



## ENSAYOS PARA REHABILITACIÓN DE OBRAS DE TIERRA (ADOBE, TAPIAL)

Jaramillo Morilla, A.<sup>1</sup>, Povedano Molina, J.E.<sup>2</sup>, Prados, F.<sup>3</sup>, Mascort Albea, E.<sup>4</sup>, Ruiz Jaramillo, J.<sup>4</sup>,  
Maturana Barahona, P.<sup>3</sup>, Navarrete Benjamin, F.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Catedrático de Ingeniería del Terreno, Dep. de Mecánica de Medios Continuos, Universidad de Sevilla, Sevilla (España), \* jarami@us.es

<sup>2</sup> Asistente Honorario, Dep. de Mecánica de Medios Continuos, Universidad de Sevilla, Sevilla (España).

<sup>3</sup> Profesor de la Facultad de Ingeniería de la Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago de Chile (Chile).

<sup>4</sup> Arquitecto

Área Temática: Mecánica de los medios continuos

### RESUMEN

*Resulta patente la necesidad de instaurar una serie de criterios generales que permitan afrontar de un modo normalizado la rehabilitación y construcción de obras ejecutadas con muros de tierra, principalmente adobe y tapial. Con el fin de fomentar la correcta ejecución de estos sistemas constructivos que han dado lugar a notables monumentos a lo largo de la Historia y reconducir procesos anárquicos de autoconstrucción como los que se producen en numerosas zonas de Hispanoamérica. Se pretende desarrollar un estudio de los ensayos geotécnicos que pueden ser aplicables a esta condición estructural de la tierra. Seleccionando aquellos que permitan obtener datos eficientes para una posterior modelización del edificio, calculado mediante programas informáticos de elementos finitos. Basándonos en experiencias previas y en estudios experimentales propios, como el efectuado en la "Hacienda del Quinto", ubicada en Dos Hermanas (Sevilla). Pretendemos aportar nuevos criterios que completen la elaboración de una futura "Guía para construcción y rehabilitación de obras de tierra", con el fin de sentar las bases germinales de una normativa nacional sobre muros de tierra, actualmente inexistente.*

**PALABRAS CLAVE:** Muro, Tierra, Ensayos geotécnicos, Macromodelización.

### INTRODUCCIÓN

Actualmente, las obras arquitectónicas sustentadas con muros de tierra (ladrillos de adobe o hileras de tapial) se encuentran en un completo ostracismo normativo a nivel europeo y nacional. En el actual Código Técnico de la Edificación, instaurado en España recientemente, no existe un documento específico que haga referencia a este tipo de sistemas edificatorios. Sólo desde Alemania se han efectuado esfuerzos para reglamentar uno de los sistemas constructivos más utilizados a lo largo de la Historia.

No obstante, este tipo de obra destaca por recurrir a un material barato y fácilmente accesible, ligado al contexto inmediato del ser humano, la tierra, posteriormente trabajada en sus diferentes formatos y sistemas productivos, de alto carácter ecológico. De este modo, son múltiples los ejemplos de edificios experimentales basados en la construcción en tierra, perfectamente adecuadas a la resistencia frente acciones sísmicas. Dichos avances, contrastan con el posicionamiento de la actual normativa sísmica española, NCSE-02, que no considera recomendables este tipo de obras. Una mayor profundización en los estudios específicos de este material, complementada con un considerable esfuerzo de difusión y aplicación normativa, permitiría fomentar la correcta ejecución de viviendas populares para reconducir procesos anárquicos de autoconstrucción como los que se

producen en numerosas zonas de Hispanoamérica, aumentando la solidez estructural y resistencia frente a sismos evitando los cuantiosos daños que producen.

Esta problemática se extiende al campo de la rehabilitación, ya que son numerosos los edificios y yacimientos catalogados en los registros oficiales de conservación del patrimonio arquitectónico que recurren a este sistema constructivo. Algunos ejemplos son de antigüedad milenaria, como los restos tartésicos ubicados en el municipio de Camas, cercano a Sevilla; otros resultan de notable interés por su capacidad para resistir importantes terremotos a lo largo de la Historia, siendo el caso de las iglesias edificadas durante el S. XVIII en el altiplano andino (Perú, Chile y Bolivia). También encontramos múltiples obras arquitectónicas de uso residencial y comercial relativamente recientes en núcleos históricos, así como en la edificación rural.

