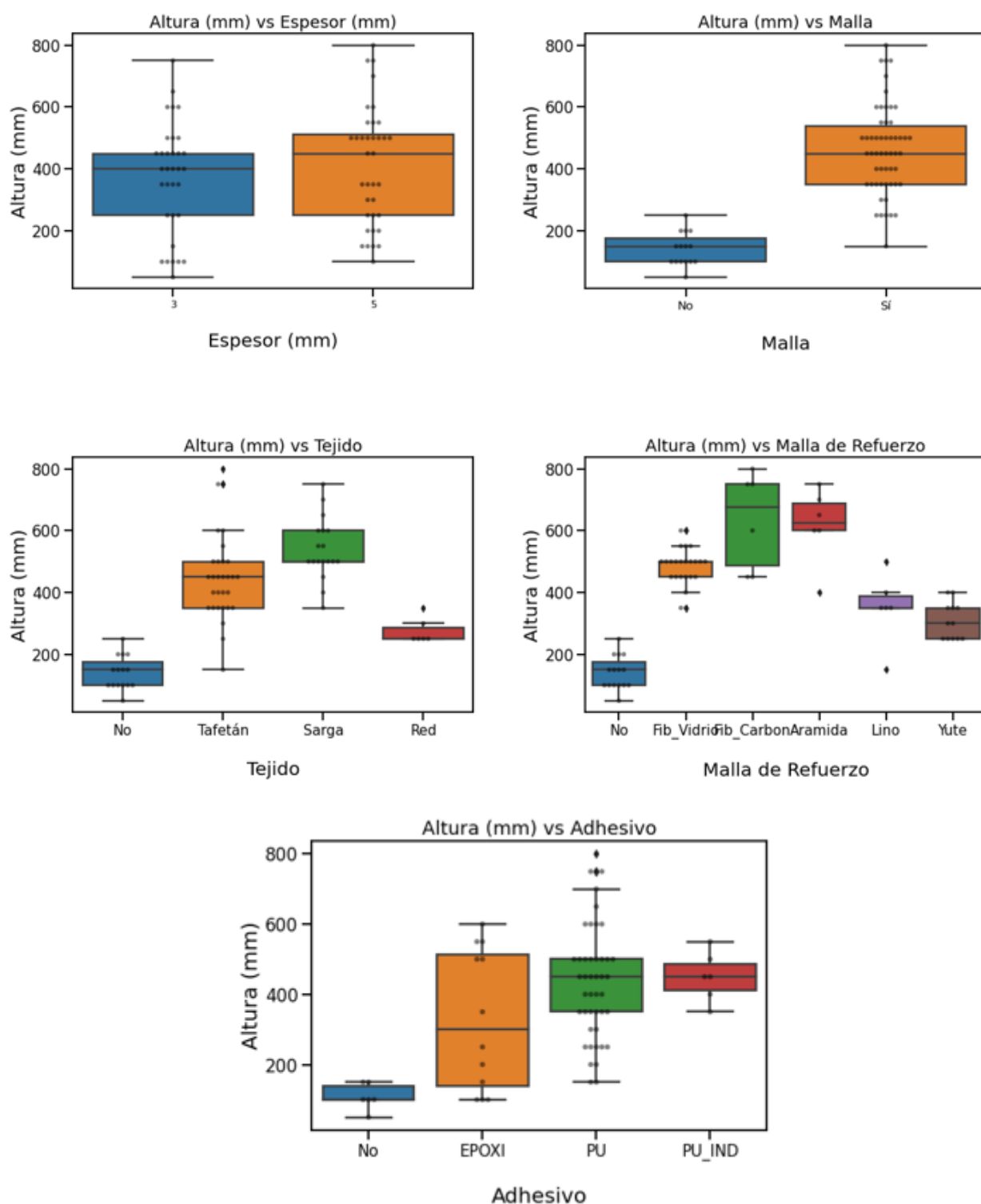
Posteriormente, para la flexión se realiza un **experimento factorial completo**, que en estadística es un experimento cuyo diseño consta de dos o más factores, cada uno con distintos valores o niveles, cuyas unidades experimentales cubren todas las posibles combinaciones de dichos niveles en todos los factores.

