

ESTUDIO DE ESTABILIDAD DEL CASTILLO DEL GRAN CAPITÁN. MONTILLA.

ANTECEDENTES

A petición de la empresa de Ingeniería y Control de Calidad VORSEVI S.A., realizamos el presente estudio, como parte del asesoramiento que esta empresa realiza para el Ayuntamiento de Montilla (Córdoba) durante las obras de rehabilitación que se están llevando a cabo en el edificio conocido como Castillo del Gran Capitán.

Con esta documentación se pretende tener una explicación científica de la estabilidad actual de la estructura muraria y abovedada de dicho edificio, así como estudiar su comportamiento ante un posible sismo a la luz de la normativa actual, teniendo un conocimiento objetivo de su posible seguridad en dicha situación.



DESCRIPCIÓN DE LA CONSTRUCCIÓN

Se nos han facilitado planos del conjunto edificado, donde se incluye una descripción geométrica suficiente para nuestro estudio, así como fotografías complementadas con las que hemos realizado en formato digital en nuestras visitas al edificio.

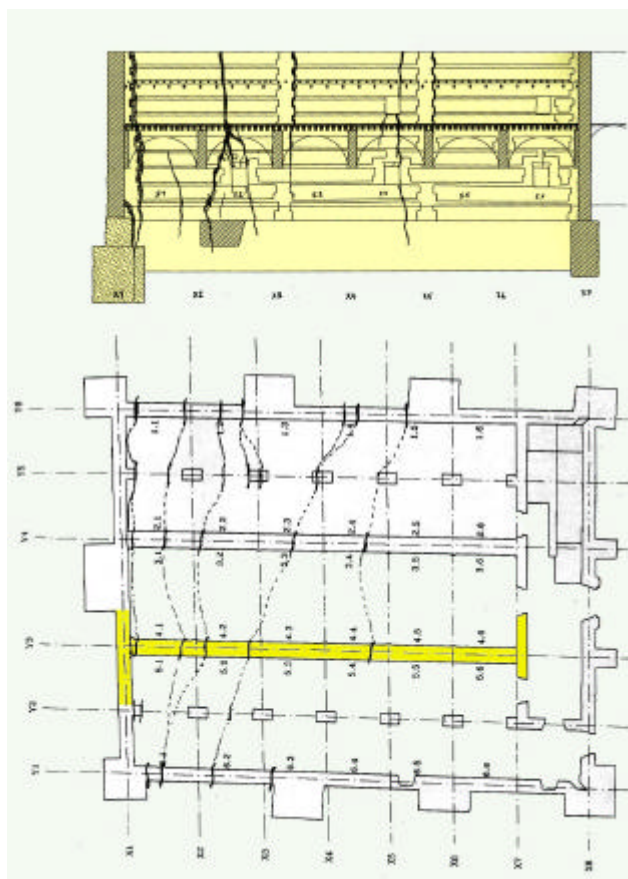


Es curioso hacer notar la coincidencia entre la flecha medida en el centro de la bóveda central (unos 15 cm en la fotografía de la izquierda) y las mediciones fotogramétricas que se extraen de la imagen de la derecha, restituída por nosotros, donde la geometría actual de la bóveda (en color rojo) se distancia del semicírculo original (en color verde) exactamente en 15,2 cm.

Respecto a los materiales que constituyen todo el conjunto, se considera que los datos de que disponemos también son suficientes para las consideraciones resistentes vertidas en nuestros análisis. En particular, el material que constituye la fábrica de los muros, es tapial con verdugadas de ladrillo (recibido con mortero de cal), presumiblemente revocado originalmente con yeso.

Respecto a los fuertes agrietamientos existentes, se nos han facilitado planos de los mismos con el detalle suficiente para la precisión de nuestro estudio.

El muro coloreado al margen es el que ha sido analizado de un modo más exhaustivo, dada su situación de menor masa "estabilizante" en su testero libre.



CONSIDERACIONES SOBRE EL MÉTODO DE ANÁLISIS

El análisis de la vulnerabilidad de un edificio histórico requiere una atenta "lectura estática" de la construcción que conduzca a individualizar ante todo sus características originales: materiales y técnicas constructivas, a descubrir, por tanto, sus puntos débiles y las zonas de posible concentración de solicitaciones debida a las acciones que sobre el edificio pueden incidir. Esto puede ser hecho analizando cada porción de la estructura independientemente, dado que no es absolutamente necesario que la estructura sea considerada un único bloque monolítico, sobre todo si se puede demostrar que cada una de las partes son seguras aisladamente¹.

Respecto a los métodos de cálculo, que se pueden utilizar en edificios históricos, hay que tener en cuenta que los algoritmos modernos, derivados de la preparación elasticista de la mecánica del siglo pasado, no interpretan correctamente la realidad estructural de la obra de fábrica y deben ser usados con extrema cautela.

En efecto, hasta finales del siglo XVII sólo se aplicaban reglas de proporciones geométricas, de modo que las proporciones entre las distintas partes de una construcción constituían un código formal que se aplicaba independientemente de las dimensiones.

A finales de la primera mitad del siglo XIX se comienza a utilizar extensivamente el método del polígono funicular (o de las resultantes sucesivas) para analizar arcos, convirtiéndose la estática gráfica en el único método de análisis de estructuras hasta principios del presente siglo.

Tras el auge de los métodos basados en los teoremas del trabajo y la energía y, contemporáneamente, la aparición del ordenador, los métodos numéricos son hoy los más potentes en el análisis estructural.

Pero se utilizan modelos elásticos para explicar el comportamiento de los materiales constructivos, con lo que el problema de análisis estructural acaba convirtiéndose en la resolución de un sistema de ecuaciones donde no se discrimina el signo positivo o negativo de la tensión o de la deformación, que entran por igual en el aparato matemático usado en el cálculo.

