

INNOVACIÓN EN EL USO DE LA CERÁMICA EN ARQUITECTURA. EL TEJIDO CERÁMICO ESTRUCTURAL



Vicente SARRABLO
Profesor Contratado Doctor
Universitat Internacional de Catalunya
Barcelona

RESUMEN

En este escrito se presenta un nuevo sistema de cubrición basado en un tejido cerámico estructural, al que llamamos Flex-brick, que actúa como un semiprefabricado colaborante flexible que se adapta a cualquier curvatura y que se acabará de hormigonar en obra para formar cubiertas laminares de cerámica armada. Este sistema consigue una considerable agilidad constructiva para cubiertas de geometría curva. Se explican los conceptos de lámina de cerámica armada y semiprefabricación colaborante, así como su aplicación, los ensayos estructurales realizados y las ventajas en la nueva arquitectura. También se muestran algunos ejemplos construidos con este sistema.

1. ANTECEDENTES

Esta investigación sigue los pasos de la obra del ingeniero uruguayo Eladio Dieste, que en los años 40 inaugura un nuevo sistema de cubrición estructural: las cubiertas laminares de cerámica armada. Estas láminas se consiguen con la disposición en retícula de los elementos cerámicos de manera que haya continuidad longitudinal y transversal de juntas para poder alojar en ellas el armado bidireccional, mientras con mortero y hormigón se rellenan las juntas y se cubre el conjunto con una fina capa de compresión. El resultado recuerda al de un forjado

reticular muy delgado en el que los casetones fueran los ladrillos con la tabla vista por el intradós. Pero la principal diferencia con los reticulares, además de su espesor y el empleo de geometrías laminares plegadas, de directriz catenaria o de doble curvatura, es que en las láminas cerámicas los ladrillos no son meros aligerantes de peso, sino que contribuyen en la resistencia general trabajando a compresión.



Fig.1- Camino de estudiantes en Alcalá de Henares *Fig.2-* Envasadora de cítricos en Uruguay

Con este sistema se han construido más de un millón de metros cuadrados en Uruguay, Argentina y Brasil, se han conseguido luces de hasta 50 metros con cantos de lámina no superiores a 12 cm y los casos que se han resuelto son muy variados (*Fig.1* y *2*): grandes espacios para fábricas, depósitos, silos horizontales, polideportivos, iglesias, mercados, estaciones de autobuses, hangares, pero también luces medias en arquitectura residencial, umbráculos y gasolineras.

Con la investigación que se ha seguido sobre este tema desde 1997 se han conseguido una tesis doctoral, dos patentes de invención y los siguientes proyectos subvencionados:

- Proyecto ATYCA - Ministerio de Industria.
- Proyecto IT - Centro de Innovación y Desarrollo Empresarial (Generalitat de Catalunya).
- Proyecto CRAFT - Comisión Europea.

Desde el inicio, el apoyo de la asociación española de fabricantes de ladrillos y tejas HISPALYT ha resultado decisiva en todas las investigaciones.

2. INDUSTRIALIZACIÓN DE LAS LÁMINAS

2.1. Limitaciones de la cerámica armada

Los principales obstáculos que frenan una mayor aplicabilidad de las cubiertas laminares de cerámica armada son:

- 1) la repercusión económica de los encofrados que una cubierta abovedada exige. Se deben proponer técnicas que contemplen la optimización de esta fase de la construcción.
- 2) La excesiva dependencia de la mano de obra que tiene la construcción con ladrillos. Se debe contar con una propuesta de prefabricación que compatibilice con las tendencias de nuestros países: una construcción más rápida, un mayor grado de control de la calidad y mejoras en la seguridad laboral.

Se propone entonces estudiar un sistema de construcción de estas cubiertas que contemple una mayor industrialización en todos sus procesos para fomentar su uso en la edificación contemporánea.