Este tipo de experimentos permiten realizar el estudio del efecto de cada factor sobre la variable respuesta, así como el efecto de las interacciones entre factores sobre dicha variable. La herramienta utilizada para analizar los factores característicos del sistema de refuerzo de las láminas cerámicas se denomina técnica de análisis de varianza (ANOVA) de tres vías.

Los resultados obtenidos en el estudio se resumen a continuación:

- ✓ El espesor de la lámina es la variable relevante.
- ✓ Láminas cerámicas de espesores 5 y 6 mm no mejoran significativamente su resistencia a la flexión mediante el uso de mallas de refuerzo. Sin embargo, si se nota incidencia en láminas de espesor 3 mm. En este caso:
  - El material de refuerzo más favorable para incrementar la resistencia a la flexión de las láminas es la fibra de carbono, seguida de la aramida.
  - El tejido sarga parece el más favorable para incrementar la resistencia a la flexión de las láminas.
  - Los adhesivos de la matriz del refuerzo no tienen un impacto estadísticamente significativo en la resistencia a la flexión de las láminas.

## 2.2 RESISTENCIA A IMPACTO



**Figura 3:** Diagramas Plot-box de los ensayos de resistencia a impacto

Una vez obtenidos los resultados del ensayo de impacto, el estudio estadístico nos permite diseñar el análisis experimental.

Las conclusiones derivadas del estudio de los resultados obtenidos respecto a la resistencia a impacto son:

- ✓ La presencia de refuerzo incrementa apreciablemente la resistencia al impacto.
- ✓ Espesor (3-5 mm): En piezas con refuerzo no se observan diferencias significativas derivadas del espesor.
- ✓ Tejido: El tipo de tejido sarga parece el mejor posible para la lámina con refuerzo.
- ✓ Malla de refuerzo: La fibra de carbono, la aramida y después la fibra de vidrio son las mejores mallas de refuerzo.
- ✓ Adhesivo: No se observan grandes diferencias en función del adhesivo.
- ✓ Piezas sin refuerzo: En este caso el espesor sí influye significativamente.

En base a estos resultados, en este trabajo se categorizan las mallas de refuerzo como de **altas prestaciones** (fibra de carbono y aramida), **estándar** (fibra de vidrio) y de **materiales naturales**.

### 3. VALIDACIÓN DE LAS PROPUESTAS DE LOS SISTEMAS DE REFUERZO

Un estudio del estado del arte ha permitido conocer que los sistemas actuales de cerámica reforzada están constituidos, en su mayoría, por láminas cerámicas reforzadas con malla de fibra de vidrio, tejida en tafetán, de unos 200g/m<sup>2</sup> y resina de poliuretano como matriz, por lo que se tomarán las prestaciones de este tipo de sistemas como referencia.

Tal como se ha indicado anteriormente, para el estudio de la influencia en el comportamiento mecánico de la lámina con refuerzo para uso como pavimento de tránsito peatonal, se va a considerar la respuesta frente a cargas puntuales progresivas, impacto de cuerpos duros y cargas dinámicas por rodadura.