Las obras de fábrica, como la que nos ocupa, tienen resistencia a tracción nula o, a lo sumo, de un 5 a un 10% de la resistencia a compresión. Ante compresiones el material se llega a comportar plásticamente (aplastándose, deformándose e involucrando más material en la resistencia) y ante tracciones suele tener rotura frágil. Nada tiene esto que ver con un modelo elástico de tensiones y deformaciones. Además, en muchos casos, la estructura está tan lesionada que es imposible la consideración de un modelo que suponga continuidad en el material.

Basándonos en las más modernas teorías de la plasticidad, podemos recuperar los métodos basados sencillamente en el equilibrio. **Si encontramos líneas de presiones, dentro del espesor del elemento considerado, en equilibrio con las acciones aplicadas, la estructura es estable**². Desde el punto de vista de la seguridad, bastará relacionar las tensiones máximas a compresión obtenidas con las que puede resistir potencialmente el material.

Utilizando un programa de "Cálculo Vectorial Automático" que hemos desarrollado para analizar estructuras de fábrica en un sistema CAD, mediante métodos gráficos basados en el equilibrio, podemos obtener el valor, dirección y posición de las resultantes internas principales bajo cualquier sistema de cargas, incluido, claro está, el peso propio³.

El método gráfico para analizar sistemas de arcos-contrafuerte se basa en el trazado de la línea de presiones de los arcos y su posterior composición con el resto de los pesos propios

¹ Todas estas afirmaciones, que compartimos, están fundamentalmente extraídas de diversos textos del recientemente desaparecido profesor Antonino Giuffrè publicadas en "Monumenti e terremoti", *Multigrafica Editrice*, Roma 1988.

² Teorema de Jacques Heyman leído por nosotros en "The masonry arch", Ellis Horwood Ltd., Chichester 1982, aunque seguramente enunciado antes en "The safety of masonry arches", *International Journal of Mechanical Sciences* 11, 1969.

³ Sobre este tema véase F. Jurado, "Análisis Vectorial Automático en la Restauración de Monumentos", *1^{er}. Congreso Nacional de Tecnología en la Arquitectura*, E.T.S.A. Madrid 1994, libro 2 pp. 347 a 357; F. Jurado, "Análisis Vectorial Automático en la Restauración de Monumentos", *La ciudad y sus murallas*. Universidad de Granada 1996, n.2 pp. 355 a 374.

de muros y contrafuertes, obteniéndose las resultantes sucesivas y también las tensiones cobaricéntricas⁴.

Este programa, en combinación con cálculos convencionales auxiliares, es el principal método de análisis utilizado en este trabajo.

CÁLCULO SÍSMICO MEDIANTE EQUIVALENCIA ESTÁTICA

La normativa de aplicación (Norma de Construcción Sismorresistente NCSE-90) permite el análisis estático de una estructura sometida a una acción sísmica tomando un sistema de fuerzas equivalentes de valor:

$$F_{ij} = s_{ij} \cdot P_j$$

siendo:

s_{ij} : coeficiente sísmico, dependiente de la aceleración sísmica (0,06 de la gravedad para Montilla) y de otra serie de coeficientes (que hemos globalizado a favor de seguridad en el valor 1,4)

P_j : peso correspondiente a las masas involucradas en la acción

En nuestro caso nos quedaría, para cada sistema de masas, una fuerza horizontal equivalente de valor:

$$F_h = 0,084 \cdot P$$

lo que significa que, a cada fuerza debida a un peso propio existente considerado, tenemos que añadirle otra fuerza horizontal de valor 0,084 veces el peso o, lo que es lo mismo, considerar una "oblicuidad" o inclinación de la gravedad de valor $5^\circ = \arctan(0,084/1)$.

Por tanto, para comprobar la estabilidad ante la acción sísmica, nos basta "inclinarse" el sistema estructural esos 5° , hacia uno y otro lado, y calcular sus resultantes internas ante peso propio, con la misma herramienta gráfica que antes hemos preconizado⁵.

VERIFICACIÓN ESTÁTICA DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL EN SU ESTADO ACTUAL SOMETIDA A PESO PROPIO

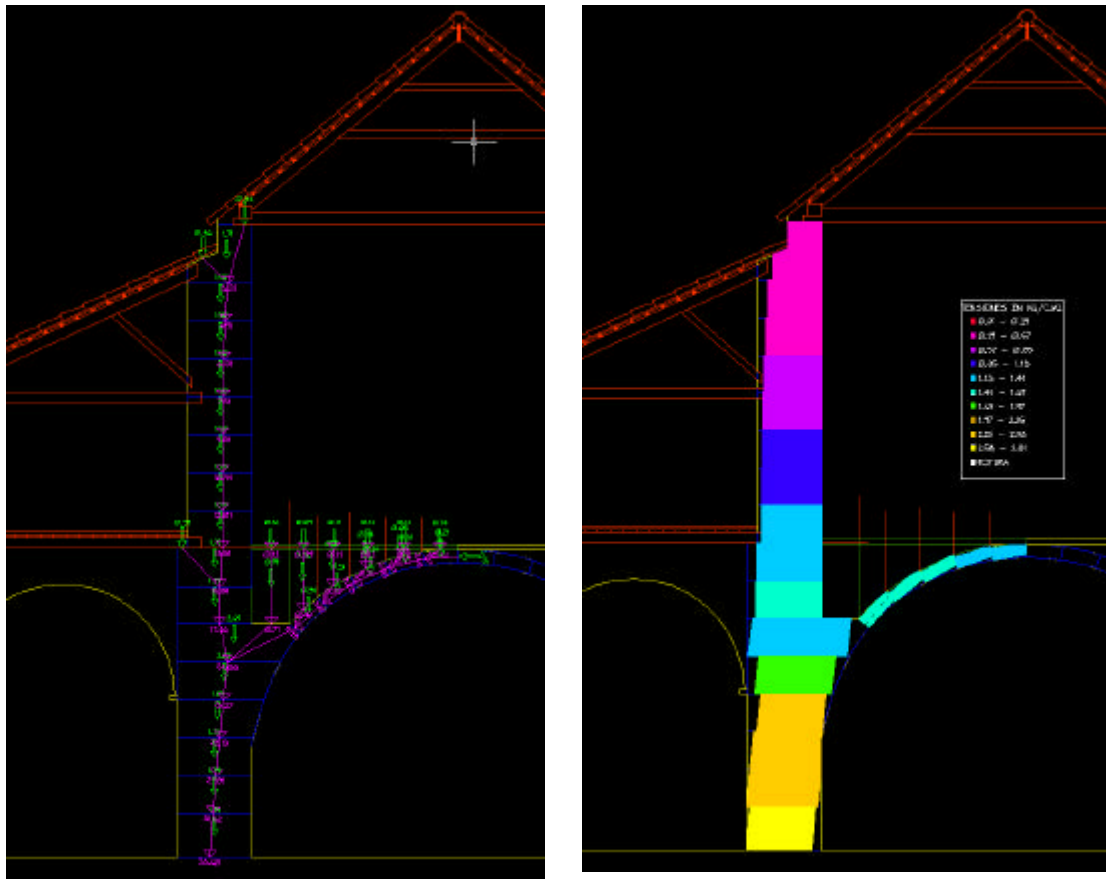
Utilizando la geometría que se nos ha proporcionado (en la que se ha corregido la de la bóveda central mediante fotogrametría), se ha dividido la estructura en trozos significativos, debido a su posición o diferente grueso, considerándose un peso específico medio de 1,80 to/m³. Los pesos de los senos de la bóveda han sido considerados en función de la densidad de tabiquillos realmente existentes. Dicho análisis se refleja en las figuras que a continuación se acompañan (los valores corresponden a una franja de 1 metro de grueso).