2.2. Propuesta de sistema industrializado: el tejido cerámico estructural

Al sistema industrializado propuesto para la construcción de cubiertas de curvatura simple y fábrica armada con su intradós acabado de ladrillo visto le llamamos Flex-brick. Consiste en el ensamble de bandas paralelas de semiprefabricados flexibles de ladrillos combinados con armaduras que gracias a su flexibilidad inicial se disponen arqueados en obra adaptados a cualquier curvatura de encofrado (*Fig.3 y 4*) y que actúan como colaborantes estructurales del hormigonado conjunto *in situ* por su extradós.



Fig.3- Flex-brick

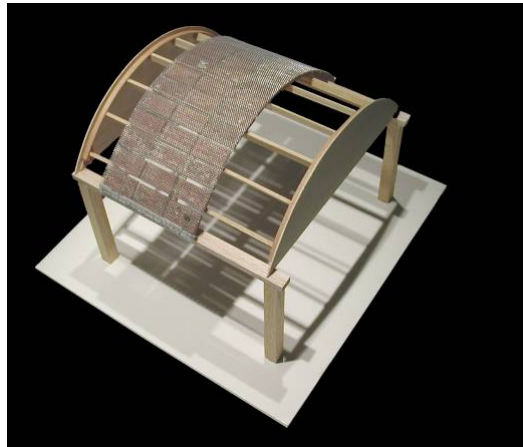


Fig.4- Flex-brick sobre cimbra

Por tanto, el sistema constructivo consta de dos fases: la fase semiprefabricada flexible que curva a voluntad un tejido cerámico en seco y la fase *in situ* rígida que consigue la continuidad material y estructural mediante el hormigonado de las juntas armadas y la capa superior.

El semiprefabricado colaborante del Flex-brick es un tejido o trenzado de barras de acero que sustenta y confina una retícula de ladrillos dispuestos en tabla y ranurados lateralmente para el paso y conexión con el trenzado. Su gran flexibilidad permite que se pueda almacenar y

transportar enrollado en bobinas (*Fig.5*) y que en obra se desenrolle fácilmente sobre el encofrado (*Fig.6*). Éste colabora estructuralmente y sirve de soporte de las barras de armado introducidas en las juntas entre ladrillos en la fase prefabricada. Con otro mallazo colocado en la fase *in situ* por la parte superior de los ladrillos se consiguen los dos planos de armado de la lámina, preparada para rellenar con hormigón sus juntas y su capa superior.

Estas láminas que llegan a la obra en bobina proponen un formato de construcción fácil y acorde con las geometrías curvas. Por ello también se ha desarrollado específicamente para este sistema unos encofrados a base de tejidos metálicos y planchas de poliéster que también se desenrollan sobre una cimbra ligera desde una bobina y que son reaprovechables para diversas puestas.

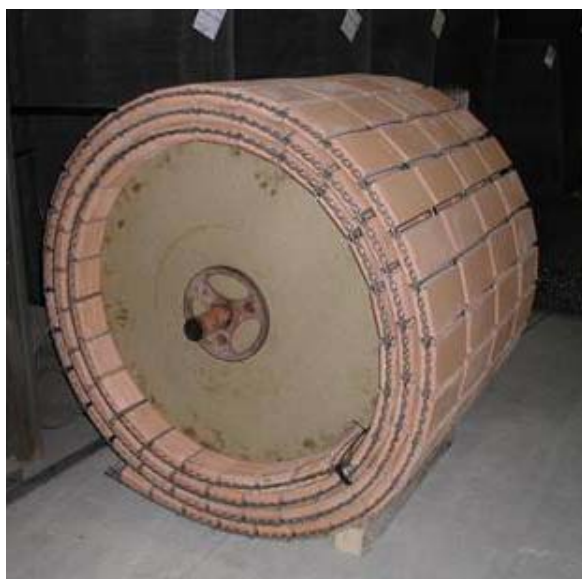


Fig.5- Bobina de Flex-brick



Fig.6- Puesta de Flex-brick

2.3. Ventajas técnicas y competitivas

Como láminas de cerámica armada estas cubiertas ofrecen numerosas ventajas:

- Se trata de cubiertas ligeras: por ser laminares (optimiza su espesor hasta 7 cm) y por ser cerámicas (con espesores equivalentes el peso de la cerámica es de un 25% a un 35% más ligero que el del hormigón); esto supone un ahorro en la construcción de la estructura y de las cimbras y encofrados temporales que las soportan. El cimbrado de estas cubiertas puede ser el mismo requerido para el andamiaje de los operarios.
- Asociar el punto anterior con el bajo precio de la cerámica en el mercado conduce a una relación precio/peso (€/Kg) muy competitiva respecto a otras tipologías de cubierta.

