

TECNICAS TRADICIONALES ANTISISMICAS EN GRECIA

por P. G. TOULIATOS*

**Arquitecto, Ass Professor, Unidad de Investigación Arquitectónica, Universidad Técnica Nacional de Atenas.*

El profesor Touliaos es el representante griego en el subcomité **nº 5 Eurocódigo: estructuras de madera**; especialista en construcción antisísmica y en estructuras de madera, es además, un buen dibujante como se demuestra en este artículo, cuyas ilustraciones son también del autor.

Sus dibujos y comentarios muestran la capacidad de observación y análisis sobre las técnicas de construcción tradicionales. Actualmente está llevando a cabo un interesante trabajo de estudio de las similitudes existentes entre las construcciones tradicionales de los diversos países mediterráneos con zonas de riesgo sísmico. Para ello colabora con otros técnicos de diversos países; en nuestro caso **AITIM** servirá de contacto.

Cuando se vive en un país con frecuente e importante actividad sísmica y se observan los efectos desastrosos de esta actividad en las construcciones durante varios miles de años, los habitantes comprenden desde los primeros estados de la historia, la necesidad de conferir un comportamiento antisísmico de las edificaciones.

Desde hace al menos 35 siglos se han desarrollado muchas técnicas con este fin y todavía en nuestros días siguen en evolución.

Este artículo describe algunas características de las técnicas tradicionales antisísmicas en Grecia y se exponen sus principios básicos.

1. INTRODUCCION

La población del Este del Mediterráneo ha sentido alguna vez el fenómeno de un terremoto y ha observado sus consecuencias.

Desde los tiempos antiguos, los filósofos griegos (Aristóteles, Pitágoras, Epicuro) han tratado del fenómeno sísmico intentando interpretarlo.

Se estima que en la actualidad el 50% de la energía sísmica anual de Europa y el 2% de la energía sísmica mundial, se disipa en Grecia.

En este país, la gente vive desarrollando civilizaciones y construyendo sus monumentos desde hace muchos miles de años. Han sobrevivido a los frecuentes desastres de terremotos y están familiarizados con la observación de los daños que se producen en sus construcciones y así, pueden comprender en mayor o menor grado, su comportamiento durante la acción sísmica. La reconstrucción de estos edificios se hacía cada vez con mejores métodos, intentando aumentar su resistencia ante las cargas dinámicas. Los antiguos constructores experimentaron con diferentes materiales, sistemas constructivos y algu-

Fig. 1: Evolución de la construcción antisísmica comparada con la frecuencia de aparición de terremotos.

nas veces con detalles constructivos muy sofisticados. Siguiendo largos y duros caminos de observación, experimentación, ruinas y sistemas de construcción, se ha conseguido crear una tecnología antisísmica con carácter más o menos local que afecta a los elementos básicos de la construcción (muros de fábrica, cubiertas, etc...), o incluso un sistema constructivo completo.

Proteger completamente una construcción contra las fuerzas sísmicas, es un hecho a veces imposible y fuera de los límites de la capacidad humana. En Grecia algunos monumentos, edificios, ciudades e incluso civilizaciones enteras se han perdido a consecuencia de los terremotos o erupciones volcánicas, desde tiempos prehistóricos hasta nuestros días, (por ejemplo Thira, erupción volcánica en el año 1.500 a.c., la ciudad de Argostoli, destruida completamente en 1.953, los grandes daños en Kalamata en 1.986, etc.).

Por otro lado, muchos monumentos arquitectónicos permanecen todavía en pie después de miles de años, (por ejemplo el Partenón, 438 a.c., Agia Sofía, 537 d.c.; Monasterio de Hosios Lukas, 955 d.c., etc) en zonas de elevado riesgo sísmico. Existen edificaciones construidas con técnicas tradicionales en toda Grecia, que han sobrevivido durante cientos de años a la acción sísmica repetida.

2. LA EXPERIENCIA DEL PASADO

Debemos aceptar el principio por el que el diseño de un edificio antisísmico debe basarse en una concepción e inspiración correctas desde su gestación. Sería una equivocación diseñar un edificio en una zona sísmica sin tener en cuenta el factor sísmico e intentar corregir los posibles errores utilizando complejos cálculos y métodos de refuerzo. En la actualidad el análisis dinámico de la estructura y su consecuente dimensionado constituyen poderosísimas y valiosísimas armas a nuestro alcance, con el fin de diseñar estructuras sísmicas. Pero una estructura con un diseño conceptualmente equivocado no puede ser corregida totalmente por un proceso de cálculo.

Por el contrario, cuando se tienen en cuenta desde los primeros estados del proceso del proyecto las decisiones adecuadas concernientes a los materiales, los sistemas estructurales, las uniones y la forma, el comportamiento correcto de la estructura queda garantizado. Hoy, es evidente, que el proyectista debe desarrollar (a través de la educación y de la práctica profesional) una intuición basada en los principios más importantes del diseño antisísmico.

Antiguamente y a pesar del hecho de que los métodos de análisis dinámico de las estructuras eran completamente desconocidos, los carpinteros locales desarrollaron algunos métodos y técnicas muy eficaces frente al sismo. Sin embargo, aquellos hábiles artesanos tenían un profundo conocimiento de los materiales y de las técnicas constructivas de su tiempo, que se han mantenido y desarrollado durante siglos, pasando de una generación a otra. Tenían además, una muy acertada concepción de cada detalle constructivo así como del conjunto de la construcción como unidad. Este profundo conocimiento acompañado por la observación del comportamiento de las estructuras durante los terremotos y la inspección y reparación de los daños conduce al descubrimiento de interesantes y eficaces sistemas de construcción antisísmica.