Como se puede apreciar, se obtienen tensiones medias muy bajas, tanto en la bóveda (valores por debajo de los 2,0 kp/cm²) como en el arranque del muro central más cargado (menos de 3,0 kp/cm²).

Como es obvio, la introducción de sobrecargas de uso no puede aumentar más de un 10 a un 15% los valores obtenidos, dado el alto valor de los pesos propios existentes.

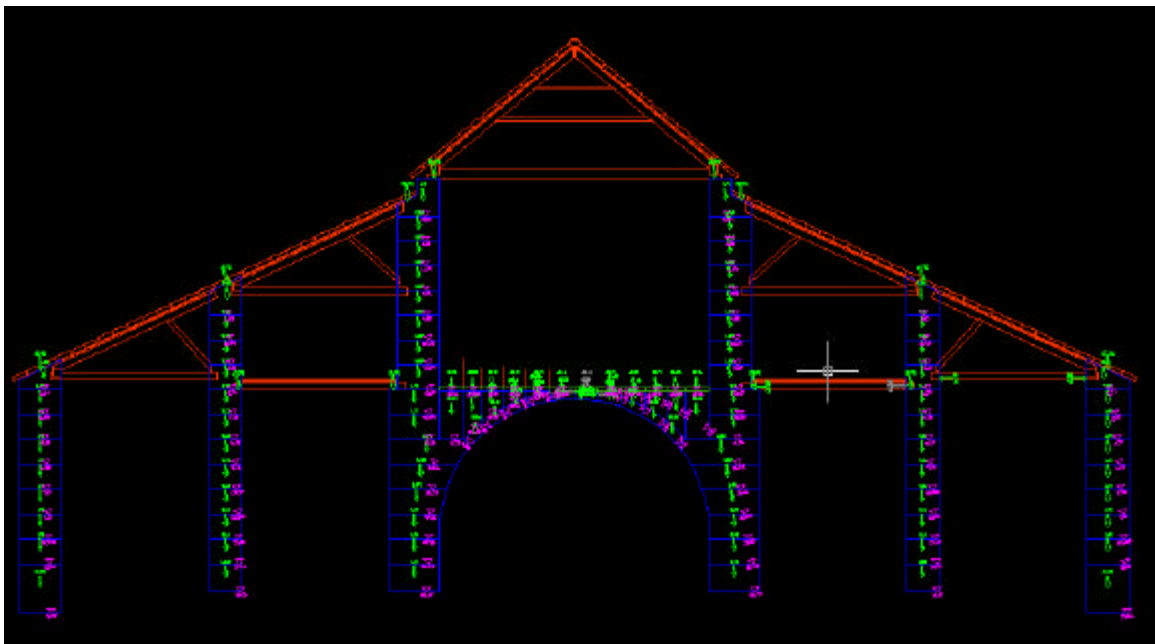
⁴ Aunque existe mucha bibliografía al respecto, nosotros estudiamos el método con el libro "Estática Gráfica", de Otto Henkel, Editorial Labor S.A., Barcelona 1953, sobre todo el contenido del capítulo VII.

⁵ Hay que tener en cuenta que, en construcciones históricas, prácticamente la totalidad de la acción vertical es el peso propio, puesto que las sobrecargas de uso apenas tienen valor en comparación con aquél, por lo que no tiene sentido considerar masas "biológicas" adicionales.