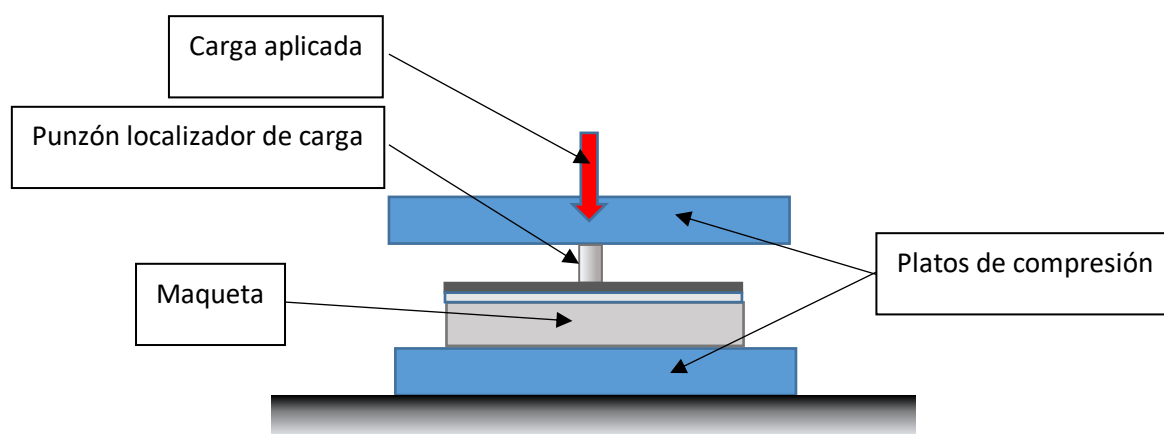
Así mismo, se estudia el comportamiento sobre base rígida (base de hormigón de 4 cm de espesor) y sobre base deformable (lámina funcional de espuma de poliestireno extruido XPS, recubierta por ambas caras de un material de refuerzo y un revestimiento geotextil con espesor total de 19 mm).

#### 3.1 ESTUDIO DE LOS SISTEMAS DE REFUERZO FRENTE A CARGAS PUNTUALES PROGRESIVAS

El ensayo consiste en ejercer, sobre la cara superior de las maquetas, una fuerza progresiva de compresión normal en un área central de 625 mm<sup>2</sup>. Para ejercer esta presión se utilizó un punzón localizador de carga cilíndrico de acero templado de 28,21 mm de diámetro (área de 625 mm<sup>2</sup>). Se determina la resistencia y la deformación a la carga puntual de diferentes maquetas con un área cuadrada de 300 mm x 300 mm.

Para identificar la fuerza y deformación a la que se produce la primera grieta o defecto en las probetas, se va ejerciendo una fuerza progresiva parando y descargando cada cierto intervalo para poder observar la superficie. Los intervalos aplicados fueron 2, 4, 8, 16, 20 y 25 MPa.

Se va a tomar como valor de referencia para la resistencia a la compresión el de  $4 \text{ N/mm}^2$  (**4 MPa**), que se corresponde con una carga concentrada de 255 kg para cargas ligeras y de  $8 \text{ N/mm}^2$  (**8 MPa**), que se corresponde con una carga concentrada de 510 kg para cargas medias.



**Figura 4:** Esquema del ensayo

A continuación, se indican los resultados obtenidos en los sistemas evaluados.

#### Base rígida

| Sistema                                                                    | Resultado                                         |
|----------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| Lámina de 6 mm de espesor con refuerzo de fibra de carbono tejida en sarga | Resiste cargas de 25 MPa sin aparición de defecto |
| Lámina de 6 mm de espesor sin refuerzo                                     | Resiste cargas de 20 MPa sin aparición de defecto |
| Lámina de 3 mm de espesor con refuerzo de fibra de carbono tejida en sarga | Resiste cargas de 4 MPa sin aparición de defecto  |

Base deformable

| Sistema                                                                                                    | Resultado                                          |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| Lámina de 6 mm de espesor con refuerzo de fibra de carbono tejida en sarga                                 | Resiste cargas de 4 MPa sin aparición de defecto   |
| Lámina de 6 mm de espesor con refuerzo de fibra de vidrio tejida en tafetán (refuerzo estándar industrial) | Resiste cargas de 2,1 MPa sin aparición de defecto |