Quizás la siguiente observación puede ayudar a detectar, estudiar y contrastar tales sistemas de construcción antisísmica.

Es obvio que la evolución de los sistemas antisísmicos más completos tuvo lugar en áreas donde los movimientos sísmicos son un fenómeno

frecuente. Es decir, al menos se produce un movimiento sísmico de importancia durante el período de vida de una generación. La conciencia del peligro y la experiencia personal llevó a que los constructores tradicionales no sólo a la invención de técnicas antisísmicas, sino también a su evolución y conservación, como ocurrió en Santorini, Lefkas (Fig. 1.a)

Por el contrario, en lugares donde los terremotos son un fenómeno extraño y el período de calma entre dos importantes sismos es mayor que la duración media de una generación, la atención de los constructores tiende a disminuir durante los largos períodos de reposo (Fig. 1.b). Esto sucedió en Atenas cuando nadie se esperaba el terremoto de 1981 y desde entonces la norma de estructuras de hormigón armado frente a sismos ha sido modificada en varias ocasiones para su mejora. Esto también ha sucedido en el Cairo (Octubre 1992) y es de temer que pueda producirse otro en Chipre (Nicosia) en cualquier momento. Un pequeño ejemplo representativo puede encontrarse en la disminución de calidad de la construcción en los huecos de los muros de las edificaciones de la ciudad de Karitena en el Peloponeso (Fig. 2). Después de un largo período de calma desde el último sismo de importancia, el cuidado, en la construcción de los perímetros de los huecos se ha olvidado o ha degenerado a simples imitaciones morfológicas.

Sería muy interesante comparar los gráficos de frecuencia de repetición de terremotos del país con otros que representen las calidades de las técnicas antisísmicas. Puede, además, añadirse un gráfico con el nivel y clases de daños.

3 DEBILITAMIENTO DE UNA ESTRUCTURA ANTIGUA

Cuando, durante un terremoto, una estructura antigua resulta seriamente dañada o incluso completamente destruida, un juicio precipitado sobre materiales o sistemas constructivos inadecuados no es siempre acertado. Cuando examinamos una construcción antigua con el fin de mantenerla, repararla o reforzarla, deberíamos siempre intentar determinar sus condiciones iniciales de resistencia y capacidad de resistencia a las acciones sísmicas. Es fácil observar que la calidad del comportamiento antisísmico de las estructuras por lo general decrece con la edad.

Esta disminución de la resistencia a las acciones sísmicas se debe al envejecimiento, abandono, intervenciones desafortunadas y a los propios movimientos sísmicos (Fig. 3). Debemos, también añadir la frecuente falta de compatibilidad de los materiales y técnicas de nuestros días, que han sido empleados sin demasiadas precauciones en intervenciones y reparaciones. Además existen grandes dificultades para modelizar y analizar las estructuras antiguas y debe realizarse un gran esfuerzo de investigación en este campo. (Fig. 3).

Así, resulta obvio que casi cualquier construcción, incluso las diseñadas con técnicas antisísmicas avanzadas, alcanza en su vida el instante en el que ya no es posible superar con éxito un terremoto. Muchos monumentos famosos y antiguos, que han resistido durante siglos las acciones dinámicas, han demostrado la hipótesis antes citada mediante un fallo local o general de la estructura. El Partenón y el Hagia Sofía se encuentran entre ellos.

Con el fin de intervenir en ese momento y devolver a la construcción al menos a su condición inicial de resistencia frente a sismos, con los mínimos cambios de su concepción constructiva original, es necesario detectar, estudiar y analizar su sistema constructivo y desde luego, cualquier técnica o método antisísmico existente.

Fig. 2: Karitena-Grecia. B: Olvidando el peligro sísmico.

4 MUROS DE CARGA

En la resistencia al sismo de un muro de carga intervienen numerosos factores con un papel crucial. Uno de los factores básicos son los materiales utilizados y el sistema de construcción. Muchas veces los antiguos constructores que trabajaban en zonas con riesgo sísmico intentaron mejorar ambos aspectos.

Acorde, desde luego, con la importancia del edificio, los mejores materiales se elegían para los muros (por ejemplo piezas de mármol con formas curvas casi perfectas, ladrillos de elevada calidad, etc). Se consigue una mejor cooperación entre las partes componentes del muro mediante conectores especiales (por ejemplo piezas de hierro embebidas en plomo, en monumentos del periodo clásico). Con el mismo fin se utilizaron morteros de alta calidad (por ejemplo en las construcciones monumentales de la era bizantina).

Es muy importante mencionar aquí que existe un principio, que es completamente actual, y que fue conocido y cuidadosamente aplicado desde hace al menos 2.500 años, durante la construcción del Partenón en la Acrópolis en Atenas. Este principio es que el conector debe ser más débil que las piezas conectadas.

Al menos desde los tiempos de la civilización Minóica (hace alrededor de 3.700 años) se han intentado de forma seria sistemas para reforzar la fábrica de piedra, mejorando su resistencia a la flexión y la capacidad de resistir fuerzas de tracción, mediante zonas de refuerzo horizontales o más frecuentemente verticales. Generalmente se empleaba madera, a veces de forma realmente sofisticada, como por ejemplo en el asentamiento de Acrotiri en la isla de Santorini (1500 a.C.) (Fig. 10), (Fig. 4).

