

ESTUDIO DE ESTABILIDAD DE LA ESPADAÑA DE LA IGLESIA DE SANTA CRUZ. SEVILLA.

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 las obras de rehabilitación que se están llevando a cabo en la iglesia.

Con esta documentación se pretende tener una explicación científica de la estabilidad actual de la espadaña y un conocimiento objetivo de su posible seguridad, dada la ostensible esbeltez que la misma tiene.

DESCRIPCIÓN DE LA CONSTRUCCIÓN

Se nos han facilitado planos de la iglesia, donde se incluye la geometría de la espadaña, así como una pormenorizada colección de fotografías digitales que VORSEVI realizó ex profeso para nosotros.

En cualquier caso, se ha considerado que el material constituyente de la misma es fábrica de ladrillo (presumiblemente recibido con mortero de cal) revocado y pintado exteriormente.

Nada se nos ha indicado de daños o fisuraciones aparentes, aunque sí de la existencia de cierta deformabilidad transversal.

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 descubrir sus puntos débiles y las zonas de posible concentración de sollicitaciones debida a las acciones que sobre el mismo pueden incidir.

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.

Basándonos en las más modernas teorías de la plasticidad, podemos utilizar métodos de análisis 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 estable¹. 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 propio².

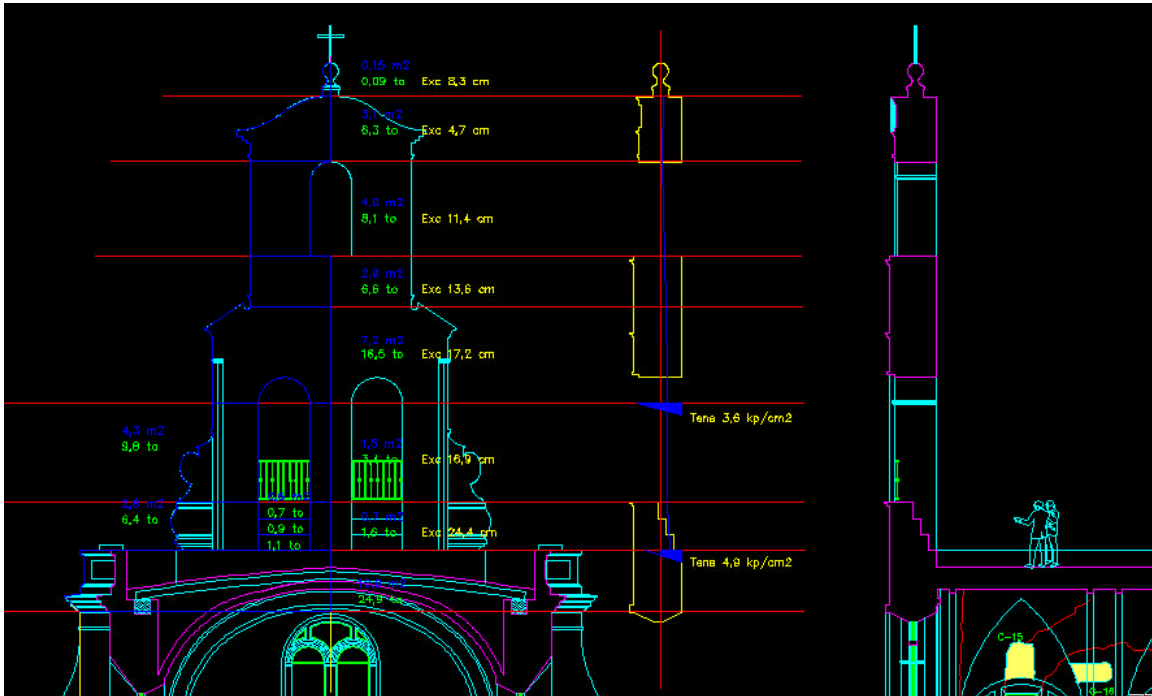
Este programa en combinación con cálculos convencionales de excentricidades debido a las acciones horizontales (momentos flectores sucesivos de las mismas divididos por los pesos propios acumulados) son los principales métodos utilizados en este trabajo.

¹ 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.

² 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.

VERIFICACIÓN ESTÁTICA INICIAL

Utilizando la geometría que se nos proporcionó en los planos, se dividió la estructura objeto de este estudio en trozos significativos, debido a su posición o diferente grueso, considerándose un peso específico medio de $1,80 \text{ to/m}^3$. Para la acción horizontal desestabilizante del viento se tomaron $0,1 \text{ to/m}^2$, equivalente a una velocidad del mismo de unos 125 km/h . Dicho análisis se refleja en la figura que a continuación se acompaña.



Como se puede apreciar, se obtiene una excentricidad de $24,4 \text{ cm}$ de la resultante de esfuerzos en la base de la espadaña, que tiene al parecer 4 pies de grueso, lo que supone, por tanto, unas tensiones máximas de compresión de unos $4,9 \text{ kp/cm}^2$, estando prácticamente $1/4$ de la sección con tendencia a fisurarse ante estas acciones horizontales.