Interpretación de los resultados

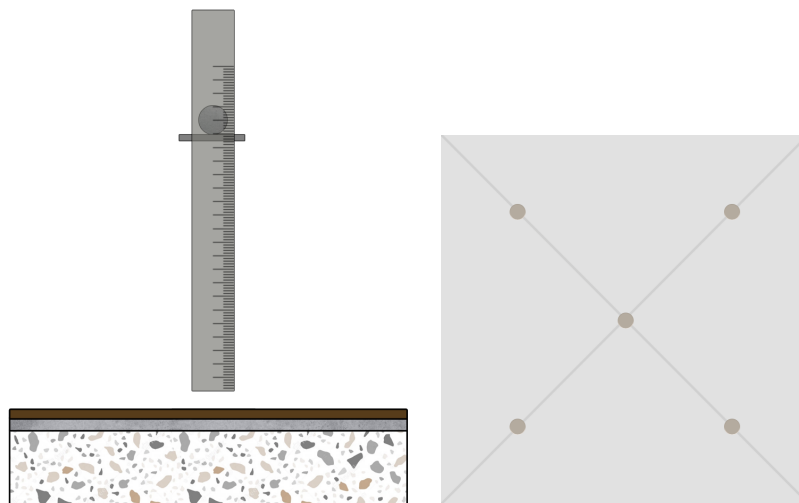
En general, la base sobre la que se asienta la lámina cerámica reforzada o no, condiciona su comportamiento. La lámina cerámica sobre una base deformable presenta peores resultados a carga progresiva que sobre una base rígida.

La lámina cerámica de espesor de 6 mm sobre base rígida supera ampliamente las especificaciones establecidas, incluso sin refuerzo. Sin embargo, sobre base deformable únicamente supera con fiabilidad frente a cargas ligeras si se refuerza con mallas de altas prestaciones.

La lámina cerámica de espesor de 3 mm necesita refuerzo de malla de altas prestaciones para asegurar un comportamiento adecuado al menos frente a cargas ligeras y sobre base rígida. Sobre base deformable no asegura un buen comportamiento en ningún caso.

### 3.2 ESTUDIO DE LOS SISTEMAS DE REFUERZO FRENTE A IMPACTO

Para la realización del ensayo el montaje es el representado a continuación.



**Figura 5:** Izquierda: Esquema del ensayo. Derecha: Puntos de impacto

Se dispone de un tubo con marcas de altura y orificios para colocar el tope que mantiene la bola de acero de  $m=510$  g a la altura deseada hasta que se deja caer libremente sobre las maquetas de los sistemas a ensayar de formato 300x300 mm.

Al retirar el tope metálico, se deja caer la bola de acero, de manera que el punto de impacto quede situado en el centro del tubo. Se producirá un solo impacto, recogiendo la bola después del primer rebote.

Sobre un impacto de 3 J de energía, se aceptará un **nivel de deterioro igual o inferior al nivel 3** según clasificación de la Tabla 1.

| Nivel | Defectos aparecidos                                                                                         |
|-------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 0     | -Ninguna huella alrededor del punto de impacto                                                              |
| 1     | -Fisuras circulares alrededor del punto de impacto<br>-Ni fisuras radiales ni desconchados                  |
| 2     | -Fisura(s) radial(es) de longitud $l \leq 5$ mm (precisar el número)<br>-Ningún desconchado                 |
| 3     | -Fisura(s) radial(es) de longitud $5 \text{ mm} < l \leq 10$ mm (precisar el número)<br>-Ningún desconchado |
| 4     | -Fisura(s) radial(es) de longitud $l > 10$ mm (precisar el número)<br>-Ningún desconchado                   |
| 5     | -Desconchados (pérdidas de material)                                                                        |

**Tabla 1:** Clasificación del nivel de defectos del anexo 6 del Cahier 3778 v.5 bis del CSTB (Francia).

Los resultados obtenidos se recogen a continuación.