Con la intención de reducir el peso (y la masa) de las zonas superiores de las construcciones, los muros de carga y tabiquería de las plantas superiores comenzaron a construirse con entramado de madera. (Fig. 5). Para aumentar la rigidez de estos muros entramados de madera se añaden diagonales y otras piezas de arriostramientos, diseñados con más cuidado en aquellas regiones con elevada probabilidad de acciones dinámicas, como por ejemplo las montañas de Pelión en el centro de Grecia con problemas de deslizamiento del terreno y de terremotos, o la isla de Lefkas con elevada actividad sísmica (Fig 13)

4.1. FORMA Y RIESGO SISMICO

Resulta muy indicativo que la elección de un mismo material y de un mismo sistema constructivo no conduce a la misma arquitectura ni al mismo diseño formal del edificio. En el centro y en el norte de Grecia la planta baja está construida de piedra reforzada con madera mientras que la planta superior tiene muros interiores y exteriores construidos con entramado de madera. La ligereza del entramado de madera, el arriostramiento con diagonales de madera y la cuidada conexión entre las piezas de madera permiten mayor libertad de diseño.

Así, a menudo la planta superior vuela sobre la calle aumentando o corrigiendo la superficie de las habitaciones. Por otro lado el piso alto goza del privilegio de disponer de grandes ventanales. (Fig. 6).

En la isla de Lefkas se utilizó en general el mismo sistema. Esta isla está sometida a frecuentes y muy importantes movimientos sísmicos. Únicamente la planta baja permanece en piedra. Las superiores (una o dos, normalmente) aunque están construidas con un sistema de entramado de madera muy sofisticado, mantienen el diseño formal estricto y conser-

grafico

Fig. 3: Izquierda: Proceso de debilitamiento de una construcción antigua. Otros puntos peligrosos de una construcción antigua: - Utilización sin precauciones de materiales o sistemas de construcción nuevos o sin suficiente experiencia, que no son compatibles con la estructura. -Añadidos, sin cuidado, encima o al lado de

la construcción. -Modelos incorrectos y/o dificultades en análisis estructural. -Pérdida del conocimiento de los materiales y técnicas tradicionales. Derecha: Edificio antiguo en la ciudad de Calamata, seriamente dañado en el terremoto de 1986.

Fig. 4: Conexión entre los muros en las esquinas de la edificación.

Fig. 5: Muros de fábrica reforzados con madera. Entramado de madera en las plantas superiores del edificio. Arriba a la izquierda: Edificio en la isla de Thassos con muros de piedra reforzados con madera en la planta baja y entramado de madera (con relleno de piedra) en los muros de la planta superior. (Siglo XIX). Arriba a la derecha: Muros de piedra reforzados con madera en un edificio en Metaxata (Tracia). Abajo: Edificio en Atenas del siglo XVII con muros de piedra en la planta baja y algunos muros exteriores y todos los interiores de la planta superior construidas con entramado de madera relleno con ladrillo.

Fig. 6: La influencia del riesgo alto de terremoto en la forma de las construcciones. Arriba: Típica construcción de edificios en Pilión (Zona central de Grecia con riesgo sísmico y deslizamientos del terreno). La estructura entramada ligera de las plantas altas tienen una gran libertad de diseño: composición libre de la planta, atrevidos voladizos y gran porcentaje de huecos en los muros. Abajo: Típica construcción en la isla de Lefkada donde el suelo es de pobre calidad para la cimentación y existe un elevado riesgo sísmico. El ligero entramado de madera de la planta superior, se apoya sobre el muro de piedra de planta baja con un diseño conservador y estricto: no hay voladizos y los huecos son pequeños y generalmente alineados verticalmente.

vador de una fábrica de piedra: no hay vuelos de ningún tipo y todos los huecos son de reducido tamaño y alineados verticalmente. (Fig.6.13).

4.2. LA CONTRIBUCIÓN DE LOS MUROS

Desde los primeros tiempos de la actividad de la construcción en Grecia, se observó y se comprendió que los muros de carga de piedra o ladrillo pueden resistir cargas en su plano con gran eficacia, pero resultan débiles en el caso de fuerzas perpendiculares a su plano.

Así, los muros paralelos a la dirección principal del sismo tienen un mejor comportamiento sísmico que los perpendiculares, en los que se observan grietas debidas a las tensiones de flexión y en ciertos casos llegan a desplomarse.

Desde los tiempos prehistóricos se han realizado grandes esfuerzos para conseguir una colaboración fiable entre los muros de un edificio.

Como ejemplos de medidas constructivas enfocadas a este fin se han utilizado durante siglos las siguientes: mejor trabazón entre las piedras de las esquinas de la construcción, continuidad de las zonas de refuerzo horizontal (generalmente en madera) mediante un cuidado sistema de enlace en las esquinas y el uso de barras especiales de hierro actuando como tirantes. (Fig. 4).

En las zonas con técnicas antisísmicas más elaboradas los constructores recurrían a conectar los forjados y la cubierta a los muros de carga. (consiguiendo un efecto de diafragma). (Fig 7).

5 ESTRUCTURAS HORIZONTALES (FORJADOS-CUBIERTAS)

Los forjados y cubiertas de la construcción tradicional por lo general son de madera. A veces pueden encontrarse estructuras horizontales de piedra o ladrillo (bóvedas, cúpulas, arcos), vigas metálicas (en edificios neoclásicos), e incluso hormigón armado. Especialmente, durante la acción sísmica, las estructuras horizontales (parcialmente o en su conjunto) transfieren los esfuerzos horizontales al sistema de carga vertical. (Fig. 8).

