

REFUERZO DE LA CHIMENEA INDUSTRIAL DE FÁBRICA DE LADRILLO CERÁMICA LA PAZ (AGOST, ALICANTE)

Equipo de la Universidad de Alicante, Departamento de Ingeniería Civil formado por:

SALVADOR IVORRA CHORRO

Dr. Ingeniero Industrial,
Catedrático de la Universidad de Alicante.

DAVID BRU ORTS

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.

RICARDO REYNAU SÁNCHEZ

Arquitecto Técnico.

**F. JAVIER BAEZA
DE LOS SANTOS**

Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.

Equipo redactor de diferentes artículos, partícipes en proyectos de investigación tanto europeos como nacionales y receptores de varios premios.

El objeto de esta intervención es el de reparar y reforzar la chimenea frente a cargas sísmicas, dotándola de una capacidad resistente mediante el uso de materiales compuestos y reforzarla frente a las actuales

lesiones que presenta, dejándola en servicio para catalogarla como Bien de Relevancia Local y, de esta manera, preservar esta construcción dentro del patrimonio industrial.



Figura 1.



Figura 2.

OBJETIVO

Durante el siglo XX, en Agost (población de la provincia de Alicante), su principal industria fue la fabricación de todo tipo material cerámico, con 22 fábricas en pleno rendimiento.

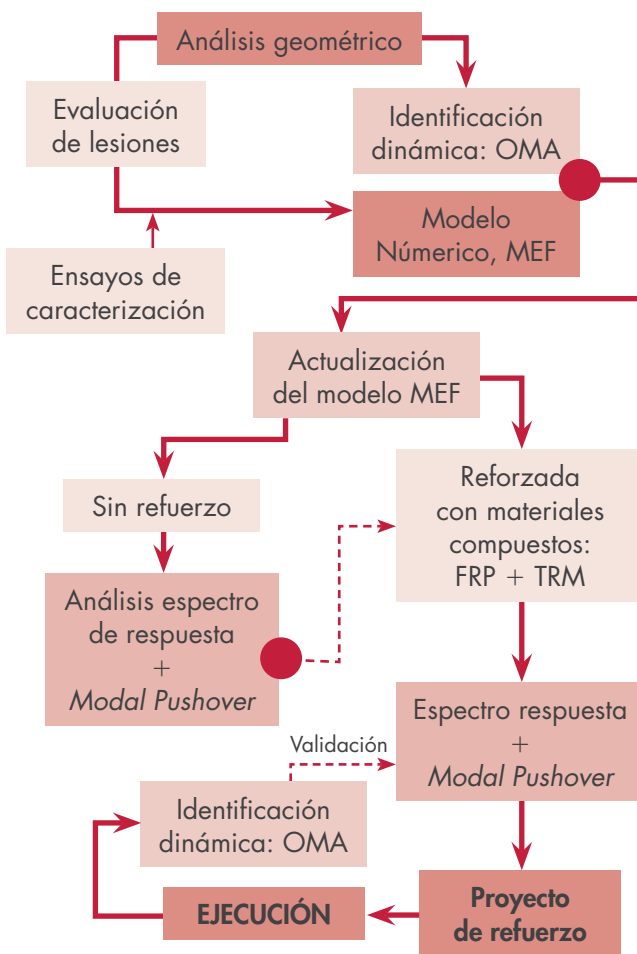
Actualmente, tan solo quedan dos chimeneas industriales representativas de aquella época industrial, habiendo sido reemplazadas en las actuales fábricas por sistemas de extracción forzada.

El actual propietario es Hijos de Francisco Morant S. L. (Cerámica «La Esperanza»).

DATOS DEL PROYECTO

Año de construcción:	1957
Año de reparación:	2016
Visado n.º:	02 oct. 2015/00692 COIICV
Presupuesto de ejecución material:	32.916,90 €
Fecha final de obra:	29 junio 2016
Proyectista:	Salvador Ivorra Chorro
Constructora:	Urbana de Exteriores
Financiación:	BIA2012-34316 ACOMP/2014/289

Proceso de intervención



Esquema 1.

CARACTERIZACIÓN

Caracterización previa

- Análisis geométrico
- Inspección de lesiones
- Caracterización de materiales
- Identificación dinámica



Modelo numérico (situación inicial)

- Definición del modelo
- Calibración con datos experimentales: *model updating*
- Análisis de vulnerabilidad sísmica: *response spectrum + modal push over*



Diseño del refuerzo con materiales compuestos

- Refuerzo: ley de comportamiento
- Modificación del modelo numérico
- Reevaluación del análisis sísmico
- Detalles constructivos



Ejecución del refuerzo sísmico

- Andamiaje
- Saneamiento y reparación de grietas
- Ejecución de anillos exteriores
- Refuerzo interior
- Cimentación



Figura 3.