De esta manera, el ámbito de aplicación de la normativa tecnológica que indica los procedimientos adecuados para garantizar el cumplimiento de los requisitos exigibles a los edificios excluye aquellos ya construidos. Sólo cuando se producen grandes reformas o cambio de uso, se exige la justificación de dicho cumplimiento. En este caso, los edificios que han sido construidos con materiales cuyas características técnicas no están suficientemente determinadas, como es el caso de tapias o muros de adobe, la justificación de su seguridad estructural presenta una serie de dificultades cuya solución fácilmente desemboca en la sustitución, material o funcional, de estos elementos constructivos tradicionales.

Una vez presentada una somera perspectiva sobre el tema en cuestión, se pretende hacer una exposición de aquellos ensayos vinculados al campo de la geotecnia que pueden ser aplicables al estudio a las estructuras murarias ejecutadas en tierra. Siendo el fin último, establecer criterios correctos que permitan una adecuada modelización de este tipo de estructuras, en pos de avanzar en la elaboración de futuras normativas. Tras la exposición del cuerpo teórico, se presentaran los estudios particulares efectuados en la rehabilitación de una construcción ejecutada con muros de tapial, en la llamada “Hacienda del Quinto”, ubicada en la localidad sevillana de Dos Hermanas.

## METODOLOGÍA DE ENSAYOS

A continuación se muestran aquellos ensayos que se recomienda realizar sobre el material extraído de la zona de estudio. Con el fin de que permitan aportar información de características elásticas que puedan usarse a posteriori en programas de cálculo actuales. Siendo el objetivo encontrar ensayos normalizados que por sus características (coste, accesibilidad, idoneidad...) puedan aplicarse al estudio del comportamiento de estructuras murarias de tierra.

Con la finalidad de obtener resultados de una reproducibilidad e incertidumbre suficientemente contrastada se adoptan procedimientos de ensayo normalizados admitiéndose las desviaciones necesarias que no menoscaben la bondad de los resultados.

Para una buena correlación entre los datos obtenidos en laboratorio o “in situ” se adoptan procedimientos de ensayo que permitan su implantación en ambos escenarios con el mínimo de modificaciones. A su vez, el procedimiento de ensayo debe permitir la obtención de resultados lo más directamente posible relacionados con las características a determinar.

Los resultados obtenidos deberán ser concluyentes con respecto al comportamiento global del edificio, tanto en valores estimados como en valores directamente medidos. De este modo, realizaremos a continuación una enumeración de los ensayos aplicables en este campo haciendo especial hincapié, en aquellos más característicos dentro de cada campo. Pudiendo distinguir ensayos destructivos y no destructivos.

### Ensayos destructivos sobre obras de tierra

Podemos a su vez, diferenciar entre aquellos que se realizarán in situ, y los que requerirán de una serie de muestras estudiadas a posteriori en laboratorios. Dichos ensayos se realizarán con el fin de caracterizar los materiales y estudiar sus características físico-mecánicas.

Aquellos ensayos realizados “in situ” deben realizarse en un lugar suficientemente representativo del muro objeto del estudio. Se deben evitar aquellas zonas susceptibles de sufrir plastificaciones importantes que generen microfisuración, como pueden ser los paramentos cercanos a los huecos, la base de los muros, o las zonas próximas a los apoyos de vigas. En el caso de la aplicación de cargas, la influencia de la dirección de la misma con respecto a las cargas reales puede ser bastante significativa por efecto de la ortotropía que puede ocasionar la compactibilidad con humedad superior a la óptima.

En los se ensayos de laboratorio se requiere la recogida de muestras tomadas de la zona de estudio. Cada lote de ensayo debería estar compuesto al menos de unos 25 Kg de material alterado, 6 muestras inalteradas de tamaño adecuado para el tallado de las probetas de corte y, en su caso, otras 6 muestras de material para la determinación de sus características físico – mecánicas. El sistema de muestreo se debe corresponder con las diferentes composiciones que podamos encontrar, teniendo en cuenta que es frecuente utilizar diferentes mezclas según la ubicación del muro en cuestión (fachadas, zócalos, muros interiores...). La mayoría de las determinaciones propuestas pueden realizarse sin dificultad según el método especificado en sus respectivas normas de ensayo que se corresponden con las indicadas en el CTE-DB/SE-Cimientos.