VERIFICACIÓN ESTÁTICA DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL ANTE UN MOVIMIENTO SÍSMICO

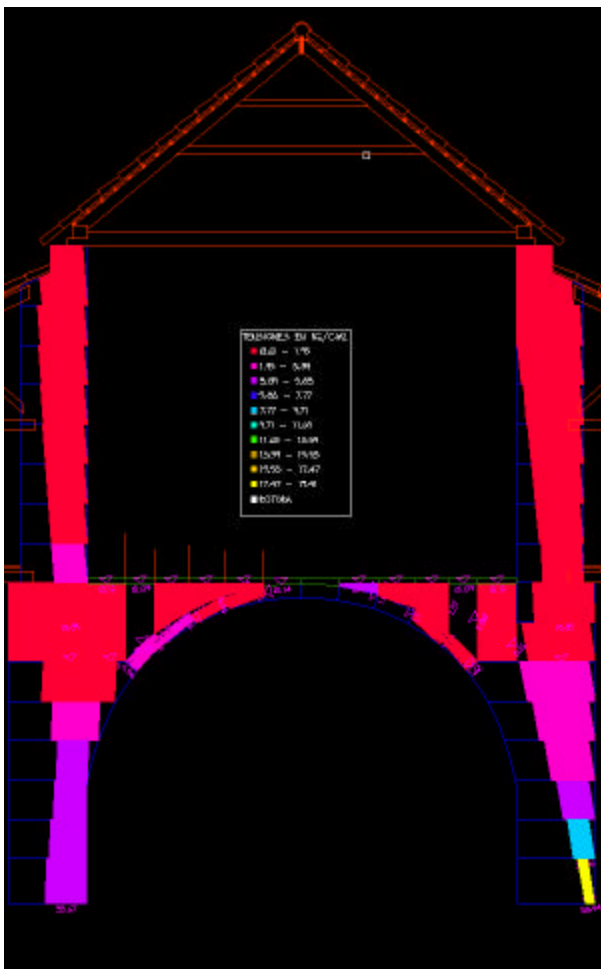
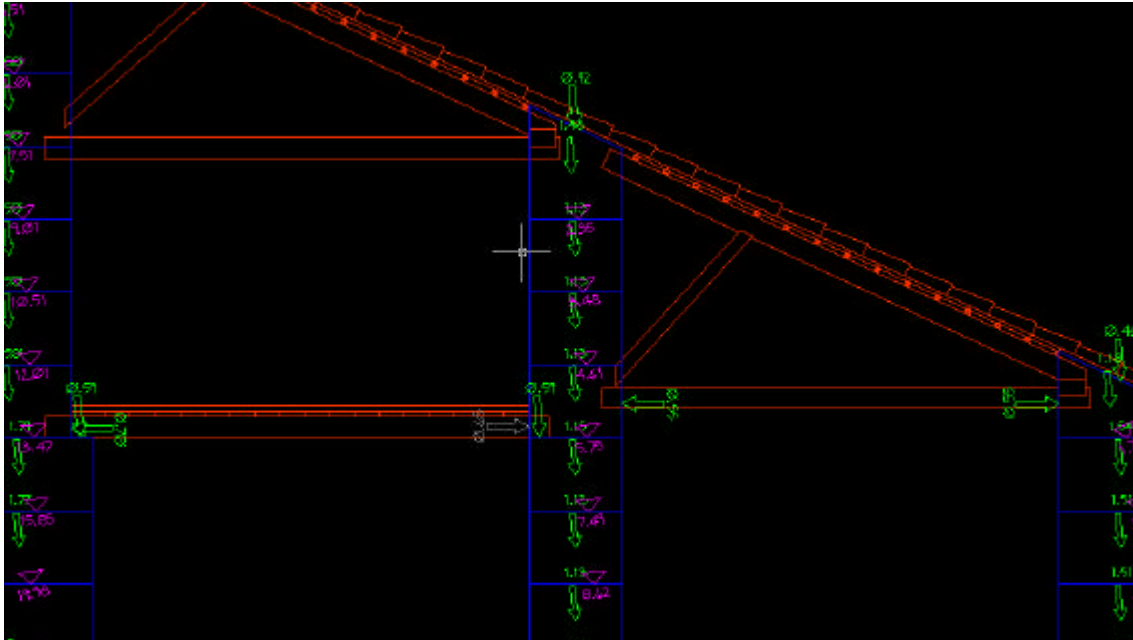
Teniendo en cuenta las consideraciones que hemos expuesto en apartados anteriores, hemos comprobado la totalidad de la sección horizontal ante una oblicuidad de 5° para la gravedad.



El resultado es válido para la vibración en ambas direcciones (oblicuidad hacia la derecha y hacia la izquierda), dada la antimetría de la sección. Sin embargo, mientras que en la

mitad izquierda no se ha considerado colaboración (a tracción) de los forjados y estructuras de madera, en la parte derecha es necesaria la consideración de transmisión de acciones horizontales (mediante compresiones) hacia los muros extremos para conseguir que el sistema sea estable.

La figura siguiente muestra un detalle de dichas transferencias o acodamientos necesarios.