Figura 4.

Inspección visual

El objetivo de esta fase incluye la caracterización geométrica de la chimenea, especialmente para evaluar el desplome visible a simple vista en coronación. Para este fin se combinó una inspección utilizando grúas (fig. 4), completada con el uso de drones (fig. 3) y, por último, con un escaneo tridimensional mediante Lidar.

Caracterización de materiales

Para la caracterización de los materiales y del terreno en el que está cimentada la estructura, se realizan diferentes tipos de ensayos:

- **Estudio geotécnico**, detectándose capas alternas de limos (arenosos o arcillosos) y material granular.
- **Toma de muestras de morteros** a lo largo de la altura de la chimenea (A1-A5). Evaluación química y mecánica de sus características. Difracción de rayos X (DRX) y microscopía electrónica de barrido (SEM) (fig. 5).
- **Ensayos de rotura** en ladrillos originales para evaluar sus características mecánicas.

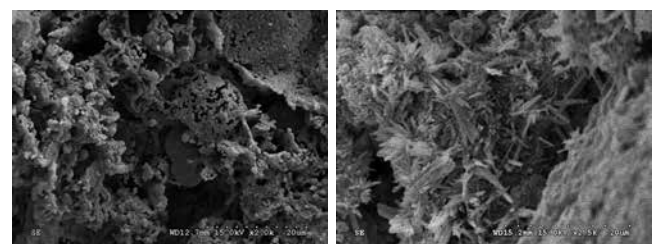


Figura 5. Imágenes obtenidas por SEM en muestras de mortero.

Corona

El principal problema que afecta a la coronación de la chimenea es un desplome, habitual en este tipo de construcciones.

Según las medidas realizadas con diferentes técnicas, el valor de este desplazamiento es de 0,287 m hacia el sur y 0,138 m hacia el oeste, como puede apreciarse en la figura 6.



Figura 6.

Fuste

Grieta principal ubicada en la cara NO del fuste, extendiéndose a las caras contiguas (N y E); su longitud total es 10,4 m. Afecta a la fábrica indistintamente por el ladrillo o por la junta, llegando a ser pasante en gran parte de su longitud. El inicio de la zona de mayor apertura coincide con el cambio de espesor de muro (fig. 7).

A partir del inicio de la grieta (11 m aproximadamente) se aprecia un cambio en la coloración de la fábrica.



Figura 7.

Los pates metálicos que conforman la escalera interior presentan graves daños por corrosión.

Además, la pérdida de mortero en las juntas hace que queden al aire los extremos que estaban embebidos en la fábrica.

Por último, varias zonas presentan pérdida de material, tanto ladrillo como mortero.

Base

Existen grafitis que afectan a la estética de la construcción (fig. 8).



Figura 8.

ANÁLISIS DINÁMICO

Caracterización previa

- Análisis geométrico
- Inspección de lesiones
- Caracterización de materiales
- Identificación dinámica



Modelo numérico (situación inicial)

- Definición del modelo
- Calibración con datos experimentales: *model updating*
- Análisis de vulnerabilidad sísmica: *response spectrum + modal push over*



Diseño del refuerzo con materiales compuestos

- Refuerzo: ley de comportamiento
- Modificación del modelo numérico
- Reevaluación del análisis sísmico
- Detalles constructivos



Ejecución del refuerzo sísmico

- Andamiaje
- Saneamiento y reparación de grietas
- Ejecución de anillos exteriores
- Refuerzo interior
- Cimentación

Identificación dinámica

Para obtener las características dinámicas de la estructura (periodos y modos de vibración y amortiguamien-



Figura 9.

tos) se emplean dos técnicas diferentes a la hora de medir las aceleraciones en vibración libre. En la figura 9a se muestra el proceso de instalación de un radar interferométrico IBIS-FS. Mientras que la figura 9b muestra los equipos de medida necesarios para el registro de vibraciones.

En total, se registran 14 grados de libertad distribuidos en cuatro secciones a lo largo de la chimenea. Posteriormente, se realizó un Análisis Modal Operacional, mediante el software Artemis. A partir de los registros de aceleraciones se identifican los principales modos de vibración y sus respectivas frecuencias y amortiguamientos modales.