- El armado bidireccional y las geometrías laminares permiten cubrir grandes luces con pequeños espesores y sin necesidad de tímpanos.
- Las construcciones con este tipo de cubiertas demuestran un elevado confort higrotérmico debido a las excelentes propiedades físicas de la cerámica en la regulación de la temperatura y la humedad ambientales.
- Es una solución ecológicamente muy ventajosa: la producción de ladrillos consume menos energía que la del acero y la del hormigón, su componente principal, la arcilla, es abundante en la naturaleza y su extracción no es contaminante. Además, las cubiertas cerámicas pueden reciclarse en su demolición como árido para nuevas construcciones.
- Es una estructura que ya presenta su acabado interior definitivo; no se requiere ningún tratamiento o capa final añadida al intradós por el satisfactorio aspecto de la cerámica, de gran calidez cromática.
- Posibilita una gran velocidad del ciclo encofrado-desencofrado puesto que el 85% de la lámina ya está cocido y tan sólo debe endurecer el 15% del hormigón que se proyecta entre las juntas para que el conjunto sea estable (Dieste ha llegado a desencofrar en 24 horas). Si asociamos esta ventaja a una construcción con encofrados móviles que diariamente permiten avanzar segmentos de una cubierta se consigue una velocidad de ejecución similar a la de la industrialización pesada.
- Su mantenimiento es mínimo debido a la estabilidad química de la cerámica y las reparaciones parciales son fáciles por la composición modular de los ladrillos.
- Ofrecen una excelente resistencia al fuego y, en general, un buen comportamiento frente a sollicitaciones térmicas y reológicas.
- Las láminas de cerámica armada exhiben una notable calidad arquitectónica y formarían parte de las nuevas tendencias favorables al retorno de las cubiertas no planas.

A estas ventajas les añadimos las propias de una mayor industrialización de estas cubiertas para que resulten competitivas en nuestros mercados actuales:

- La prefabricación asegura una mejora de los acabados y del control de calidad ante la actual escasa cualificación de los operarios de la construcción.
- Representa un gran ahorro de mano de obra por la seriación propia de los productos industrializados.
- El montaje de cubiertas prefabricadas mediante grúas acelera apreciablemente el proceso constructivo, cuestión que cada vez resulta de mayor repercusión económica.

- Incrementa la seguridad laboral porque este sistema disminuye el número de operarios y de operaciones en la cubierta.

Y además podemos sumar las ventajas de la innovación tecnológica propuesta como “tejido cerámico estructural”:

- Permite la libre elección en obra de la curvatura de las láminas, escogiendo cualquier parámetro de flecha (peralte de la curva) y cuerda (luz a cubrir). Además de la ilimitada oferta de curvaturas, esta ventaja también beneficia al productor, puesto que ahorra la gran cantidad de moldes que con las innumerables variaciones de las curvaturas requeridas ocuparían mucho espacio en un taller de prefabricación.
- La producción del semiprefabricado ya se realiza en bobina, facilitando su acopio, almacenaje y transporte, a la vez que agiliza el montaje de la cubierta: la grúa sólo debe acompañar el desenrollado de la bobina sobre el encofrado.
- El tejido cerámico ofrece con sólo dos materiales un importante abanico de variables geométricas: distancia entre juntas longitudinales y entre las transversales, ancho de ambas juntas, espesor de lámina, ancho de lámina y longitud de lámina. Esta longitud no está limitada por la del camión de transporte sino por el desarrollo de la bobina (hasta 60 m) por lo que, en la dirección de las directrices de la cubierta, las luces a cubrir con una sola bobina son importantes. Y el ancho de tejido cerámico sólo depende del ancho de la longitud del eje de la bobina que cabe en el medio de transporte (hasta 12 m) y de la potencia de la grúa que lo mueve.
- La prefabricación como un tejido le otorga una considerable precisión geométrica en la continuidad y homogeneidad de las juntas entre ladrillos, lo que garantiza la facilidad de los ensambles de las láminas en obra.
- Permite la continuidad del armado entre láminas prefabricadas en la dirección de sus generatrices, es decir, deja de actuar solamente como una sucesión de arcos de descarga para conseguir una unidad con las propiedades de una lámina autoportante que soporta flexiones en la dirección de sus generatrices y, por tanto, es capaz de soportarse desde unos pocos pilares como una viga de gran canto. Esta propiedad rentabiliza la construcción porque permite mayores luces con menores costes en pilares y cimientos.