La finalidad no es sólo contrarrestar las fuerzas horizontales sino también transformar esas estructuras horizontales en diafragmas. De esta forma, con el adecuado anclaje y uniones, la estructura horizontal se rigidiza y se conecta a los muros reforzando su eficacia durante la acción sísmica. (Fig.7).

En general se pueden distinguir dos grandes grupos de sistemas de construcción de cubiertas. El primero es el sistema denominado de viga y pilar. Este, consiste en la utilización de pilares verticales o inclinados, apoyados sobre vigas horizontales, que soportan otras vigas inclinadas u horizontales (pares de cubierta) creando la forma deseada de la cubierta. Normalmente no hay reglas geométricas especiales sobre los componentes de este sistema de cubierta. La ventaja de esta forma de cubrición es su gran flexibilidad que se traduce en una gran aptitud para deformarse absorbiendo energía durante el movimiento sísmico. En este sistema, generalmente, el primer nivel horizontal de vigas sirve para conectar entre sí los muros consiguiendo un comportamiento de caja rígida. También se logra un efecto de diafragma con el falso techo, si existe. (Fig. 7,8).

El segundo grupo consiste en el empleo de componentes más complejos (como cerchas etc.). En este caso la capacidad de disipación de energía es mucho menor, la rigidez es mayor y el comportamiento como diafragma de los niveles superiores de la cubierta más frecuente (Fig 8).

6. EJEMPLOS DE TECNICAS ANTISISMICAS (Y CONSTRUCCIONES) EN LA HISTORIA DE

6.1. EL PARTENON

El templo del Partenón situado en la cima de la Acrópolis de Atenas fue construido en el increíble período de tiempo de ocho años (447-438 a. C.). Ha experimentado durante los últimos 2.500 años muchos terremotos, algunos de gran potencia, dejando en su estructura huellas inconfundibles.

En trabajos recientes de restauración se han descubierto más detalles sobre el perfeccionismo del trabajo de los arquitectos y artesanos. Sólo con fijarnos en la descripción de uno de tales detalles, a partir del trabajo de H. Bouras M. Korres sobre la restauración del Partenón, podemos determinar el nivel de conocimientos de la tecnología antisísmica que existía hace 2.500 años.

En la época del Partenón el Orden Dórico se encuentra en todo su esplendor. Proyectado por Ictinos y Calícrates, fue el templo de mayores dimensiones de su época con un pórtico octástilo (de ocho columnas) en lugar del más común hexástilo (de seis columnas).

A lo largo de las fachadas laterales del templo las piezas de mármol, que cubren el espacio entre las columnas y el muro están conectadas mediante uniones especiales con hierro. De esta forma la columnata (con su entablado) se comporta de forma solidaria con el muro de la nave, durante la acción sísmica. Este comportamiento ha resultado satisfactorio durante 25 siglos gracias a la similitud entre sus masas (Fig. 9).

Por el contrario, a lo largo de las fachadas frontales (lados este y oeste) del templo, los dinteles de mármol así como las planchas de mármol, que cubren el espacio entre las columnas y el muro se encuentran conectadas a una distancia fija únicamente mediante el rozamiento entre las piezas. Esto significa que los componentes del techo en esas zonas del templo están simplemente apoyados sobre el entablado de la columna y de la nave, sin ningún elemento de unión, permitiendo el movimiento independiente de cada parte. Esto es así ya que la masa y la geometría de la columnata es muy diferente de las del muro de la nave. Bajo cargas fuertes dinámicas, los movimientos (deformaciones) del muro de la nave tienen diferentes características que los de la columnata en la fachada. Los dinteles no serían capaces (como también se demuestra mediante el cálculo) de mantener constante la distancia entre el muro de la nave y las columnas, incluso si éstas fueran conectadas mediante uniones de gran capacidad, como las halladas en el Partenón.

6.2. EJEMPLO DE ACROTIRI (1.500 A. C.)

Durante las excavaciones en el asentamiento de Acrotiri en la isla de Santorini en Grecia, que fue destruida por una erupción volcánica en 1.500 a. C., aparecieron estructuras de madera de gruesas escuadrías y de gran complejidad en edificios de dos o tres plantas. Esta construcción no sólo servía de refuerzo y zunchado de los muros de piedra y de los perímetros de los huecos, sino que tenía funciones de estructura principal. El diseño de esta construcción y especialmente el diseño de las uniones, capaces de resistir grandes esfuerzos de tracción, demuestran el esfuerzo de supervivencia de un pueblo, que viviendo en las laderas de un volcán activo, estaba familiarizado con el constante riesgo sísmico (Fig 10, 11)

6.3. EJEMPLO DE LEFCAS (1825 D.C.)

Lefcas es una de las islas griegas con más riesgo

Fig. 7. La colaboración de los muros mejorada por el entramado de la cubierta.

Arriba: Debido a la acción sísmica los muros pueden perder su posición vertical, separándose entre sí, curvándose, agrietándose o incluso desplomándose. Por lo tanto el edificio puede ser zunchado en los planos correspondientes a los niveles de cubierta y de forjados mediante...
Abajo: ...la construcción del forjado o de la cubierta como se muestra en este ejemplo de Galaxidi en la bahía de Corinto con elevado riesgo sísmico.

Fig. 8: Cubiertas. (de arriba a abajo).

Arriba: Entramado de cubierta que absorbe la energía sísmica: Cubierta flexible.