Los elementos constructivos fabricados con tierra apisonada, tapias, bloques de adobe, muros romanos... se componen de los siguientes materiales simples: material granular (grava, arena, cascote...), material cementante, (arcilla con ciertos estabilizantes como materia vegetal, compuestos químicos orgánicos e inorgánicos, etc.) y agua. Las características físicas determinantes de su capacidad portante y durabilidad estarán en función de la composición en que cada uno de estos elementos entre a formar parte de conjunto y el proceso de fabricación, fundamentalmente basado en la compactan, secado y consolidado obteniéndose al final un material suficientemente resistente y poco comprensible. El conocimiento de estas características permite estimar mediante los procedimientos de cálculo más rigurosos su comportamiento en las condiciones exigibles para el cumplimiento de los requisitos esenciales de aplicación.

Para el estudio de dichas cualidades, se recomienda la utilización de los siguientes ensayos de caracterización material: Granulometría (UNE 103101-95); Límites de Atterberg (UNE 103103-94; UNE 103104-93); Densidad; Porosidad; masa volumen (UNE 103301-94; UNE 103302-94); Humedad natural (UNE 103300-93); Contenido en sulfatos (UNE 103202-95); Contenido en carbonatos. (UNE 103200-93; UNE 7045; NLT 116) y Contenido en materia orgánica (UNE 103204-93).

La determinación de la granulometría, entendida como la distribución por tamaños de las partículas que componen un suelo (Fig. 1), [1], junto con otros ensayos de identificación pone de manifiesto desde un punto de vista cualitativo cuando dos suelos son similares y cabe esperar de ellos un comportamiento semejante.

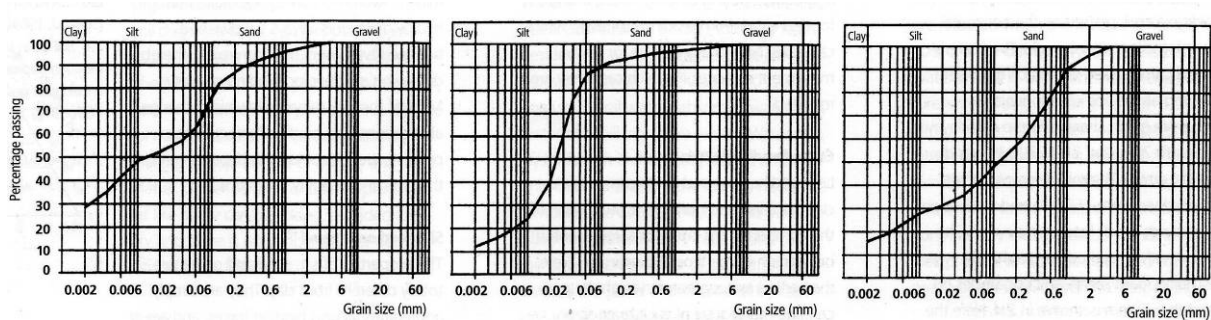


Fig. 1. Granulometrías correspondientes a suelos arcillosos (a), limosos (b) o arenosos (c)

La esbeltez geométrica de los muros de tierra apisonada que habitualmente encontramos en edificaciones antiguas, permite estimar un comportamiento mecánico donde predominan especialmente las tensiones de compresión y esfuerzo cortante, siendo los esfuerzos de flexión poco relevantes. Con independencia de su sistema de fabricación, y teniendo en cuenta este estado tensional. Consideramos que presentan un comportamiento elástico dentro del rango de tensiones a que están sometidos y por consiguiente, las constantes físicas a determinar serían el módulo de elasticidad tanto en cortante como en compresión y el coeficiente de Poisson.

En este caso, los principales ensayos para el estudio de las características físico-mecánicas son los siguientes: Ensayo de compactabilidad Proctor (UNE 103500-94; UNE 103501-94); Compresión simple (UNE 103400-93); Ensayo de corte directo (103401-98); Determinación del módulo elástico y coeficiente de Poisson. (Experimental)

Destaca el ensayo de compresión simple por aportar datos esenciales para determinar la resistencia de los muros. Resultando uno de los métodos más utilizados para medir la cohesión de un suelo arcilloso (Tabla 1).