3. ENSAYOS ESTRUCTURALES

3.1. Descripción del modelo experimental

Se han ensayado varias de estas láminas en el Laboratorio de la Escuela Politécnica Superior de Girona y en el Laboratorio de Tecnología Estructural de la Universidad Politécnica de Cataluña en Barcelona.

La campaña de ensayos se ha establecido sobre láminas en arco catenario de 4 m de cuerda, 1 m de flecha y 7,5 cm de espesor (4,5 cm de ladrillo + 3 cm de hormigón), articuladas y atirantadas en sus apoyos. Los ensayos han sido a rotura y se ha aplicado una carga puntual a

velocidad constante mediante pistón a $\frac{1}{4}$ de la luz de la lámina (*Fig.7*). La instrumentación por lámina ha contado tanto con transductores de desplazamientos verticales y horizontales en varios puntos como con galgas extensométricas en el armado longitudinal.

Las láminas se han construido con parámetros variables para conocer la repercusión estructural de diferentes cuantías de armado ($5\phi 8$ y $5\phi 6$) y diferentes resistencias de mortero (*Fig.8*).



Fig.7- Láminas bajo pórtico de carga

3.2. Resultados experimentales

En la *Fig.8* se muestran las gráficas extraídas por la instrumentación y una tabla con los parámetros de cuantía de acero y de resistencia de morteros de cada lámina ensayada.

	BARRAS DE ACERO		RESISTENCIA PROMEDIO A COMPRESIÓN DE MORTERO		CARGA ÚLTIMA
	ARMADURAS	CUANTÍA (A_s/bh)	Capa superior	Juntas	
Lámina 2 ^a	5ø8, B 500 S	0,0031	21,0 MPa	13,0 MPa	21,0 kN
Lámina 3 ^a	5ø8, B 500 S	0,0031	56,3 MPa	56,3 MPa	26,0 kN
Lámina 4 ^a	5ø6, B 400 S	0,0017	53,5 MPa	53,5 MPa	15,2 kN
Lámina 5 ^a	5ø6, B 400 S	0,0017	38,6 MPa	28,3 MPa	14,2 kN