Siguiente: Entramado de cubierta sin absorción de energía sísmica: Cubierta rígida.

Siguiente: Empujes o restricción permanente.

Siguiente: Sólo cargas verticales.

sísmico. En 1825 la ciudad de Lefkas fue destruida por un fuerte terremoto. Después, los ingleses que ocuparon la isla (1810-1864) establecieron el primer Código Antisísmico. En 1827 se formularon nuevas regulaciones sobre los materiales y sistemas constructivos a emplear. Todavía hoy, estos sistemas de construcción entramada de madera son utilizados respondiendo muy satisfactoriamente a los frecuentes e importantes sismos.

Los edificios de varias plantas están cimentados sobre una base formada por un grueso emparrillado de madera cubierto por arena, piedras y puzolana. El piso bajo se encuentra cerrado con muros de piedra. El entramado de madera de las plantas superiores se apoya en esos muros. Además existe una estructura secundaria formada por pilares de madera, constituyendo una segunda línea de defensa, construida en una línea paralela al interior de los muros de piedra, también soportando el entramado de madera de las plantas superiores. Cuando se produce un fuerte terremoto, algunas partes de los muros de piedra pueden desplomarse hacia el exterior dejando al descubierto el entramado de madera que se halla temporalmente soportado por las columnas de madera hasta que se repare la fábrica de piedra (Fig. 12). De esta forma, mientras se aprovechan las ventajas de las propiedades de los muros de piedra, tales como la resistencia, comportamiento de diafragma, aspecto tradicional, prestigio, seguridad, etc., este sistema constructivo, mediante la redundancia no permite la transmisión de grandes deformaciones o posibles fallos de las partes más débiles, que en este caso son los muros de piedra, a la estructura ligera de madera (Fig. 13).

Puede afirmarse, que el principio de la deformación independiente, pero con las partes colaborando entre sí de una edificación, estaba establecido al menos hace dos siglos, cuando se observó que construcciones diferentes utilizando diversos materiales presentaban un comportamiento diferente bajo las acciones sísmicas. Este principio continua con

Fig 9:
Comportamiento dinámico de algunas partes del Partenón.
Arriba a la izquierda: Fachadas largas: la columnata está conectada al muro a través del techo mediante conectores especiales de hierro entre las piedras de mármol.
"Comportamiento solidario".
Debajo: Fachadas cortas: se encuentran unidas entre sí y con el muro únicamente a través del rozamiento entre las piezas de mármol.
"Movimientos independientes".
A la derecha: Conexión horizontal entre A y B: L) Sólo rozamiento de la pieza C: 1'3 t/m. LL) Con conectores especiales: 3'5 t/m.

plena vigencia en la construcción antisísmica de hoy en día.

La estructura entramada de madera, consistente en montantes verticales y viguetas y vigas horizontales, está rigidizada mediante piezas de madera inclinadas y refuerzos en las esquinas utilizando piezas curvas de madera (generalmente procedentes de ramas o raíces de olivo, cortadas en ángulo recto). (Fig. 13).

También se encontraron sistemas de gran sofisticación para el enlace entre las piezas de madera. Los componentes de madera, con la forma adecuada y con la ayuda de clavos, espigas de madera y cuñas, adquieren resistencia a los esfuerzos de tracción y un comportamiento dúctil siempre evitando una constitución demasiado rígida. (Fig. 14, a). Así, puede considerarse un segundo principio básico: la ventaja del empleo de uniones de madera de gran capacidad de carga con el adecuado comportamiento dúctil (capaces de absorber energía) (Fig. 14, b). La similitud del sistema descrito de los enlaces entre las partes de madera en Lefkas, con las construcciones de la Ciudad de Acrotiri en Santorini (13 siglos antes) es notable.

7. EPILOGO

En nuestros días se acepta completamente el principio del esfuerzo para conservar el comportamiento antisísmico de los edificios antiguos sin modificar su arquitectura original, su concepción estática y dinámica, en cualquier proyecto de restauración o conservación, ya que la bondad de la solución elegida ha sido probada varias veces durante su vida.

Nuestra meta debería ser el restablecimiento de su resistencia inicial (al menos) a los terremotos de la forma más compatible y sencilla posible. En este proceso se precisa el mayor conocimiento posible de la técnica antisísmica que existe y de los principios

de diseño antisísmico.

Fig. 10. Construcciones de madera con grandes escuadrías en las excavaciones en Acrotiri de Santorini (Thira). 1500 a. C.

Fig. 11. Marcos de madera para los huecos de ventanas de los edificios descubiertos en las excavaciones de Santorini (Acrotiri 1.500 a.C.)

Fig. 12. Construcción tradicional antisísmica con entramado de madera, en la isla de Lefkas-Grecia:
La estructura secundaria de columnas de madera: (A)
Activada después del fallo parcial del sistema estructural principal de los muros de piedra.
(B) Durante un terremoto.

TRADITIONAL ASEISMIC TECHNIQUES IN GREECE

P.G. TOULIATOS. (*)

(*) *Architec, Ass. Professor, Architectural Research Unit., National Technical University of Athens.*

1.- INTRODUCTION

All the people living in Eastern Mediterranean have sometimes and in some degree felt the phenomenon of an earthquake and have observed its consequences.

From ancient times, Greek philosophers (as Aristóteles, Pythagoras, Hepicouros) have dealt with the earthquake phenomenon and tried to interpretate.

It's estimated that today, a 50% of the annual seismic energy, is released in Greece.