Tabla 1. Relación entre la resistencia a compresión simple y la cohesión de un suelo

CONSISTENCIA	RESISTENCIA A COMPRESIÓN SIMPLE (Kn/m <sup>2</sup> )
Muy blanda	25
Blanda	25-50
Media	50-100
Dura	100-200
Muy Dura	200-400
Extraordinariamente dura	>400

A través de ensayos CBR (UNE EN 13286-47/2008) "Mezcla de aridos sin ligante y con conglomerante hidraulico; Parte 47: Metodo de ensayo para la determinacion del CBR (California Bearing Ratio), Indice de rodamiento inmediato (IBI) y aumento de volumen lineal" podemos obtener el coeficiente de Poisson.

Los resultados obtenidos de la curva tensión deformación obtenida, corregida en su caso y según el modelo elástico estudiado por Foster y Ahluin (1954) [3], el asiento (deformación) sería como se presenta en la Ec.(1). Siendo: S= asiento; v= Coeficiente de Poisson; p= Carga uniformemente repartida sobre el pistón; a= radio del pistón (25mm) y E= modulo elástico.

$$S = \pi/2 (1-v^2)*(pa/E)$$

Con la tanda de resultados obtenidos (Q/S) se obtendrían directamente E / v para el material estudiado, aproximando los resultados "in situ" a los obtenidos en laboratorio. El modulo de elasticidad lineal E, al tratarse de un suelo con un mínimo grado de saturación, se puede obtener mediante el ensayo de compresión simple, con muestra remoldeada procedente del ensayo de CBR en laboratorio o con muestra inalterada directamente obtenida del muro. El modulo de rigidez (G) a cortante se puede estimar en Ec.(2):

$$G = E/[2*(1+v)]$$

### Ensayos no destructivos

Son aquellos que nos permiten conocer de forma pormenorizada características mecánicas de los componentes de una edificación sin la necesidad de tomar muestras que destruyan o perturben los elementos constructivos. Por tanto, resultan un recurso óptimo en trabajos de rehabilitación y reparación de una obra preexistente, o sobre elementos deteriorados o de gran valor. En nuestro caso en particular, son aplicables los ensayos de ultrasonido (Fig. 2) [2] y termografía. Así como el estudio de vibraciones de un edificio, directamente vinculado con las pruebas del acelerómetro, y fundamental para determinar la frecuencia global del edificio.

Este ensayo permite medir las discontinuidades interiores del conjunto a partir de la interpretación en la velocidad del sonido en su paso por el paramento. Aplicado a muros de adobe o mampostería, permite determinar la existencia de planos de rotura, zonas de escasa consolidación o la profundidad e importancia de posibles fisuras que aparezcan en la superficie. Por otro lado, los equipos termográficos nos permiten tener una información muy precisa sobre las condiciones interiores de muros, determinando su grado de heterogeneidad en la superficie o realizar mapeos de humedades de una fachada.



Fig. 2. Ejemplo de equipo de ultrasonidos con dos palpadores



La inspección mediante ensayos dinámicos, basada en la lectura de la respuesta que presentan las estructuras al vibrar de manera libre o forzada, ha crecido de manera importante los últimos años gracias a la capacidad de este tipo de ensayos para facilitar información geométrica y mecánica de las estructuras así como detectar en algunos casos su posibles daños y patologías. La definición estructural del edificio es una actividad compleja por interferir a menudo con la propia actividad del edificio o por suponer en muchos casos la aplicación de métodos caros y destructivos. La principal ventaja que presentan los ensayos dinámicos es la posibilidad de realizar un número elevado de medidas en un margen de tiempo razonable, así como repetir las mediciones cuantas veces sea necesario.

Se puede estudiar el comportamiento dinámico y la rigidez del conjunto estructural de un edificio, así como el de sus elementos puntuales mediante el estudio de los periodos de vibración. Este ensayo se realiza mediante un acelerómetro (Fig. 3), es decir, una célula capaz de medir pequeñas variaciones de movimiento, imperceptibles para el ser humano. Los datos que emite el acelerómetro son filtrados a través de un conversor analógico digital que permite, mediante el software apropiado, que puedan ser recogidos por un ordenador portátil.