#### Base rígida

| Sistema                                                                                                      | Energía de impacto que produce defecto de nivel $\leq 3$ según la Tabla 1 |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|
| Lámina de 3 mm de espesor con refuerzo de fibra de aramida tejida en sarga                                   | 1 J                                                                       |
| Lámina de 3 mm de espesor con refuerzo de fibra de carbono tejida en tafetán                                 | 1,5 J                                                                     |
| Lámina de 5 mm de espesor con refuerzo de fibra natural de lino tejida en tafetán                            | 2 J                                                                       |
| Lámina de 5 mm de espesor con refuerzo de fibra natural de yute tejida en tafetán                            | 1 J                                                                       |
| Lámina de 6 mm de espesor con refuerzo de fibra de carbono tejida en sarga                                   | 3,5 J                                                                     |
| Lámina de 6 mm de espesor con refuerzo de fibra de vidrio tejida en tafetán (refuerzo estándar o industrial) | 3 J                                                                       |
| Lámina de 6 mm de espesor con refuerzo de fibra natural de lino tejida en tafetán                            | 2 J                                                                       |
| Lámina de 6 mm de espesor sin refuerzo                                                                       | 3 J                                                                       |

#### Base deformable

| Sistema                                                                                                      | Energía de impacto que produce defecto de nivel $\leq 3$ según la Tabla 1 |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|
| Lámina de 6 mm de espesor con refuerzo de fibra de carbono tejida en sarga                                   | 3 J                                                                       |
| Lámina de 6 mm de espesor con refuerzo de fibra de vidrio tejida en tafetán (refuerzo estándar o industrial) | 2,5 J                                                                     |
| Lámina de 6 mm de espesor sin refuerzo                                                                       | 0,5 J                                                                     |

### Interpretación de los resultados

En el caso del comportamiento frente a impacto, si consideramos un sistema cerámico conformado por el conjunto de lámina cerámica, refuerzo y base sobre la que se asienta, todas las variables son significativas. De manera que el comportamiento adecuado o no, será función de la combinación de las distintas variables.

Sobre base rígida, la lámina de 6 mm sin refuerzo o con refuerzo estándar o industrial, cumple con las especificaciones. El refuerzo con malla de altas prestaciones mejora el comportamiento, mientras el refuerzo con malla natural lo compromete. Espesores de lámina menores a 6 mm deben valorarse en función del uso y del tipo de refuerzo.

Sobre base deformable, únicamente la lámina cerámica con refuerzo de malla de altas prestaciones cumple con los requerimientos.

## 3.3 ESTUDIO DE LOS SISTEMAS DE REFUERZO FRENTE A CARGAS DINÁMICAS POR RODADURA

El ensayo desarrollado está basado en el método descrito en el anexo 5 del Cahier 3778 v.5 bis del Centre Scientifique et Technique du Bâtiment "Détermination de la résistance au roulage lourd des carreaux céramiques non émaillés", al cual se le ha modificado una serie de características.

El ensayo se realiza sin saltos, y en vez de utilizar 4 probetas de 200x200mm, se utilizan 2 probetas de 400x200mm. La junta se rellena con un adhesivo epoxi a una anchura de 3 mm. El criterio de aceptación del resultado es que **no se produzca hendidura o desperfecto mayor a 1 mm**.



**Figura 6:** Izquierda: Detalle del montaje del ensayo. Derecha: Ejemplo de no cumplimiento del criterio de aceptación

Los resultados obtenidos indican que frente a rodadura la lámina cerámica se comporta adecuadamente en base rígida incluso para espesores de 3 mm. En base deformable se requieren espesores de lámina superiores para superar el ensayo. Los sistemas de refuerzo de mallas de altas prestaciones y malla industrial mejoran el comportamiento, mientras que la malla de fibras naturales no aporta mejora.