Análisis Modal Operacional

Las frecuencias de 1,55, 4,81 y 9,98 Hz se corresponden con los tres primeros modos de flexión, que se desarrollan sobre un eje a 45°. El último modo detectado presenta principalmente un comportamiento a torsión de la estructura. **Factor de amortiguamiento evaluado: 1%.**

Modelo de elementos finitos

Dado que la chimenea posee una serie de fisuras de importancia, estas se han incluido en el mallado de E. F. para el cálculo de la misma. Se analiza la estructura tanto con la grieta totalmente abierta como en situación de grieta reparada, sin refuerzo, mediante elementos tipo «área».

El proceso de calibración del modelo numérico se lleva a cabo considerando fijo el valor del peso específico de la fábrica de valor 1.464 kg/m^3 en vez de los 2.018 kg/m^3 que se obtienen experimentalmente, con el objeto de conservar el mismo peso final de la estructura en función del espesor real. El parámetro de calibración es la rigidez del modelo a través del módulo elástico.

f_{xk_1}	resistencia a flexión en el plano paralelo a los tendeles	0,10 MPa
f_{xk_2}	resistencia a flexión en el plano perpendicular a los tendeles	0,20 MPa
f_k	resistencia característica a compresión	11,16 MPa
f_{vk_0}	resistencia inicial a cortante	0,20 MPa
E	módulo de elasticidad longitudinal	11.163 MPa
G	módulo de elasticidad transversal	4.465 MPa
ν	coeficiente de Poisson	0,25

Tabla 1. Tabla de características resistentes de la fábrica de ladrillo existente.

Modo	1.º	2.º	3.º	4.º
Frecuencia real (Hz)	1,55	4,81	6,83	9,98
Frecuencia numérica (Hz)	1,464	5,10	7,47	10,11
Error (%)	5,5	6,1	9,5	1,3
Masa movilizada en X (%)	19,06	13,43	0,78	2,88
Masa movilizada en Y (%)	13,14	6,14	0,078	12,95

Tabla 2. Tabla de resultados de la calibración dinámica del modelo numérico.

Modelo Updating

En este caso, se considera el ajuste entre las frecuencias reales de 1,55 Hz y 9,98 Hz. De esta forma, el módulo

elástico medio de la mampostería y el módulo de elasticidad transversal, se asumen igual a 3.654 N/mm^2 y 1.462 N/mm^2 , teniendo un error promedio respecto de la medida real obtenida durante el proceso experimental del 5,6% en relación a las frecuencias de vibración obtenidas en el modelo numérico respecto al real.

Estos resultados muestran valores ligeramente inferiores a los que se obtienen mediante el Eurocódigo 8, parte 3, donde se indica que la rigidez fisurada de la mampostería se aproxima a la mitad de la rigidez bruta, es decir 5.581 N/mm^2 . Las diferencias se deben al deterioro del mortero en las juntas.

Las formas modales obtenidas tras la calibración son similares a las obtenidas a través del Análisis Modal Operacional.

MEF REFUERZO

Caracterización previa

- Análisis geométrico
- Inspección de lesiones
- Caracterización de materiales
- Identificación dinámica



Modelo numérico (situación inicial)

- Definición del modelo
- Calibración con datos experimentales: *model updating*
- Análisis de vulnerabilidad sísmica: *response spectrum + modal push over*



Diseño del refuerzo con materiales compuestos

- Refuerzo: ley de comportamiento
- Modificación del modelo numérico
- Reevaluación del análisis sísmico
- Detalles constructivos



Ejecución del refuerzo sísmico

- Andamiaje
- Saneamiento y reparación de grietas
- Ejecución de anillos exteriores
- Refuerzo interior
- Cimentación

Modelo de elementos finitos

En el estudio de lesiones (fig. 10) se observa que el origen de la fisura puede justificarse por las tensiones inducidas por la oxidación de los pates embebidos en la fábrica. Aunque la apertura medida en la chimenea requiere de cargas adicionales (viento...).

Se realizan análisis numéricos lineales y no lineales, en los que las curvas de constitutivas asumen un comportamiento elasto-plástico en compresión en la fábrica, y una rotura frágil en tracción para los refuerzos (limitando la deformación última al 1% de acuerdo al EC-8).

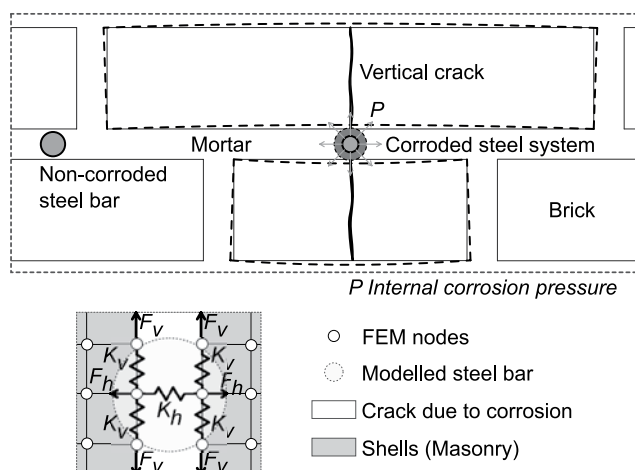


Figura 10.