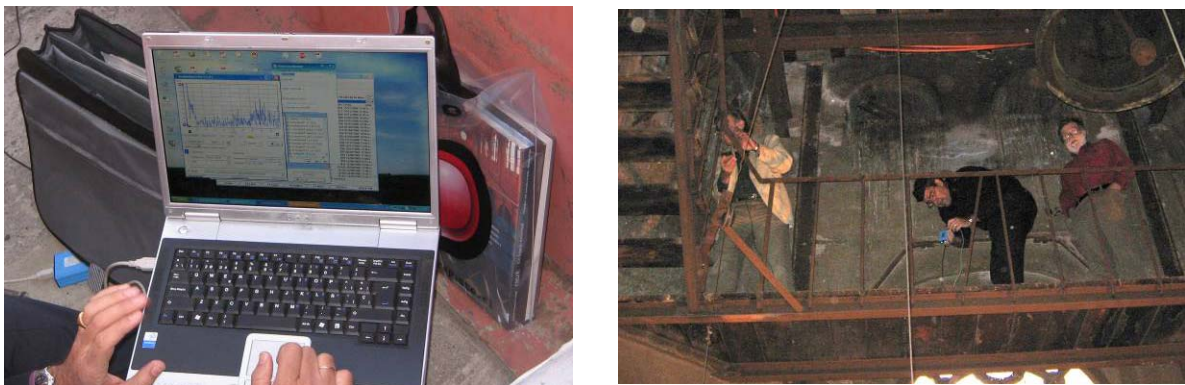


Fig. 3. Realización de ensayos no destructivos en la Catedral de Santiago

Al tratarse de un método indirecto, experimental no normalizado, en la interpretación de los resultados debe tenerse en cuenta las limitaciones propias de la extrapolación de las medidas obtenidas y su correlación con la capacidad portante de la estructura, considerando estos datos como una ratificación de los obtenidos mediante los procedimientos reglamentarios normalizados (inspección visual, análisis de daños, ensayos de materiales...) no debiendo deducirse exclusivamente de sus resultados los criterios para la aceptación o rechazo de la obra ejecutada. Las ventajas de su utilización son apreciables en las estructuras de diseño complejo, realizadas con materiales acoplados como es el caso de las mamposterías o de comportamiento no lineal donde la complejidad de los diferentes sistemas constructivos utilizados y su montaje son difíciles de reproducir en el análisis para el cálculo de la estructura. También pueden ser útiles como apoyo en los programas de revisión y mantenimiento de las estructuras en servicio durante su vida útil, comparando la evolución de los diferentes parámetros medidos a lo largo del tiempo.

### MODELIZACIÓN

El fin último será determinar mediante la aproximación de los valores obtenidos en los ensayos, las características resistentes de los materiales que componen los elementos constructivos objeto del estudio con las limitaciones que más adelante se indican.

El análisis de las construcciones de muros de tierra mediante el método de los elementos finitos encuentra importantes dificultades en la naturaleza frágil y compuesta del material. En particular, el tratamiento de un material compuesto a partir de la mecánica del medio continuo obliga a diferenciar entre dos posibles estrategias extremas: (A) Reconocer en el modelo la existencia de materiales distintos y modelizar en detalle cada uno de los mismos, así como sus formas de adherencia o conexión. Esta estrategia se conoce como micromodelización. (B) Asimilar, a efectos de cálculo, el material compuesto a un material homogéneo y uniforme equivalente. Se habla entonces de macromodelización.

Las formulaciones basadas en la macromodelización trabajan de hecho en términos de tensiones y deformaciones medias; por otra parte es preciso definir un modelo constructivo equivalente cuyos parámetros fundamentales (resistencias, módulos de deformación, etc.) representen el comportamiento de la fábrica a nivel

macroscópico promedio. La principal ventaja de tal estrategia reside en la posibilidad de utilizar formulaciones convencionales del método de los elementos finitos que permitan llevar a cabo una discretización simple del medio continuo. La desventaja reside en las limitaciones que el mantenimiento de la hipótesis del medio continuo supone para una simulación realista de la obra de fábrica en condiciones de rotura; modos de rotura que incluyan la separación o el deslizamiento entre bloques, realmente observables en la práctica, no pueden ser adecuadamente simulados mediante un modelo de este tipo.