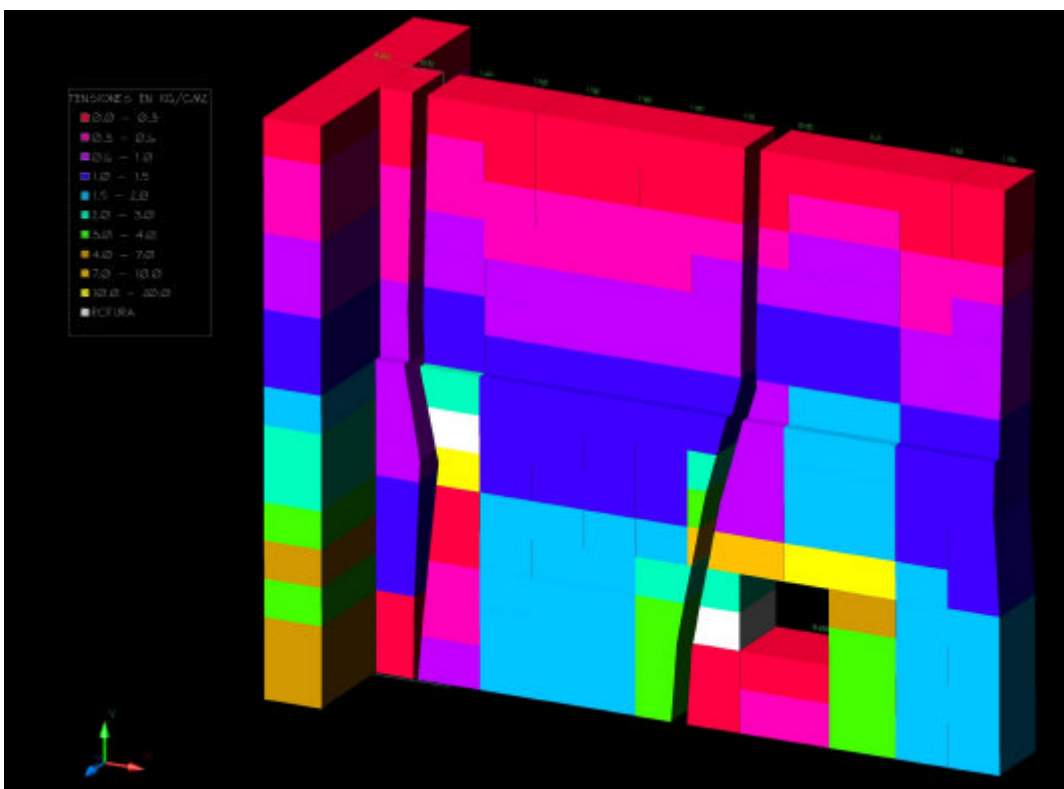
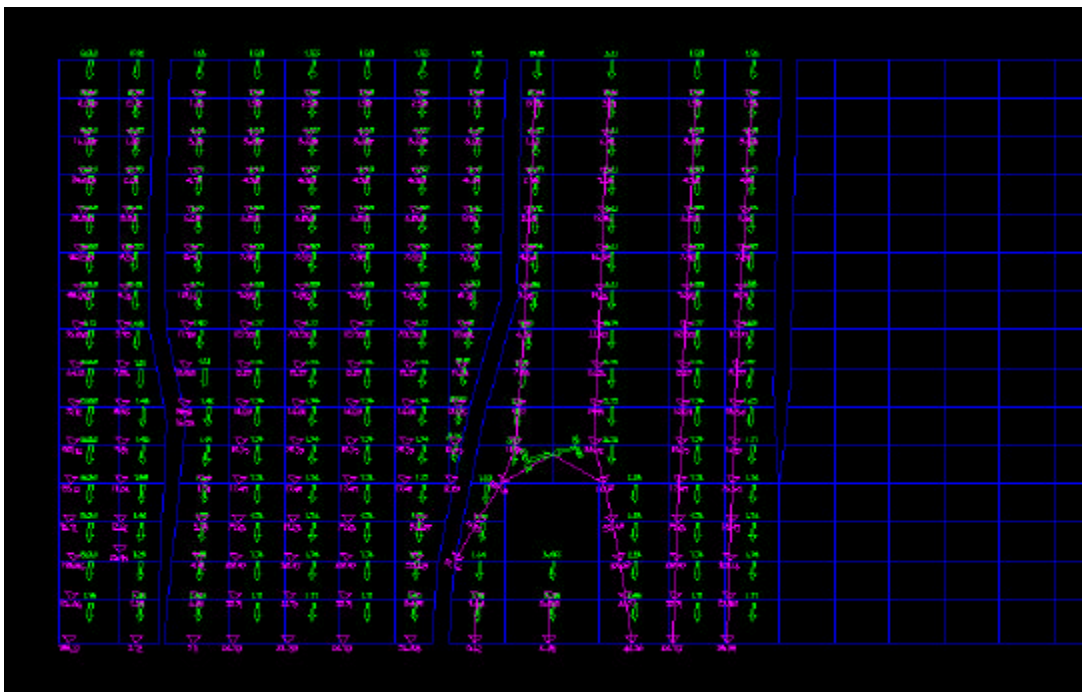


En la figura de la izquierda se representan las tensiones cobaricéntricas medias que se obtienen ante la acción sísmica, cuyo valor máximo está aún por debajo de los 20 kp/cm², en la situación límite de estabilidad que hemos conseguido encontrar.

Insistiendo en los conceptos que se derivan de los teoremas del trabajo y de la mínima energía, si nosotros hemos encontrado un sistema de fuerzas que es estable, la realidad lo será también, pero con mayor holgura (lo que también significa menores tensiones).