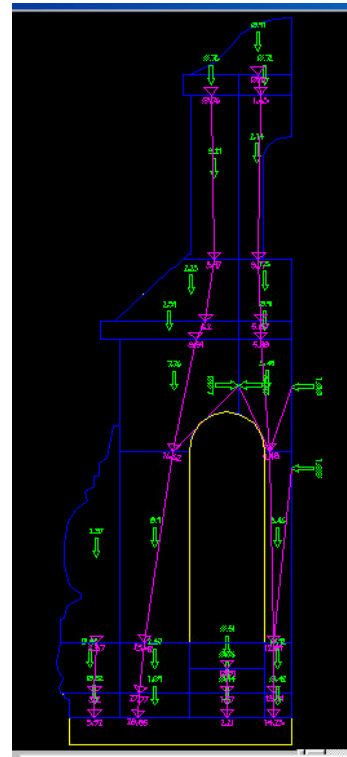
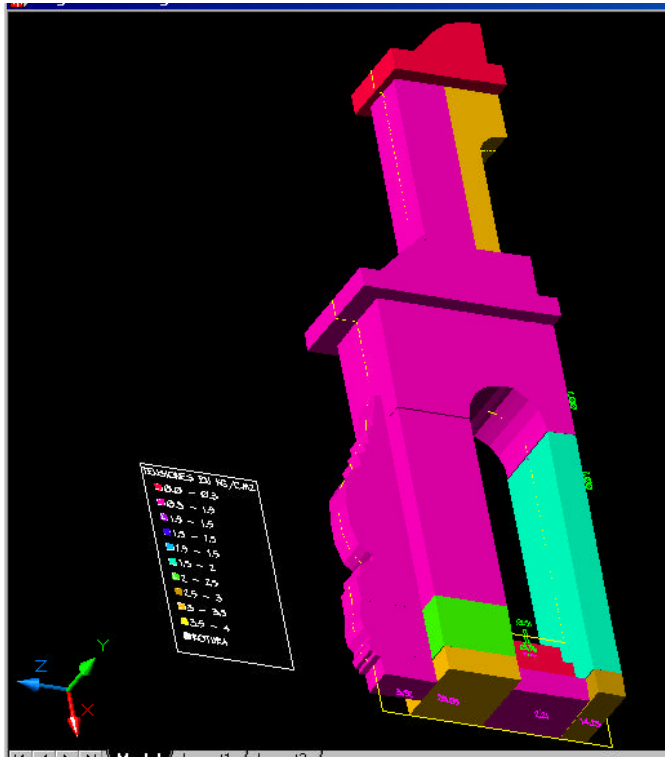
CORRECCIONES FOTOGRAMÉTRICAS Y NUEVOS ANÁLISIS

Al estudiar las proporciones de los distintos cuerpos de la espadaña que se pueden apreciar en las fotografías que se nos facilitaron, observamos diferencias apreciables que nos sugirieron la realización de medidas fotogramétricas complementarias.

Para ello se ortogonalizaron ciertas imágenes y, tras su correspondiente escalado, se procedió a corregir y a detallar más la geometría que se nos había facilitado en planos.

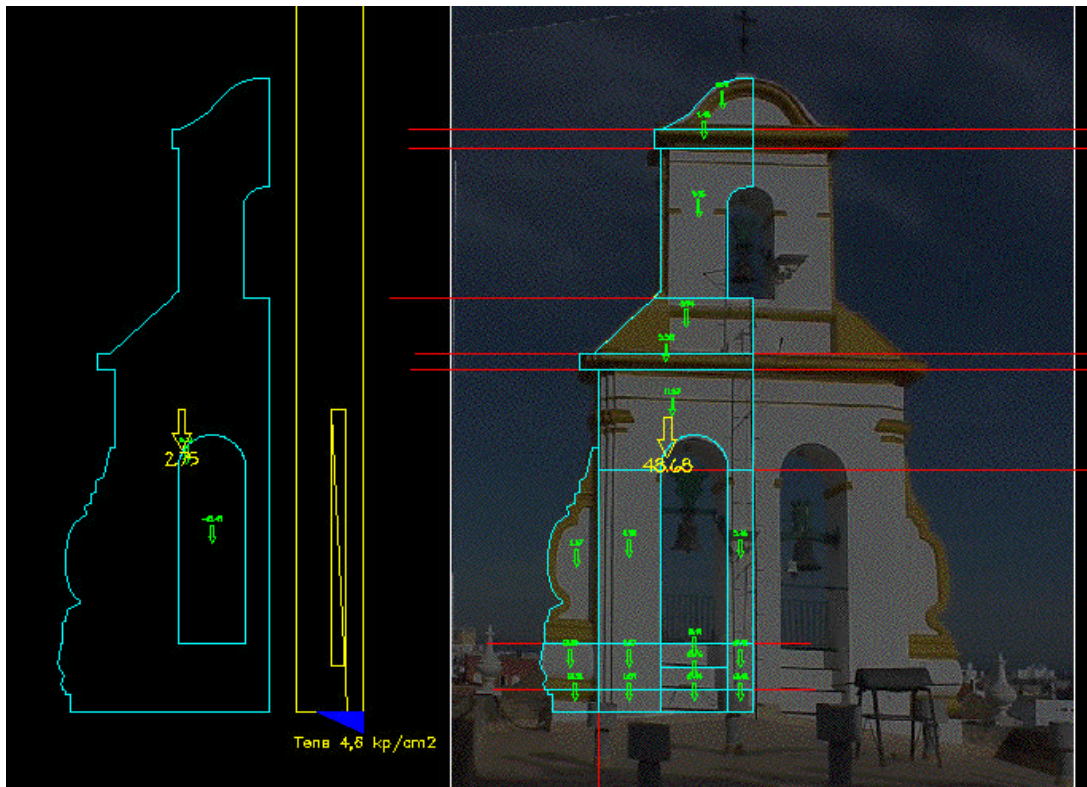
A título de ejemplo, aparte del mayor ajuste en la proporción de huecos y cornisas, se observa que el cuerpo superior de la espadaña tiene un grueso medio de 3 pies contra los 4 pies y medio que antes se habían considerado.