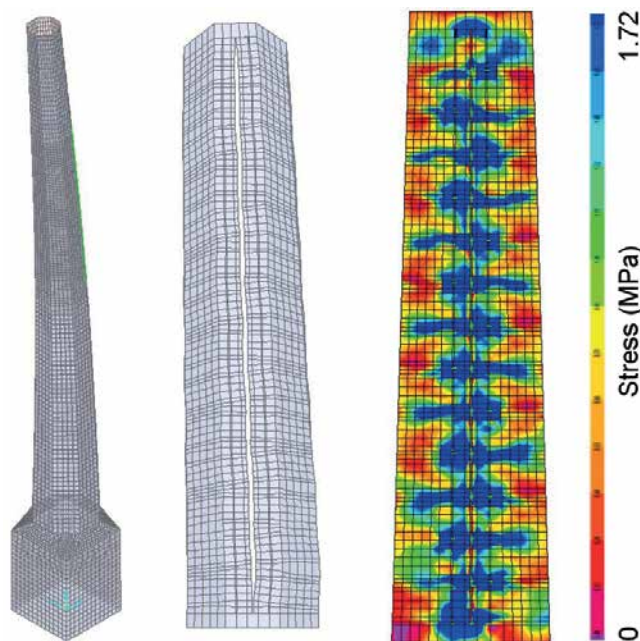


Figura 11.

La demanda sísmica se evalúa mediante el correspondiente espectro de respuesta elástico (fig. 11).

Según la NCSE-02, la aceleración básica para el municipio de Agost es de 0,11 g, que teniendo en cuenta el terreno observado en los sondeos, genera una aceleración de cálculo igual a 0,15 g.

Se tienen en cuenta dos tipos de cálculo diferentes, uno mediante espectros de respuesta y otro mediante análisis *push-over* modal (no lineal en el primer modo).

Demanda vs capacidad EC8

Se define una sección laminada (*Layered Shell*) para evaluar el estado tensional de la chimenea reforzada, en la que las propiedades de los materiales compuestos se homogeneizan en función del espesor de la capa de refuerzo.

Hay cambios en la distribución tensional y el aumento de capacidad mecánica, lo que supone la adición del refuerzo de FRP.

La introducción del refuerzo en el modelo tiene poca influencia en las formas modales, sin embargo sí modifica los periodos propios, cambiando ligeramente la demanda sísmica.

A través del análisis mediante espectros de respuesta, se observa que el modelo reforzado mejora la capacidad resistente de la chimenea frente a los esfuerzos cortantes y flectores introducidos por la acción sísmica, evitando el colapso de la misma.

En el caso de la estructura sin refuerzo, se observa un estado global de colapso frente a la flexión, y parcial frente a esfuerzos cortantes en el tercio superior de la chimenea.

La comprobación seccional de la resistencia de la estructura se realizó de acuerdo a lo indicado en el EC-8.

En la gráfica momento curvatura de una misma sección de la chimenea previo y post refuerzo, se observa claramente el aumento de resistencia, ductilidad y capacidad de rotación de la sección, debido al proceso de intervención.

DISEÑO DE REFUERZO

Caracterización previa

- Análisis geométrico
- Inspección de lesiones
- Caracterización de materiales
- Identificación dinámica



Modelo numérico (situación inicial)

- Definición del modelo
- Calibración con datos experimentales: *model updating*
- Análisis de vulnerabilidad sísmica: *response spectrum + modal push over*



Diseño del refuerzo con materiales compuestos

- Refuerzo: ley de comportamiento
- Modificación del modelo numérico
- Reevaluación del análisis sísmico
- Detalles constructivos



Ejecución del refuerzo sísmico

- Andamiaje
- Saneamiento y reparación de grietas
- Ejecución de anillos exteriores
- Refuerzo interior
- Cimentación



Modal push over

El cálculo anterior se completa con un análisis en *Push-Over modal*, en el que se aplica una distribución de cargas en función de la forma de cada modo de la estructura (considerando las rigideces y masas de cada modo independientemente). La respuesta no lineal de la estructura se considera concentrada en el comportamiento de la primera forma modal.

Solución adoptada

Ejecución del refuerzo de TRM: (1) se procede a la limpieza y sellado de las fisuras longitudinales existentes;

(2) se sustituyen las piezas más dañadas de ladrillo; (3) se limpian y cepillan las superficies para mejorar la adherencia del mortero del TRM; (4) se ejecutan los elementos de TRM.