El análisis elástico lineal es de hecho un caso particular de macromodelización. Tal y como se ha mencionado, este tipo de análisis resulta, en principio, poco apropiado para el estudio de la resistencia de las construcciones de obra de fábrica o tierra apisonada al no reconocer la incapacidad del material para resistir tracciones significativas (entre otras limitaciones). A pesar de ello, el uso de esta técnica es frecuente en la práctica, existiendo abundantes ejemplos de su utilización para el estudio de edificios complejos de carácter histórico.

Un segundo paso en el nivel de sofisticación consiste en limitar efectivamente la capacidad del material para resistir tensiones de tracción. Un modelo simplemente frágil a tracción (o “no-tracción”) suele producir importantes dificultades de orden puramente numérico, por lo que las propuestas realmente aplicables suelen basarse en tratamientos algo más elaborados.

Se tiende modernamente a utilizar otras aproximaciones, igualmente basadas en la mecánica del medio continuo, como la teoría del daño, que, gracias a su mayor coherencia teórica, permiten superar el problema de pérdida de objetividad y los resultados no tienden a depender fuertemente del tamaño de la malla de elementos finitos utilizada [4].

## ESTUDIO PARTICULAR DE LA HACIENDA DEL QUINTO

El edificio objeto de la evaluación es el denominado “Hacienda Quinto” en Urb. Montequinto; C/ Viena s/n DOS HERMANAS (Sevilla). Para determinar las características resistentes de sus fábricas de tapial, se propuso la realización de los siguientes ensayos: Ensayos dinámicos, midiendo la frecuencia de las distintas partes; Ensayos químicos de contenido de cal con muestras proporcionadas por el arqueólogo de la obra; Análisis granulométricos, realizados en la Facultad de Ingeniería de Faro; Ensayos de resistencia a compresión simple, realizados también en la Facultad de Ingeniería de Faro. Las condiciones de los elementos de estudio generaron dificultades a la hora de tallar las muestras, por lo que sólo se han podido tallar en un número de siete. A partir de dichos ensayos, se ha efectuado el proceso experimental de modelización que a continuación exponemos.

### Modelización geométrica y condiciones de contorno

El método elegido para la realización del análisis dinámico se fundamenta en modelos de macromodelización, anulando totalmente la capacidad resistente a tracción del modelo.

El modelo propuesto inicialmente consistió, en un elemento de muro de 4 metros de longitud por 4 metros de altura y 0,70 metros de espesor, sobre el que apoyan una serie de vigas de acero IPN-140. Las condiciones de contorno se establecen de la siguiente manera:

Consideramos el apoyo de la cimentación de tipo rígido, puesto que a falta de otros valores, se adopta este tipo de apoyo que aporta más rigidez al modelo. De este modo, la incertidumbre sobre su influencia estaría del lado de la seguridad. Por otro lado, la rigidez axial del forjado se determina según la relación establecida por la teoría clásica de resistencia de materiales Ec. (3):

$$K = EA / L$$

Que para cada viga de acero IPN-140 resulta ser aproximadamente 1000 KN/cm. Esta rigidez se materializa en el modelo mediante apoyos elásticos. A efectos de evaluación en las condiciones del ensayo, dado el estado de desmantelamiento en que se encuentra la cubierta, se considera que esta no aporta rigidez al conjunto. El peso específico de la obra muraria se determinó en 2.300 Kg/m<sup>3</sup>.

Se realizan dos tipos de análisis sobre el modelo discreto virtual de la estructura. En el primero (estático), se estudia la tipología estructural de la construcción. Para ello se tuvieron en cuenta las cargas estáticas previstas (masas y cargas permanentes). El segundo análisis (dinámico), consiste en la obtención de la frecuencia natural

de vibración de la estructura en las condiciones de cargas estáticas antes definidas y sometida a un frente de ondas vibratorias en su base. En ambos casos se tuvo en cuenta las características elásticas físico-mecánicas de la obra muraria (Fig. 4).