In this country, people live developing civilisations and constructing their monuments and buildings for many thousands of years. Surviving frequent and disastrous earthquakes they got familiar with the act of observation of the damages on their constructions and so understood, more or less, their behaviour during seismic action. Rebuilding them in better ways, trying to improve their resistance against the dynamic loading, the ancient constructors experimented with different materials, constructional systems and, sometimes, sophisticated detailing. Following long and hard paths of observation, experiments, failures and inventions they created local or more spread around aseismic techniques concerning basic members of a building (Masonry, roof, etc.), or even a complete building system.

It is a fact that it is impossible to protect completely a construction against the, sometimes out of the human capabilities limits, seismic force. In Greece, monuments, buildings, cities or even whole civilizations has been lost due to seismic or/and volcano activities, since prehistoric times to our days (i.e. Thira, volcano eruption 1500 B.C, City of argostoli, complete destruction, 1953, Kalamata severe damages, 1986 etc.).

On the other hand many architectural monuments stand still after more than thousand years (i. e. Partenon, 438 B.C.; Agia Sofia 537, A.D., Hosios Lukas Monastery, 955 A.D., etc.) in areas with, sometimes, high seismic risk. Traditionally constructed buildings and settlements, all over Greece, exist and are used for hundreds of years surviving repeatedly seismic action.

2.- THE EXPERIENCE OF THE PAST

We should accept today the principle that the design of an aseismic building must be based on the wright conception and inspiration from the very beginning. It is wrong to design a building in a seismic area without taking into account the seismic factor and then try to correct the various errors by using complicated calculations and strengthening methods. Today the correct structural and dynamic analysis and dimensioning are very powerful and valuable weapons in our hands, in order to design aseismic structures. But, it is well known, that a structure which is based on a fault conception cannot be totally corrected by any calculation.

On the contrary, when the proper crucial decisions concerning the materials, the load bearing systems, the joints and the forms are taken from the first steps

of the design procedure, the correct behaviour of the structure can be guaranteed. It is evident, today, that the designer must develop (through education and praxis) and aseismic perception based on the main principles of the aseismic design.

In older times and despite the fact the structural and dynamic analysis methods were totally unknown, some very efficient aseismic methods and techniques were developed by local craftsmen. Nevertheless, these skilled workmen had a very deep knowledge of the materials and the building systems of that time, which stayed the same and kept developing for centuries, passing on from one generation to the other. They also had a very good conception of every small detail as well as of the whole of the construction. This deep knowledge accompanied by observation of the behaviour of structures during earthquakes and the examinations and repairs of the damages led to the invention of very interesting and efficient aseismic construction systems.

Perhaps the following remark can help to detect, study and support such aseismic construction systems. It is obvious that the evolution of more complete aseismic systems took place in areas where earthquakes were a frequent phenomenon. That is at least one important seismic action during the life period of a generation. Consciousness of danger and personal experience lead traditional constructors not only to the invention of aseismic techniques, but also to their evolution and conservation, as happened in Santorini, Lefcas (Fig. 1, A).

On the contrary, in places where earthquakes are a rare phenomenon and the period of calm between two important seismic actions is larger than the average generation lifetime, the attention of constructors tends to diminish during the long periods of calm (Fig. 1, B). That happened in Athens where nobody expected the 1981 earthquake and where since that time the reinforced concrete aseismic code has been improved repeatedly several times. That also just happened in Kairo (October 1992) and I am very afraid it can happen any moment in Cyprus (Nicosia). A small, representative example can be taken from the diminishing quality of the construction of the openings in the masonry of the buildings in the village of Karitena in Peloponese. (Fig. 2). After a long calm period from the last significant seismic action the carefull, aseismic construction of the perimetres of the openings is forgotten or degenerated into morphocratic repetitions (Fig. 2, C).

It would be very interesting to compare maps of the frequency of the repetition of the earthquakes over the country to those of the quality of the aseismic techniques, from place to place. A map of the level and kind of damages can be added.

3.- WEAKENING OF AN OLD STRUCTURE

When, during an earthquake, an old structure is severely damaged, or even destroyed, a quick judgment about improper materials or a wrong building

Professor Touliaos is the Greek delegate in Subcommittee **nº5 Eurocode 5: timber structures**. He is an expert on aseismic construction techniques and timber structures. He is also a good sketching as it is shown in his freehand drawings of this article.

His drawings and commentaries include a deep observation and analysis about traditional techniques of building. Now, he is doing an interesting study about the similarities between traditional constructions

of different mediterranean countries with seismic risk. He is collaborating with other mediterranean experts and **AITIM** will be the spanish one.

Living in a country of frequent and high seismic activity and observing the disastrous influence on the construction for several thousand of years, people recognized from the very early stages of the history the necessity of the aseismic behaviour of the buildings.

Many related techniques have been developed for at least 35 centuries and are still developing under the impetus of the modern technology.

This paper is trying to describe some characteristics aseismic traditional techniques in Greece and to formulate their basic principles.

system is not always correct. When we examine and old construction in order to maintain, repair or strengthen it, we should always try to determine its initial condition of strength and ability to resist seismic action. It is easy to observe that the quality of a structures aseismic behaviour usually is weakened through the ages.

The descendance of resistance to seismic action is due to ageing abandonment, unsuccessful interventions and the seisms themselves (Fig.3). We must also add the frequent non compatibility of today's materials and techniques, which we have used carelessly in various interventions and repairs. Also there are great difficulties in modeling and structural analysis of the old structures and a lot of research must be done on this subject (Fig. 3).