EJECUCIÓN

Caracterización previa

- Análisis geométrico
- Inspección de lesiones
- Caracterización de materiales
- Identificación dinámica



Modelo numérico (situación inicial)

- Definición del modelo
- Calibración con datos experimentales: *model updating*
- Análisis de vulnerabilidad sísmica: *response spectrum + modal push over*



Diseño del refuerzo con materiales compuestos

- Refuerzo: ley de comportamiento
- Modificación del modelo numérico
- Reevaluación del análisis sísmico
- Detalles constructivos



Ejecución del refuerzo sísmico

- Andamiaje
- Saneamiento y reparación de grietas
- Ejecución de anillos exteriores
- Refuerzo interior
- Cimentación



Figura 12. Sustitución de piezas dañadas.



Figura 13. Rejuntado y sellado de grietas.



Figura 14. Limpieza y cepillado interior.

Tratamientos superficiales

Los trabajos previos a la ejecución del refuerzo con TRM y FRP incluyen las siguientes tareas:

- Limpieza interior mediante agua a presión y cepillado para garantizar la adherencia del refuerzo (fig. 14).
- Sustitución de ladrillos, rejuntado e inyección de grietas (figs. 12 y 13).

- Cepillado de toda la superficie exterior para eliminar restos de agresivos químicos.
- Hidrofugado de la superficie exterior.

Refuerzo interior

Tras la limpieza de la superficie interior, se aplica una primera capa de refuerzo con **HDM Restauro** a lo largo de toda la chimenea. Posteriormente, se aplica una capa de malla de fibra de vidrio **Mapegrid G-220** (fig. 17), y finalmente, se aplica una segunda capa de **HDM Restauro**.

A continuación, se instala el refuerzo longitudinal, formado por ocho laminados de fibra de carbono, tipo **Carboplate E170** de 100 mm de ancho (fig. 18), adheridas al soporte mediante adhesivo epoxídico, tipo **Adesilex PG1**. El replanteo de los FRP se realizó en el centro de cada una de las caras de la sección octogonal (fig. 16).



Figura 15. Trabajo en el interior.



Figura 16. Replanteo de bandas FRP.



Figura 17. Colocación de Mapegrid G220.



Figura 18. Refuerzos de Carboplate E170.

Anillos de confinamiento

Refuerzo mediante anillos con tejido a base de fibras de vidrio de alta resistencia, malla de 25 × 25 mm de



Figura 19. Primera capa de HDM Restauro.



Figura 20. Colocación de Mapegrid G-220.



Figura 21. Aspecto final: HDM + Mapegrid.

100 mm de ancho (**Mapegrid G-220**), adheridas con mortero bicomponente, fibrorreforzado, a base de cal (NHL) y Eco-Puzolana, de elevada ductilidad, de 3-4 mm de espesor (**HDM Restauro**) (figs. 19 a 21).

Recalce y refuerzo de cimentación

Se ejecuta un recalce de la cimentación con el fin de garantizar la estabilidad al vuelco de la estructura.



Figura 22. Anclaje FRP de cimentación.



Figura 23. Vista exterior del recalce.

Además, en el elemento de hormigón armado diseñado, se embeben unas placas de acero para ejecutar el anclaje de los elementos de refuerzo longitudinal de fibra de carbono con el recrecido de la cimentación (figs. 22 y 23).

PUBLICACIONES

- Bru D., Reynau R., Baeza F. J., Ivorra S. (2018). *Structural damage evaluation of industrial masonry chimneys*. Materials and Structures, 51:34, 16 pp.
- Bru D., Ivorra S., Baeza F. J. (2017). *Seismic behavior of a masonry chimney retrofitted with composite materials: A preliminary approach*. Int. J. of Safety and Security Engineering, 7(4): 486-497.
- Bru D., Ivorra S., Baeza F. J., Reynau R. (2016). *Refuerzo de una chimenea industrial de mampostería mediante tejido de fibra de vidrio con base cementicia frente a acciones sísmicas*. REHABEND, pp. 1815-1822.
- Bru D., Ivorra S., Baeza F. J., Reynau R., Foti D. (2015). *OMA dynamic identification of a masonry chimney with severe cracking condition*. 6th Int. Operational Modal Analysis Conf. IOMAC 2015.
- Ivorra S., Baeza F. J., Bru D., Varona F. B. (2014). *Seismic behavior of a masonry chimney with severe cracking condition: Preliminary study*. Key Engineering Materials, 628: 117-122.