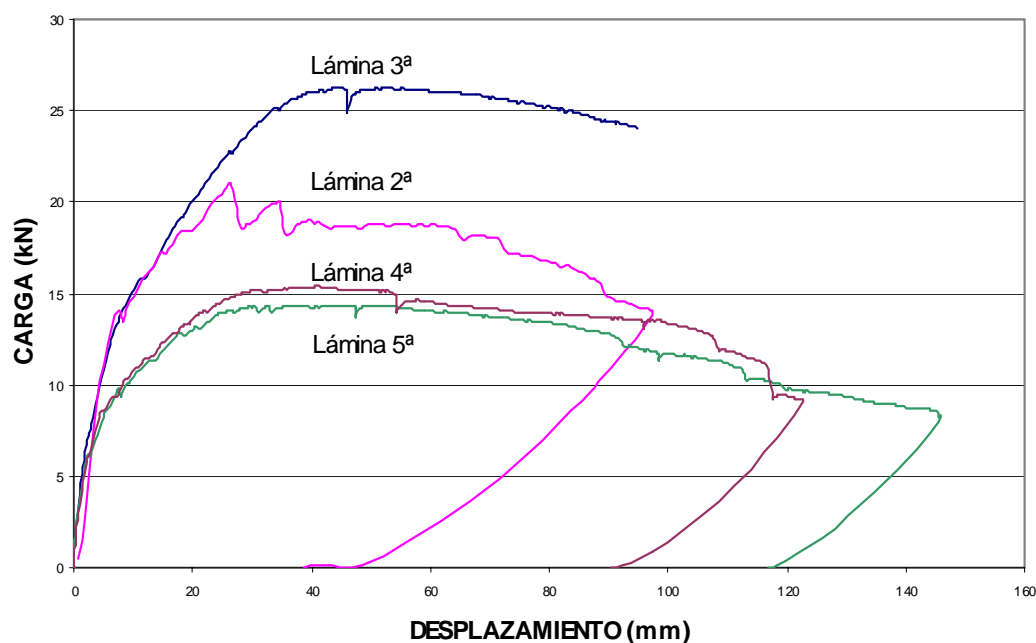


Fig.8- Gráficas de las láminas ensayadas

De los datos recogidos podemos resumir las siguientes conclusiones:

- Se llega a resistir hasta 26 kN y la menor de las cargas últimas, 14,2 kN, es improbable en una cubierta curva no transitable de este tipo. Para estos valores de carga puntual aplicados en el punto más desfavorable todas las láminas se encuentran claramente en zona de servicio y sobradamente capacitadas para soportar cargas 4 veces mayores con flechas que no exceden de los 2 cm.
- La repercusión del acero influye con mayor claridad que el mortero, especialmente mientras la lámina se fisura, puesto que al aumentar la cuantía de armado se atenúa la pérdida de rigidez debida a esta fisuración y se incrementa la capacidad última en una proporción similar a la del aumento de la cuantía.

- En la formación de la 2ª rótula se llega a la plastificación de la armadura en la sección de aplicación de la carga, para una deformación cercana a los 2,5 mm/m.
- Al producirse la 2ª rótula no se provoca el colapso, no se desprende ni un solo ladrillo y la lámina mantiene una considerable capacidad residual después de la rotura, por lo que podemos descartar la posibilidad de una rotura frágil, tan peligrosa en los elementos estructurales. Sorprende incluso su capacidad para recuperar una posición de hasta 5 cm al descargar el pistón de carga.

Por tanto, podemos deducir que estas láminas poseen un buen comportamiento estructural ante cargas concentradas y una notable ductilidad.

4. OBRAS REALIZADAS Y EN PROCESO

4.1. Construcciones efímeras



Fig.9- Stand Hispalyt (Construmat 2001 y 2003)

Uno de los primeros ejemplos contruidos con este sistema fue el stand de la asociación Hispalyt para las ferias Construmat de 2001 y 2003. En este pabellón de 5 x 11 m se consigue que el techo, las paredes y el suelo se comben desde un único trazo, con único material y un único formato, asociándolo a una gran vasija de arcilla cocida. Esta envolvente continua muestra las posibilidades formales del Flex-Brick en la arquitectura: espesores constructivos mínimos, intradós cerámico cálido, bóvedas de directriz asimétrica, bucles... en definitiva: una sección libre (*Fig.9*).



Fig.10- Stand Hispalyt (Construmat 2007)

Para la edición del Construmat 2007 el stand de Hispalyt contó con un recinto mayor de 10 x 13 m y no se hormigonaron las láminas para facilitar su colocación y desmontaje, pero especialmente, para presentar un buen número de aplicaciones en seco, mostrando las láminas en el techo como bandas de un palio colgado de dos extremos (una catenaria a tracción) y en el suelo como bandas de alfombras que se adaptaban a una topografía especular del techo (*Fig.10*).

4.2. Construcciones permanentes

4.2.1. Proyectos

Ante el éxito de estas primeras exposiciones del sistema y los datos que se recogían de los ensayos estructurales y de los prototipos construidos se estudió el paso de los stands efímeros a proyectos permanentes de viviendas unifamiliares. Se han intentado en varias oportunidades.