So, it is obvious that almost any construction, even with a marvelous aseismic technique applied, reaches a point throughout time when it cannot face successfully the earthquake. Many old, famous monuments, resisting for centuries the dynamic actions at some moment have proved this hypothesis by a local or more general failure. The Parthenon and Hagia Sophia are among them.

In order to intervene at such a moment and bring the construction at least to its initial condition of strength and seismic resistance with the minimum changes of its original constructional conception, it is necessary to detect, study and analyse its construction system and, of course, any existing aseismic method or technique.

4.- LOAD BEARING WALLS

Many factors play a crucial role in the determination of a wall's seismic resistance. Basic factors are the materials, which are used, and the construction system(s). Many times the old constructors, building in areas with seismic risk tried to improve both. Accordingly, of course, to the building importance, best materials were chosen for the wall elements (i.e. perfectly curved marble components, high quality bricks etc.): Better cooperation between the wall elements has been achieved by special (i.e. iron embed in lead) connectors (i.e. classical period monuments). High quality mortars served the same goal (i.e. Byzantine era monumental constructions).

It is very important to mention here that a principle, which is modern today, was known and carefully applied at least 2.500 years ago, during the construction of the Parthenon on the Athens Acropolis. The principle that the connector must be weaker than the connected members.

At least since the Minoian civilisation time (about 3.700 years ago) serious attempts have been made to reinforce the masonry, improving its bending capacity and the ability to undertake tensile forces, by horizontal and, more seldom, vertical reinforcement zones. Usually wood was used, sometimes in a very sophisticated ways, as for example in the settlement of Akrotiri on the island of Santorini (1.500 B.C.) (Fig. 10), (Fig. 4).

Trying to minimize the weight (and the mass) at the upper parts of the buildings the external and the internal, load bearing and separating walls of the higher floors started to be constructed in timber frame (Fig. 5). Those timber framed walls became more stiff by diagonal (and other) bracings, more carefully developed in places with high probability of dynamic action as, for example, the mountains of Pelion in central Greece, with landslides and earthquakes, or the island of Lefkas with very high seismic activity (Fig.13).

4.1.- MORPHOLOGY AND SEISMIC RISK

It is very characteristic that the choice of the same material and the same constructional system didn't produce same architectural and morphological types of buildings. In central and north Greece the lower floors have stone masonry reinforced by wood and the upper floor has timber framed external and internal walls. The light timber frame, the diagonal timber bracing, the careful interbonding of the timber members etc., permitted more freedom in the design.

So the upper floor very often projects over the street enlarging or/and correcting the plan and the space of the rooms. On the other hand the upper floor acquired the privilege of many and large windows (Fig. 6).

On the island of Lefkas the same system, in general was applied. This island is subjected to very strong and frequent earthquakes. Only the ground floor remained in stone. The upper (one or two usually) floors although built in a very sophisticated timber framed constructional system, keep the strict and conservative morphology of a stone masonry: no projections at all and small openings placed strictly one over the other (Fig. 6, 13).

4.2.-THE COOPERATION OF THE WALLS

From very early stages of the constructional activity in Greece it was also observed and understood that the load bearing stone or brick walls can resist loads in their plane quite successfully but become very weak in the case of accepting forces perpendicular to their surface.

These walls parallel to the main direction of the earthquake have a better seismic behaviour than the perpendicular ones, where we observe cracks from bending stresses and in some cases these walls collapse after overturning.

Since prehistoric times many efforts have been done to establish a reliable cooperation between the walls of a building.

Better interbonding of the stones at the corners, continuity of the horizontal reinforcement zones (usually in timber) by careful connections at the corners and the use of special iron tie-rods took place during the centuries (Fig. 4).

In more developed aseismic techniques the builders used the horizontal construction of a floor or

Fig. 13. Vista isométrica de la estructura entramado de madera en la construcción antisísmica tradicional en la isla griega de Lefkas.

Fig. 14 A. Isla de Lefkas-Grecia. Ejemplos característicos de las uniones entre piezas de madera en los entramados antisísmicos en la construcción tradicional de la isla.

a roof (with higher or lower diaphragmatic behaviour) to connect the walls (Fig. 7).

5.- HORIZONTAL LOAD BEARING STRUCTURES (FLOORS-ROOFS)

Traditional roofs and floors are usually made of wood. Sometimes we find horizontal load bearing structures of stone or bricks (vaults, domes, arches) metal beams (neoclassical buildings) even reinforced concrete. Especially during seismic action, horizontal load bearing structures, (partially or in the whole) transfer horizontal forces to the vertical load bearing system (Fig. 8).

A general goal is not only to extinguish the transferring of horizontal forces but also to transform these horizontal structures into diaphragms. In this way, with adequate anchoring and joints, the horizontal structures become rigid and connect and strengthen the walls during seismic action (Fig. 7).

In general, there are two large groups of roof construction. The first is a post and beam system. That means that vertical or inclined posts on horizontal beams support other horizontal or inclined beams creating the desired shape of a roof. Usually there is no any special geometric rule of components in that roof system. The advantage of that roof is its significant flexibility and as a result the ability to deform absorbing energy during seismic action. In that system usually the first horizontal layer of beams undertake the task of connecting the walls and creating the box-frame action. Also a diaphragm action, if any, is performed by the ceiling construction (Fig. 7,8).