VERIFICACIÓN ESTÁTICA DEL MURO LONGITUDINAL AGRIETADO ANTE UNA ACCIÓN SÍSMICA

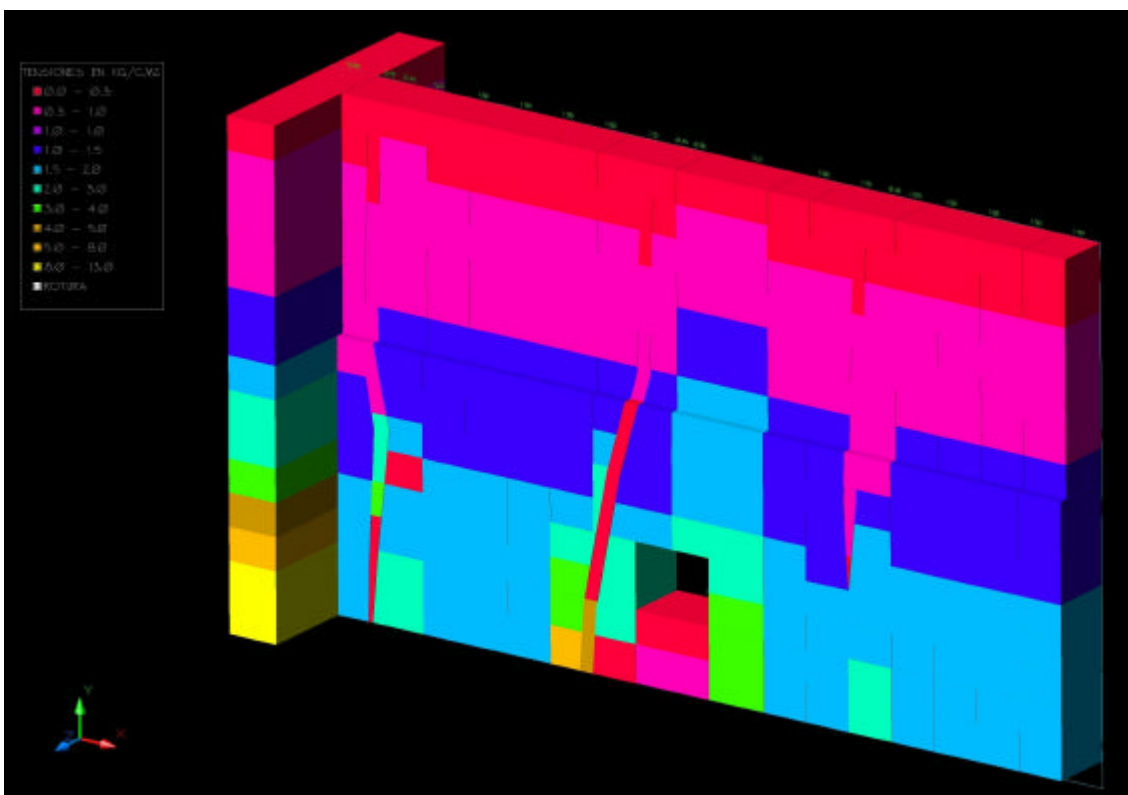
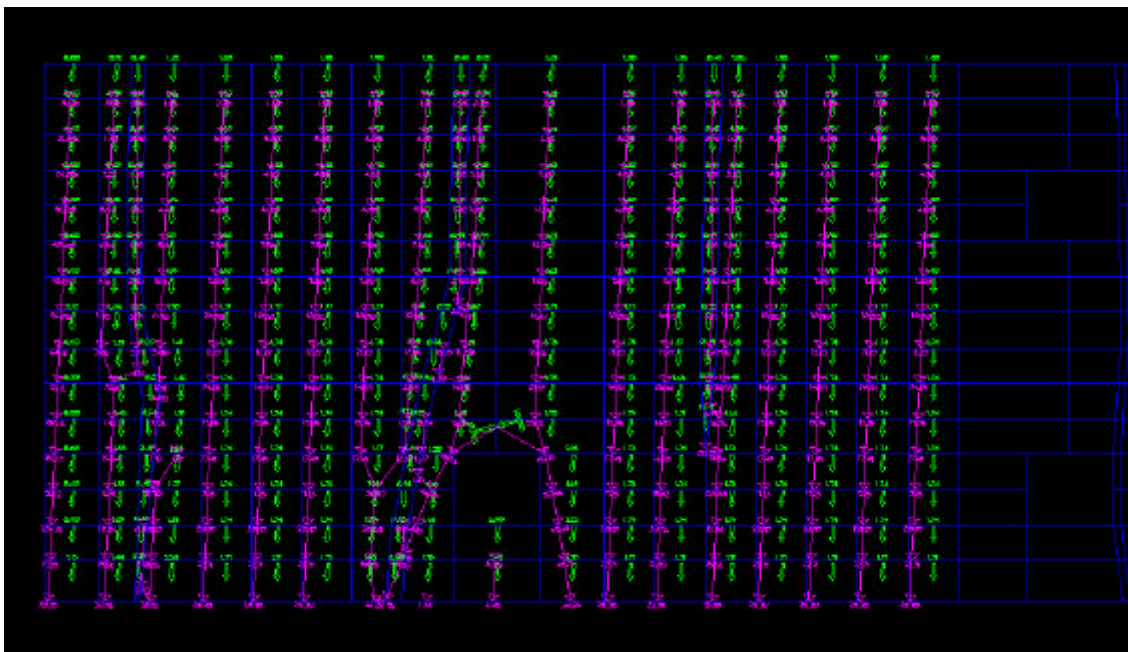
Considerando los fuertes agrietamientos que actualmente posee el muro que hemos señalado (el más desfavorable), lo analizamos sometiendo a la oblicuidad que supone vuelco del testero hacia el exterior.



A pesar de lógicas roturas locales (las zonas coloreadas en blanco) el testero se mantiene estable, con tensiones aceptables en esta situación de vibración sísmica longitudinal.