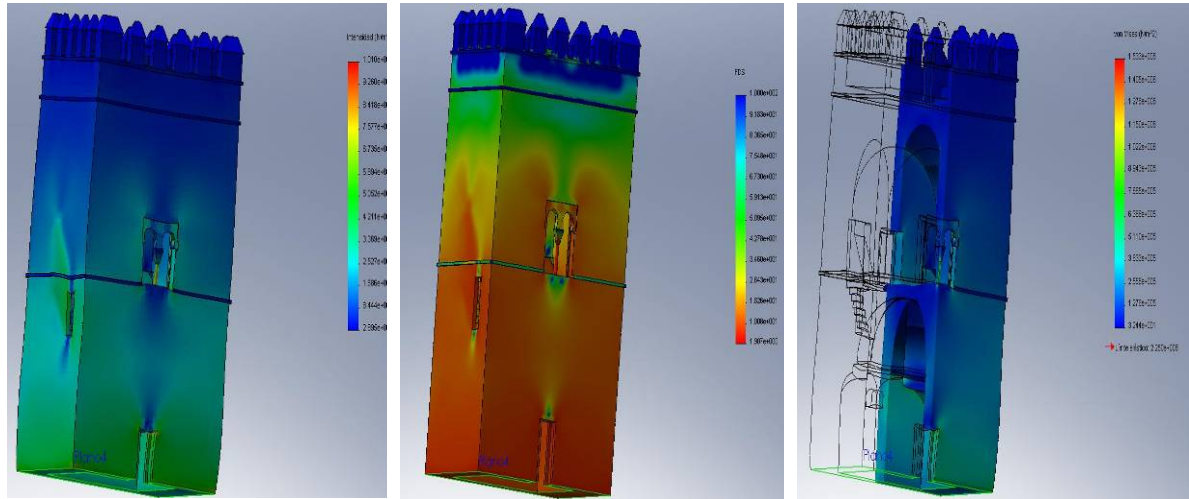


Fig.4. Resultados del proceso de modelización y cálculo con el programa de elementos finitos ROBOT: (a) estado tensional (b) factor de seguridad (FDS)(c) tensiones nodales estáticas.

Se realizaron dos medidas de frecuencia, una en el plano horizontal y otra en el eje vertical, correspondientes a los tres ejes de simetría de los elementos estudiados, localizados a media altura de los muros estudiados, por considerar a estos los más adecuados para obtener dichas medidas representativas de todo el conjunto. La interacción de los dos tipos de análisis expuestos con anterioridad se reflejan en la Tabla 2, siendo F, la frecuencia y D, la deformación registrada en los ensayos.

Tabla 2. Relaciones entre esfuerzos y esfuerzos y desplazamientos

EJE VERTICAL (Y)						
Toma	1	2	3	4	5	6
F/D	2.2Hz/ 0.07 $\mu$ m	2.0Hz /0.18 $\mu$ m	1.8Hz /0.14 $\mu$ m	2.8Hz /0.08 $\mu$ m	2.0Hz /0.12 $\mu$ m	NO
PLANO HORIZONTAL (X-Z)						
Toma	1	2	3	4	5	6
F/D	1.8Hz/ 0.09 $\mu$ m	3.0Hz /0.36 $\mu$ m	2.8Hz /0.18 $\mu$ m	4.0Hz /0.24 $\mu$ m	NO	2.0Hz /0.24 $\mu$ m
Valor medio de la oscilación vertical: 2.16 Hz			Valor medio de la oscilación horizontal: 2.75 Hz			

#### Determinación de la frecuencia natural de vibración de la estructura ejecutada.

Este método de ensayo consiste en la medida del periodo o frecuencia propia de vibración de los elementos estructurales en respuesta de la vibración ambiental (modelo de carga armónica con amortiguamiento) ó la provocada mediante una excitación puntual por medio de un impacto localizado (modelo de vibración libre amortiguada). Aproximando estas medidas obtenidas sobre el modelo real con el modelo discreto virtual, permite obtener las características elásticas reales de la fábrica existentes en el momento del ensayo.