The second group is using more geometrically defined components (as trusses etc.). Here the energy absorbing capacity is much lower, the rigidity higher and the diaphragmatic behaviour of the upper levels of the roof more frequent (Fig. 8).

6.- EXAMPLES OF THE ASEISMIC TECHNIQUES (AND CONSTRUCTIONS) IN GREEK HISTORY

6.1.- PARTHENON

The temple of Parthenon, on the top of the Acropolis of Athens, built in the unbelievably short time of eight years (447-438 B.C.), has experienced during the last 2.500 years many earthquakes, some quite severe, leaving on the structure unmistakable prints.

Recent works of restoration revealed more details about the perfect work of the architects and craftsmen. Just the description of one such detail, from the work of H. Bouras and M. Korres about the Parthenon restoration, can determine the level of aseismic technique Knowledge 2.500 years ago.

Time Parthenon has all the features of the Doric Order in their perfection. Designed by Ictinos and Callicrates it was the wider and longer than any other temple of the time with an eight - columned (octastyle) portico rather than the usual six-columned (hexastyle) one.

Along the long sides of the temple the marble components, which cover the space between the colonnade and the wall are also connecting them by means of special iron joints. In this way the colonnade (with its entablature) has to behave as a whole together with the wall of the nave, during dynamic action. This is performed successfully for 25 centuries because of the similarity of their masses (Fig. 9).

On the contrary, along the other two short sides (the East and the West ones) of the temple, the marble beams, as well as the marble plates, which cover the space between the colonnades and the wall are connecting them at fixed distance only by means of the friction. That means that the ceiling components of those territories of the temple are simply placed on the entablature of the colonnade and the nave, without any joint element, permitting independent movement. This happens because the mass and the geometry of the colonnade at that point is quite different of those of the wall of the nave. During strong dynamic loading movements (deflections) of the nave wall have different characteristics from those of the colonnades at the front. The beams would not be able (as the calculation also showed) to keep the distance between the nave wall and the colonnades fixed even if they were connected by means of the heaviest types of joints, which have been found on the Parthenon.

6.2.- AKROTIRI EXAMPLE (1.500 B.C.)

In the two or three storey buildings that were excavated at the settlement of Akrotiri on the Island of Santorini in Greece, destroyed by a volcano eruption in 1.500 B.C. heavy and complicated wooden, load bearing construction was uncovered. This construction not only reinforced and binded the stone walls and the perimeters of the openings, but it was used as a load bearing wall itself. The design of this construction and especially the details of the joints, which are capable for strong tension actions, prove the effort for survival of a people who, living on the slopes of an active volcano, was familiarized with the constant seismic risk (Fig. 10, 11).

6.3.- LEFKAS EXAMPLE (1825)

Lefkas is one of the Greek islands with very high seismic risk. In 1825 the city of Lefkas was destroyed by a severe earthquake. After that, the English who occupied the island (1810-1864) established the first Aseismic Code. In 1827 new regulations about materials and building systems to be used were formulated. Today these systems of wood framed construction are still in common use responding very satisfactorily to the frequent and strong earthquakes.

Multistorey buildings are based upon a foundation which consist of a heavy wood grill covered by sand, stones and purcolana. The ground floor, is surrounded by stone walls. The timber frame of the upper floors is supported by these walls. A secondary, load bearing system of wooden columns, like a second line of defense, is constructed in parallel line to the internal side of the stone walls, also supporting the same timber frame of the upper building. During severe earthquakes, parts of the stone walls can fall outside leaving the whole wood frame of the multistorey building untouched and temporarily supported by the wooden columns until the masonry is repaired. (Fig. 12). While taking advantage of the obvious properties of a stone wall, such as strength, diaphragmatic

behaviour, traditional appearance, prestige, security etc., this type of construction system, by means of redundancy does not transfer the severe deformations or possible failures of the weaker parts, which in this case are stone walls, to the light timber structure (Fig. 13).

There it can be argued, that the principle of independently deformed but collaborating parts of a building was established at least two centuries ago, when it was realized that different constructions using various materials present different behaviour under seismic loading. A principle that is very important in the modern aseismic construction as well.

The wood frame, consisting of modularized vertical studs and horizontal beams and girders, is carefully stiffened by slating wood rods and by wooden corner reinforcements curved out of a whole pieces of wood (usually branches or roots, in right angle, of an olive tree) (Fig.13).

Sophisticated systems of interbonding of the timber parts are also found. The timber components, properly curved out and using nail, timber dowels and wedges, present resistance to tensile actions and a ductile behaviour always avoiding a too stiff composition (Fig. 14, A). Thus a second basic principle is recognized: the advantage of using strong timber joints with adequate ductile (or)and energy absorbing) behaviour (Fig. 14, B). The similarity of the described interbonding of the timber parts in Lefcas with those of the constructions of Akrotiri township in Santorini (13 centuries earlier) is noteworthy.

7.- EPILOGUE

It is a well established principle that today we must strive to preserve the aseismic behaviour of those old buildings without changing their initial architectural, static and dynamic conception in any restoration or conservation project because the correctness of the chosen solutions has been proved several times during their existence all those years. Our goal should be the reestablishment of their initial (at least) strength and resistance to the earthquakes in the most compatible and simple way. In this procedure the best possible knowledge of the relevant aseismic technique which has been used and the aseismic design principles is necessary.

Fig. 14. B. Isla de Lefcas-Grecia. Ejemplo característico de una unión con un mecanismo sencillo para la absorción de la energía. Cuando se rompe la espiga de madera, puede ser fácilmente inspeccionada y rápidamente sustituida.