Ya en el año 1998, antes de las pruebas con los stands feriales, se proyectó para la cubierta de una vivienda en L'Ametlla del Vallés (Barcelona) una lámina de doble curvatura que en un extremo empezaba con una curvatura cóncava y en el opuesto acababa convexa (*Fig.11*). Era una geometría demasiado audaz para lo que conocíamos entonces y el diseño no fue aceptado.



Fig.11- Vivienda en L'Ametlla del Vallés (1998)



Fig.12- Vivienda en Olivella (2002)

El segundo intento, proyectado en el año 2002 en Olivella (Barcelona), sí fue aceptado esta vez con curvatura simple y diferentes perfiles de directriz laminar (*Fig.12*). Sin embargo, cuando iba a ejecutarse en el 2004 varios problemas pararon la obra.

El tercer intento ya se está construyendo en estos momentos en Sant Martí de Tous (Barcelona). Es un diseño más sencillo, con un único perfil de directriz laminar que envuelve un doble espacio desde el suelo hasta una jácena metálica a 6 m de distancia y 4 m de altura (*Fig.13*).

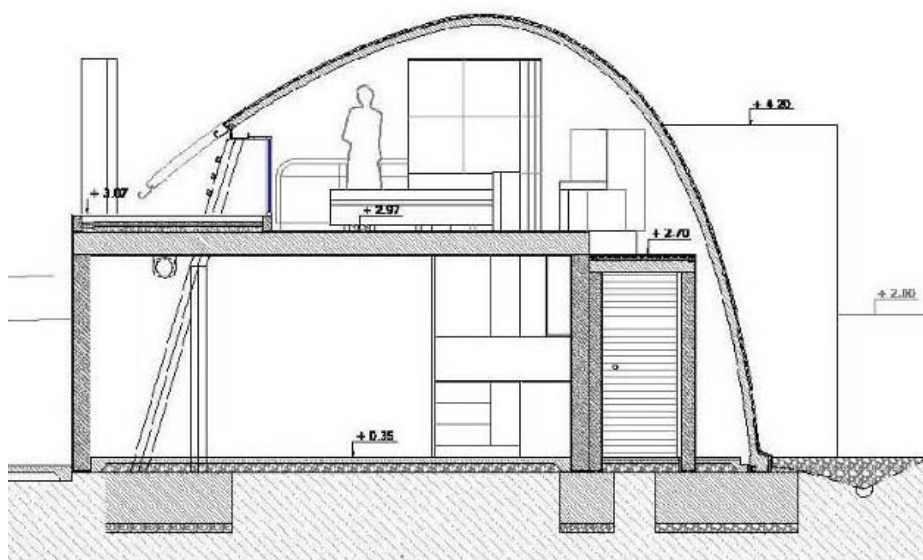


Fig.13- Vivienda en S. Martí de Tous

4.2.2. Proceso constructivo

Debido a que las láminas son mucho más ligeras que un forjado, el sistema de cimbrado es también más ligero, el requerido para andamiajes de operarios. Encima se desenrolla y extiende un encofrado compuesto por mallas metálicas, planchas de poliéster y láminas de caucho EPDM que son recuperables para otras puestas (*Fig.14 y 15*).



Fig.14- Cimbra y encofrado



Fig.15- Extendido de la bobina

Las láminas de Flex-brick también se desenrollan desde una bobina que se maneja encima del encofrado con grúa (*Fig.15*). La precisión geométrica del tejido permite un fácil ensamble transversal de las láminas y la continuidad de sus juntas (*Fig.16 y 17*).



Fig.16- Ensamble transversal



Fig.17- Láminas ensambladas

El hormigonado se realiza mediante un proyectado por vía húmeda, que permite controlar mejor la consistencia de la mezcla y su homogeneidad en toda la proyección. La capa superior se regulariza aplicando una plancha vibradora diseñada para el sistema.

En el momento de escribir este artículo se espera al desencofrado de la cubierta.