Al analizar la estructura de la espadaña sometida solamente a su peso propio, se obtienen los valores de resultantes y tensiones que se reflejan en las figuras situadas más arriba.

En la figura inferior se realiza la comprobación de estabilidad global entre la resultante global del empuje horizontal debido al viento (2,75 to) y la del peso propio total de la espadaña (48,68 to), con la geometría ya corregida. Se obtiene una excentricidad en la base de 33,4 cm (aproximadamente 1/3 del grueso sin compresión, con tendencia a la fisuración) y una compresión punta de 4,6 kp/cm².



EVALUACIÓN DE LA SEGURIDAD

Este es un tema complejo que, lógicamente, siempre es demandado por los usuarios del edificio 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.

En el caso que nos ocupa, el análisis final más afinado nos revela que la espadaña sigue siendo estable cuando sobre ella se produce el empuje de un viento de hasta 125 km/h, pero la resultante se sale ostensiblemente del núcleo central de inercia de su base.

En esta situación límite podíamos definir el factor de seguridad como la relación entre la tensión de rotura de la fábrica (entre 15 y 20 kp/cm² es el valor probable para una fábrica de ladrillo de este tipo) y la tensión máxima que se produce (4,6 kp/cm²), con lo que tendríamos un valor entre 3,3 y 4,3.

Sin embargo, si consideramos el factor de seguridad al vuelco como la relación entre la acción de viento que supondría tensiones punta 4 veces mayores, que provocarían el colapso (eso significa pasar en este caso de la excentricidad de 33,4 cm a otra de 56,0 cm, lo que da un triángulo de tensiones 4 veces más apretado), obtenemos entonces un factor de (56,0/33,4) = 1,68 valor excesivamente ajustado para la estabilidad ante el vuelco.

Aún nos quedaría por considerar la acción dinámica de las campanas volteando, pero creemos que su peso es pequeño en comparación con las acciones ya consideradas y, por ejemplo, el grado de error que hayamos manejado en la evaluación de pesos, introduce mayores imprecisiones que la consideración de estas nuevas acciones.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Sin perder de vista el criterio histórico (el edificio ha llegado “vivo” hasta nosotros³), desconocemos las lesiones que ha sufrido así como las posibles reparaciones que en su estructura se hayan realizado, pero nuestros análisis nos indican que, en situación límite, la espadaña seguirá siendo estable, aunque es probable que se produzcan deformaciones y lesiones (reparables).

Del mismo modo desconocemos el grado de rehabilitación a la que se está sometiendo y la evaluación de la seguridad para otros elementos estructurales (fundaciones, bóvedas, estructura muraria, etc.), por lo que, en función del grado de intervención que se haya tenido o se tenga en el resto del edificio, se puede considerar la posibilidad de mejorar la estabilidad del elemento que hemos estudiado ya sea arriostrando, ya sea introduciendo capacidad resistente a tracción en la base de la espadaña. Se trataría, en cualquier caso, de que la resultante quedara dentro del núcleo central de inercia (la excentricidad máxima debe ser 1/6 del grueso en la base, unos 21 cm).

Si se hace mediante arriostramientos, basta aportar una resistencia horizontal de 1,0 t a mitad de la altura de la espadaña (por ejemplo, dos “codales” de forja con 500 kp de capacidad resistente horizontal cada uno). Si se hace mediante cosidos estáticos verticales en la base, el procedimiento sería “invisible” pero algo menos obvio en su disposición, lo que exigiría un mayor conocimiento de la fábrica, que ahora no tenemos.

Madrid, abril de 1999

Francisco Jurado Jiménez, arquitecto⁴

³ “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.

⁴ 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.