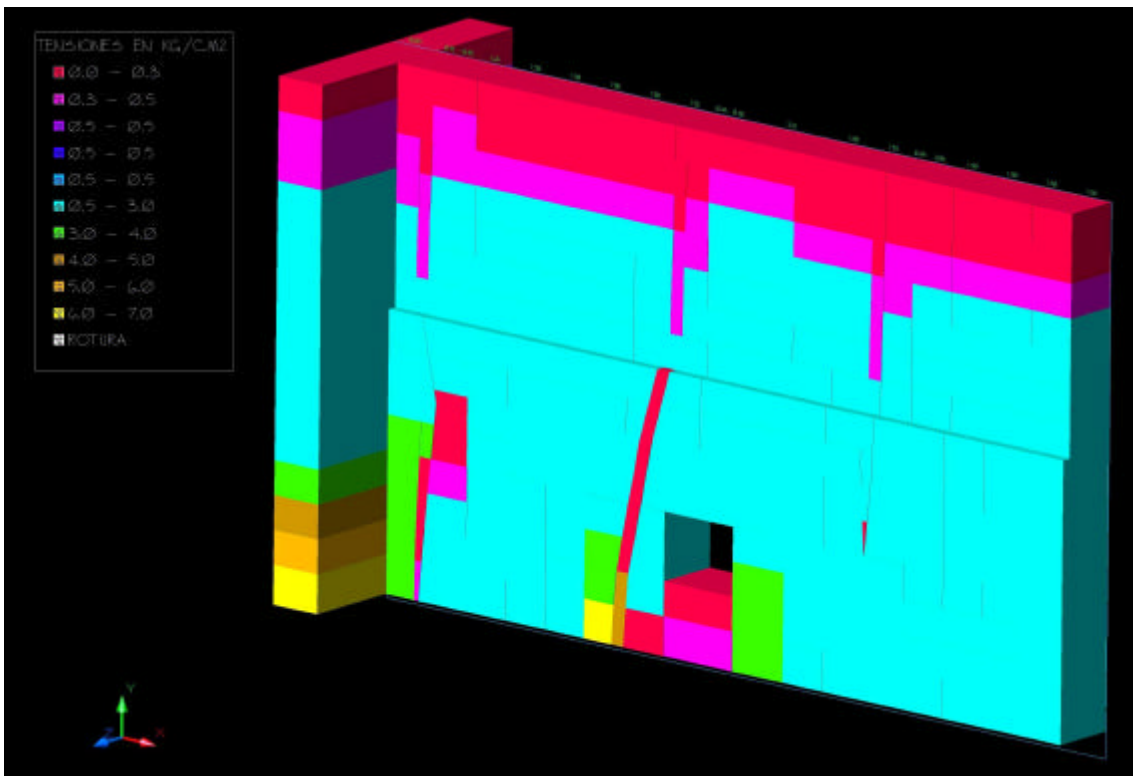
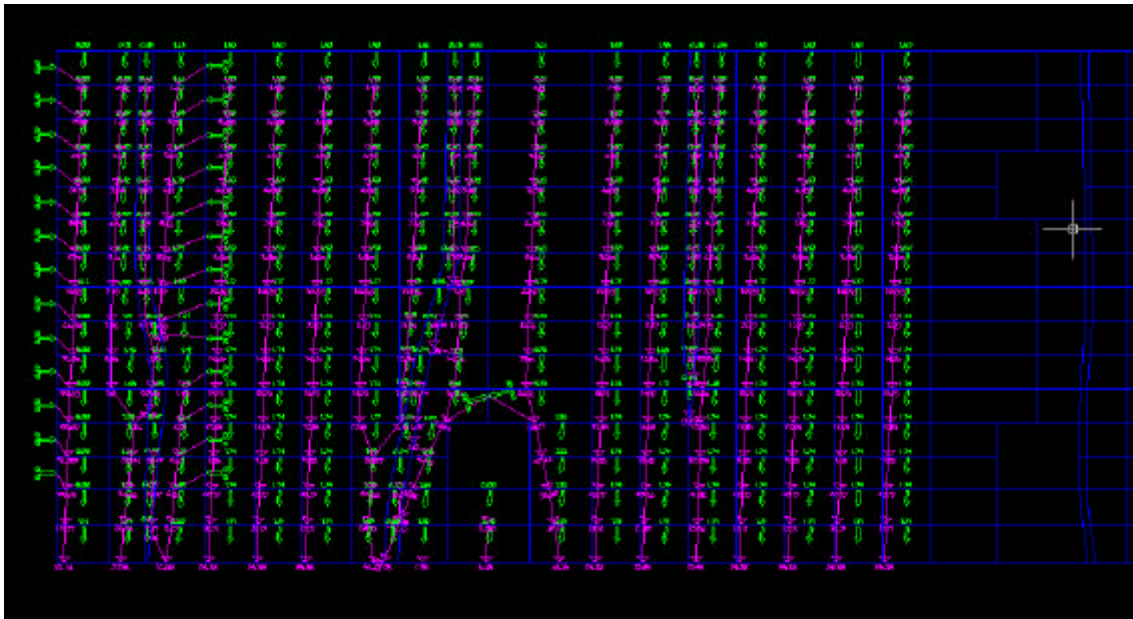
VERIFICACIÓN ESTÁTICA DEL MURO LONGITUDINAL YA REPARADO ANTE UNA ACCIÓN SÍSMICA

El primer tipo de reparación considerado es el de retacar sencillamente las grietas existentes, es decir, se introduce de nuevo la continuidad perdida ante la transmisión de compresiones.



Como se ve, la situación es totalmente estable y las tensiones máximas no superan los 13,0 kp/cm², valor totalmente admisible para las fábricas existentes.

Un grado mayor de reparación consiste en introducir cosidos estáticos que involucren o aten hasta 3 metros de fondo de muro longitudinal trabados con el testero (en el sistema de fuerzas se simulan introduciendo pares de compresiones de 0,10 a cada 70 cm de altura).



En esta situación, la estabilidad general se consigue con tensiones inferiores en todos los casos a 7,0 kp/cm².

Las oblicuidades que produzcan inclinaciones de la gravedad volcando el testero hacia el interior del edificio están obviamente cubiertas en cualquier caso.

EVALUACIÓN DE LA SEGURIDAD

Este es un tema complejo en los edificios históricos que, lógicamente, siempre es demandado por los usuarios de los edificios o por los organismos y personas responsables de su conservación. La propia definición de coeficiente o factor de seguridad, que hoy se aplica normativamente a las nuevas construcciones, es difícilmente aplicable a las construcciones históricas, donde, según el criterio comparativo podemos extraer conclusiones muy dispares.

La cuestión es aún más complicada cuando el concepto de seguridad queremos extenderlo a las posibles acciones sísmicas, algo que puede sufrir el edificio como mucho una o dos veces en su vida⁶, y que, según la propia normativa, se consideran acciones accidentales tratándose con coeficiente de seguridad de valor 1.

En el artículo 1.1, párrafo segundo, de la norma NCSE-90 se dice textualmente: *“La finalidad última de estos criterios es la de evitar la pérdida de vidas humanas y reducir el coste económico que futuros terremotos puedan ocasionar. A tal fin se pretende evitar el colapso de las construcciones ante los mayores sismos esperables –con una probabilidad razonable– limitándose consecuentemente los daños estructurales graves ante sismos de menor tamaño, que tengan una probabilidad apreciable de ocurrir durante la vida de la obra”.*

La cuestión más chocante en el caso de los edificios históricos es **que ya han sido comprobados con éxito ante acciones sísmicas**, por ello han sobrevivido hasta nuestros días⁷. Como en el caso del edificio que nos ocupa: sufrió un fuerte terremoto en julio de 1930, terremoto que lo fracturó ostensiblemente, pero que no produjo su colapso, ni tan si quiera suscitó la necesidad de una seria reparación a los usuarios de entonces, que se limitaron a tapar superficialmente las grietas y a seguir utilizándolo como si nada hubiese ocurrido.