Admitiendo un comportamiento lineal de la estructura entre los márgenes de uso, la frecuencia propia del modo de vibración no varía, manteniéndose en general constante la rigidez para las condiciones de servicio previstas, lo cual permite extrapolar los resultados obtenidos a otros estados de carga y sus constantes físico – mecánicas. Para ello se puede aplicar por analogía de la obra estudiada con las de ladrillo, la relación indicada en el Código Técnico de la Edificación para obras de fabrica (de aplicación contrastada en diversas instrucciones como el Eurocódigo 6) que establece el modulo de elasticidad a flexión de las fabricas de ladrillo en 1000 veces superior a su resistencia a compresión y el modulo de cortante en el 40% del modulo de elasticidad a flexión.

Para la determinación de la resistencia a cortante, se aplica la teoría de Mohr-Coulomb con un ángulo de rozamiento de 30°. El coeficiente de Poisson se estima entre 0,15 y 0,25; se adopta el valor medio de 0,2.

La incertidumbre asociada a este método de ensayo en lo referente a la medición de los periodos de vibración es del orden del 15%.

### Conclusiones del estudio particular

Asumiendo el carácter experimental del estudio, se han obtenido las siguientes conclusiones particulares, capaces de fundamentar posteriores análisis:

Se ha medido a nivel global el periodo fundamental medido de la estructura real, resultando ser de 0,36 segundos, correspondiente a 2,75 Hz.

A efectos de comprobación en términos generales estos resultados, y siguiendo los criterios expuestos en el Anexo de la norma sismorresistente española antes mencionada, apartado 3.7.2.1, para una estructura simplificada de 1 plantas diáfanas, formada por pórticos rígidos con sistemas constructivo de alta ductilidad, se estiman unos valores para el periodo fundamental de la estructura entre 0,10 y 0,20 segundos. Los valores obtenidos en la medición son significativamente peores que los esperados según la mencionada norma.

Las características físico – mecánicas estimadas corresponden a valores medios. Para la obtención de los valores de cálculo deberían estimarse los correspondientes coeficientes de variación mediante ensayos de los materiales constituyentes y aplicar los coeficientes parciales de seguridad, que por analogía podrían ser los especificados en el CTE DB-SE Fabricas.

A falta de los datos del análisis virtual de la estructura, se puede realizar una estimación del los valores resistentes que deberían ser confirmados mediante los ensayos expuestos anteriormente (Tabla 3):

Tabla 3. Estimación de valores resistentes a confirmar mediante los correspondientes ensayos

Propiedad	Módulo Elástico	Coefficiente de Poisson	Módulo cortante	Densidad	Límite de tracción	Resistencia a compresión	Límite elástico secante	Resistencia a cortante
Valor	3000	0.2	1200	2300	0	3,0	2,25	1,25
Unidades	N/mm <sup>2</sup>	NA	N/mm <sup>2</sup>		N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>

### CONCLUSIONES GENERALES

El ensayo de frecuencias vibratorias, capaz de determinar el periodo global del edificio resulta fundamental en este proceso. Por un lado, permite obtener un valor global que permita determinar la estabilidad edificio en estudio, comparable con otros de referencia que pudiesen aparecer en documentos normativos.

Por otro, permite realizar una comparación con el periodo global obtenido en el análisis dinámico del programa de cálculo informático, que se basa principalmente en los datos obtenidos del resto de ensayos. Variando los parámetros físico-mecánicos en el programa, se consiguen igualar los periodos globales del modelo y del ensayo de vibraciones. Obteniendo un modulo de elasticidad aplicable a todo el conjunto material de los muros de tierra. Para pormenorizar en zonas que presenten fuertes heterogeneidades con respecto al conjunto, se utilizarán el resto de ensayos citados, resultando de especial utilidad, el de ultrasonidos.

### REFERENCIAS

- 1.Gernot Minke. Building with Earth. Design and Tecnology of a Sustainable Architecture. *Birkhäuser-Publisher for Architecture.*
- 2.Coordinación general de Enrique Soler Arias; Protocolo de Inspección Técnica de Edificaciones; *Colegio Oficial de Arquitectos de Sevilla- Fundación para la Investigación y Difusión de la Arquitectura de Sevilla, Sevilla, 2005*
3. Geotecnia y Cimientos vol II: cimentaciones de rigidez infinita sobre semiespacio de Boussinesq; Jimenez Salas et al.; *Ed. Rueda. Madrid, 1976.*
4. Periodos fundamentales en edificios utilizando vibraciones ambientales. Cancino, J.; Ed. UPC. Barcelona, 1996.