#### 4. CONCLUSIONES

- Se ha definido una metodología para la evaluación de la contribución del refuerzo mediante malla en la lámina cerámica respecto a su uso como pavimento con tránsito peatonal y presencia de cargas ligeras o medias.
- La lámina cerámica puede ser apta para el uso estudiado en función del espesor de la misma, tipo de refuerzo y soporte sobre el que se adhiere. Tomando como referencia los espesores de lámina de 3 y 6 mm, en la *Tabla 2* se definen unas recomendaciones de uso en base a los resultados obtenidos en este trabajo.

| Lámina | Tipo de refuerzo                                     | Soporte base rígida |                            |                           | Soporte base deformable |                            |                           |
|--------|------------------------------------------------------|---------------------|----------------------------|---------------------------|-------------------------|----------------------------|---------------------------|
|        |                                                      | Uso particular      | Uso público cargas ligeras | Uso público cargas medias | Uso particular          | Uso público cargas ligeras | Uso público cargas medias |
| 3 mm   | Sin refuerzo / Con cualquier tipo                    | ✗                   | ✗                          | ✗                         | ✗                       | ✗                          | ✗                         |
| 6 mm   | Sin refuerzo                                         | ✓                   | ✓                          | =                         | ✗                       | ✗                          | ✗                         |
|        | Malla de materiales naturales                        | =                   | ✗                          | ✗                         | ✗                       | ✗                          | ✗                         |
|        | Malla de fibra de vidrio (estándar)                  | ✓                   | ✓                          | ✓                         | ✗                       | ✗                          | ✗                         |
|        | Malla de materiales sintéticos de altas prestaciones | ✓                   | ✓                          | ✓                         | ✓                       | ✓                          | =                         |

**Tabla 2:** Criterios de uso de la lámina cerámica para pavimento de tránsito peatonal.

Leyenda:

- ✓ Bajo riesgo de aparición de patologías asociadas al comportamiento mecánico de la lámina cerámica
- = Riesgo de aparición de patologías asociadas al comportamiento mecánico de la lámina cerámica
- ✗ Alto riesgo de aparición de patologías asociadas al comportamiento mecánico de la lámina cerámica

## 5. AGRADECIMIENTOS

El estudio presentado forma parte del proyecto de investigación HARDLAM "Optimización de los elementos de refuerzo en lámina cerámica". Proyecto financiado por el Instituto Valenciano de competitividad empresarial (IVACE) perteneciente a la Generalitat Valenciana, a través de las ayudas dirigidas a centros tecnológicos de la Comunitat Valenciana para el desarrollo de proyectos de I+D de carácter no económico realizados en colaboración con empresas. Con cargo al presupuesto del ejercicio 2022 y cofinanciado por los Fondos Europeos para el Desarrollo Regional (fondos FEDER) con número de expediente IMDEEA/2022/2.

## 6. TRABAJOS PREVIOS

- [1] F. Bazzocchi, S. Bertagni, C. Ciacci, E. Colonna, and V. Di Naso, "Mechanical characterisation of a low-thickness ceramic tile cladding subject to ageing phenomena", *Journal of Building Engineering*, 29, pp. 101105, 2020.
- [2] M. Dondi, G. Guarini, C. Melandri, M. Raimondo, and C. Zanelli, "Resistance to impact of porcelain stoneware tiles", *Ceramics International*, 42, no 5, pp. 5731-5736, 2016.
- [3] MULTI-CERAM "Aplicaciones de sistemas cerámicos multicapa en pavimentos". Fecha inicio: 01/02/2018. Entidad financiadora: IVACE-Instituto Valenciano de Competitividad Empresarial. Cofinanciado por los Fondos Europeos para el Desarrollo Regional (fondos FEDER).
- [4] PAVLAM "Optimización de sistemas de pavimentación con baldosas cerámicas de espesor reducido". Fecha inicio: 01/08/2020. Entidad financiadora: IVACE-Instituto Valenciano de Competitividad Empresarial. Cofinanciado por los Fondos Europeos para el Desarrollo Regional (fondos FEDER).
- [5] THINKER, "Nuevas aplicaciones con baldosas cerámicas de espesor reducido". Fecha inicio: 01/04/2020. Proyecto financiado por el IVACE (Generalitat Valenciana) dentro de la convocatoria de ayudas dirigida a centros tecnológicos de la Comunidad Valenciana en el marco del programa Línea Nominativa GVA 2020.