¿Cuál debe ser nuestra actitud ante una situación de este tipo?: nuestra intervención debe ser la de **reponer su estructura a la situación que tenía antes del sismo**⁸, mejorando en todo caso su seguridad, pero siempre **sin alterar sus características constructivas, que le han permitido sobrevivir hasta nuestros días**.

En un edificio histórico no tiene sentido intentar una adecuación a la normativa actual⁹ hecha para edificios de nueva construcción, por lo que no hemos de arrogarnos responsabilidades que no nos atañen, con el consiguiente peligro de producir otro tipo de problemas, como puede ser los derivados de cuestiones higrotérmicas o del factor tiempo (envejecimiento no controlado de nuestra reparación), por ejemplo¹⁰.

⁶ “Las acciones **permanentes** intervienen en todas las hipótesis de carga, puede describirse por su valor medio y la seguridad ante ellas es la convencional. Las acciones **variables** deben describirse por un valor que estadísticamente cubra el 95% de las posibilidades y se pueden plantear coeficientes reducidos de seguridad según el número o la amplitud de acciones que se consideren simultáneas. Las acciones **accidentales**, aunque son posibles, tienen probabilidad casi nula, definiéndose por el valor correspondiente a un período de retorno dependiente de la importancia y la vida de la obra, pudiéndose calcular la estructura sin margen de seguridad, simplemente para que sobrevivan sin colapso, aunque quede dañada irreparablemente...” José Luis de Miguel Rodríguez, *Acciones*, Valladolid, 1989.

⁷ “La característica más relevante de los edificios griegos, romanos, bizantinos, románicos y góticos es que alguno de ellos todavía existe”. Jacques Heyman, “The Gothic Structure”, *Interdisciplinary Science Reviews* 2, 1977.

⁸ “Para prolongar la vida de un edificio con el mismo uso (y por tanto cargas) que tenía, basta reponer la geometría y materiales a sus características primigenias, es decir reparar las lesiones, degradaciones, pérdidas de unión o sección, etc, bastando hacerlo con el mismo material y composición original, si ello es factible. Aunque, de un edificio reparado así no se pueda determinar con exactitud el grado de seguridad que posee, (cosa que además no está definida) siempre se puede afirmar que lo posee en grado suficiente”. José Luis de Miguel Rodríguez, *Informe sobre Manzana El Águila*, Madrid, 1994.

⁹ L’ultima revisione della Norma Sismica Italiana definisce due categorie di intervento: l’**adeguamento** ed il **miglioramento**. L’intervento di “adeguamento” è quello che rende l’edificio atto a resistere alle azioni previste dal codice... intanto che l’intervento di “miglioramento” equivale all’esecuzione di una o più opere riguardanti i singoli elementi strutturali dell’edificio con lo scopo di conseguire un maggior grado di sicurezza senza peraltro modificarne in maniera sostanziale il comportamento globale. Antonino Giuffrè. “Monumenti e terremoti”, *Multigrafica Editrice*, Roma 1988.

¹⁰ En conversaciones previas a la redacción de este informe nos vino a la cabeza un ejemplo de gran paralelismo: intervenir en un edificio como éste es como reparar un vehículo que ha sufrido una colisión y aún sigue siendo utilizado. El mecánico se limitará a dejar el vehículo “como nuevo”, sin introducir blindajes ni refuerzos adicionales, que podrían alterar el delicado y experimentado equilibrio que el vehículo ya poseía... Además, otro posible accidente ¿va a ser del mismo modo que el último que tuvo?...

CONCLUSIONES Y RECOMEDACIONES

Con los análisis anteriores hemos podido comprobar que el edificio es actualmente estable (algo tan obvio como que está en pie) y seguro.

Ante una acción sísmica, de magnitud según se desprende de la normativa actual, aún seguiría siendo estable, aunque podrían producirse roturas locales adicionales si no se hiciese ninguna reparación.

Simplemente dando continuidad de nuevo a las fábricas, es decir, rellenando las grietas de un material compatible (ladrillo o mampuesto con cal hidráulica, por ejemplo), se consigue devolver el edificio a la situación de seguridad que poseía antes del último sismo, sin alterar su sistema constructivo.

La utilización de cosidos estáticos puede mejorar la seguridad al aumentar la trabazón entre volúmenes de fábricas fracturados o separados. Estos cosidos han de hacerse con materiales que no sufran degradación con el tiempo y que tengan deformaciones higrotérmicas compatibles con el resto de los materiales existentes.

El problema de estabilidad ante la acción sísmica es más crítico con vibraciones transversales al edificio que con vibraciones longitudinales, como las que parece que hubo en el último terremoto. A pesar de todo, es posible que el sismo estuviese asociado a problemas de subsuelo, aunque la horizontalidad de la plataforma sobre la que se asienta el conjunto de edificio y rellenos inferiores no parece manifestar direccionalidades.

En cualquier caso, siempre tiene más entidad en una restauración el control de las penetraciones de agua y de las degradaciones de los materiales que la posible alteración del comportamiento estructural¹¹.

Madrid, abril de 2000

Francisco Jurado Jiménez, arquitecto¹²

¹¹ "Las grandes estructuras de fábrica precisan vigilancia y mantenimiento más o menos continuos, no para verificar su estabilidad (puesto que son extremadamente estables), sino para asegurarse de que la piedra no esté excesivamente alterada por la acción de la intemperie, de que el agua no penetre, de que las grietas no continúen abriéndose, etc..." Jacques Heyman, "The restoration of masonry: structural principles", *Architectural Science Review* 20, 1977.

¹² El autor de este estudio es Profesor del Departamento de Estructuras de la ETSAM desde 1978, está especializado en estructuras de construcciones antiguas y ha restaurado más de cuarenta edificios históricos, entre los que se encuentran el Acueducto de Segovia, la iglesia de Los Jerónimos de Madrid y la Sinagoga de Sta. María la Blanca de Toledo.