



I JORNADAS DE INVESTIGACIÓN EN CONSTRUCCIÓN

Actas de las Jornadas

TOMO II

Instituto de Ciencias de la Construcción "Eduardo Torroja"
Consejo Superior de Investigaciones Científicas



ESTRUCTURA INTELIGENTE AUTOTENSABLE PARA EDIFICIOS DE GRAN ALTURA

JOSEP M^a ADELL ARGILÉS

Universidad Politécnica Madrid

M^a DOLORES DÁVILA

AIA arquitectura siglo XXI.

RESUMEN:

Se propone la posibilidad de desarrollar un tipo estructural basado en un material suficientemente elástico para que dispuesto en arco sea capaz de variar su forma como reacción a la acción horizontal del viento, que es la que tiene mayor incidencia en los edificios de gran altura, evitando así su movimiento ante dicha acción.

Se trata de aprovechar la energía almacenada en arcos flexibles autotensables, empleándola para contrarrestar los desplazamientos horizontales en edificios en altura, lo que inicialmente se aplicará a la Copa-Torre Mirador propuesta para las Olimpiadas de Madrid 2012, de ser adjudicadas a dicha ciudad.

Se combina esta nueva tecnología con tirantes autotensables regulados por sistemas hidráulicos que reaccionarán a tiempo real con un programa informático apropiado, que analice los parámetros del viento.

Alternativamente, podrá aplicarse para soportar las acciones horizontales de origen sísmico.

ABSTRACT:

The development of a new structural type based of an elastic material arranged in arch is proposed in this paper that can be capable of varying its form as a reaction against the movements from horizontal actions produces by the wind. This action is the one that has more relevance in great height buildings.

The point is to take advantage of the energy stored in flexible arches self tensioned, employing us horizontal displacements reaction in buildings of great height. Initially it will be applied to the View-point Cup-Tower proposed for the Olympic Games of Madrid 2012 (in case the city will be the one selected).

The self tensioned ties of this new technology are combined with hydraulic adjusted systems that react in real time with an appropriate data processing program that analyzes the parameters of the wind.

Alternatively, it will be able to be applied to react against the horizontal seismic actions.

1. Introducción

En el libro "Razón y ser de los tipos estructurales" (Torroja 1976), el ingeniero Eduardo Torroja nos plantea las distintas posibilidades formales de construcciones en equilibrio estático-resistente, en base a los materiales existentes y su desarrollo técnico.

La novedad que ahora aquí se plantea, reside sin embargo, en crear un nuevo tipo estructural capaz de admitir una variación estático-resistente en cada momento, para que pueda reaccionar en cada momento al aplicarlo a un edificio en altura frente a la acción horizontal del viento, logrando con ello permanecer totalmente inmóvil ante dicha acción.

Este nuevo tipo estructural se fundamenta en el binomio de la variación formal de los arcos elásticos y sus tirantes respectivos. Lo que puede aplicarse a materiales elásticos actuales como el acero o el hormigón armado, o a otros con mayor capacidad elástica por desarrollar.

2. Evolución desde el arco rígido tradicional al arco flexible en la Arquitectura del s. XXI

El hombre inventó el Arco para poder salvar vacíos o cubrir espacios con materiales tradicionales de carácter pétreo, capaces sólo de soportar compresiones (Fig. 1)

Los arcos de piezas de fábrica no admiten tracciones y, por lo tanto, tienen que mantenerse en el plano vertical, lo que por primera vez en la historia se ha podido superar en el "Arco del Milenio" construido con Ladriflor y el Sistema de Albañilería Integral delante del Palacio de Congresos, en ocasión de la 12^a Conferencia Internacional de Albañilería de Madrid 2000, gracias a la incorporación del acero en el mortero entre ladrillos, sin tener que recurrir al hormigón armado o a perfiles metálicos en el interior de la fábrica (Adell 2000) (Fig. 2).

A lo largo de la evolución de la historia, se ha ido avanzando en sucesivos hitos arquitectónicos que han marcado las distintas culturas. Así pues, de los arcos románicos o circulares de medio punto, se pasó a los arcos apuntados góticos o medievales, lográndose con ello aumentar las luces y alturas libres de los templos, al lograr disminuirse al mismo tiempo, los empujes en los muros sustentantes.

Podría decirse que a cada forma de Arco le corresponde un determinado empuje resultante en sus apoyos, cuya acción siempre se puede subdividir en la suma de dos acciones, una vertical y otra horizontal determinadas. Así pues, los arcos más rebajados ejercen una acción horizontal mayor que su acción vertical, y por el contrario, el empuje de los arcos más peraltados, ejerce una acción horizontal menor que su acción vertical (Fig. 3).

En los arcos parabólicos, la acción resultante sigue la misma dirección que la leve inclinación del arco en su arranque, por lo que apenas se producen flexiones en el mismo.

Las acciones horizontales a ambos lados en los arranques del Arco, se pueden contrarrestar si se emplean tirantes metálicos dispuestos entre dichos arranques, ya que el tirante, con su capacidad a tracción, es capaz de absorber la suma de dichas acciones horizontales opuestas. En resumen, a cada forma de Arco le puede corresponder un determinado tirante, con una determinada tensión, que lo equilibra en sus acciones horizontales.

Gaudí en su Arquitectura, con múltiples arcos y bóvedas de fábrica de formas parabólicas e hiperbólicas, experimentó al máximo las combinaciones técnico-formales de materiales de fábrica que sólo trabajan a compresión, sin que desde entonces haya habido novedades significativas en los arcos. Para ello, en sus modelos a escala, se apoyó en el efecto contrario de "tracción" para poder establecer así las formas en relación a las cargas (Fig. 4).

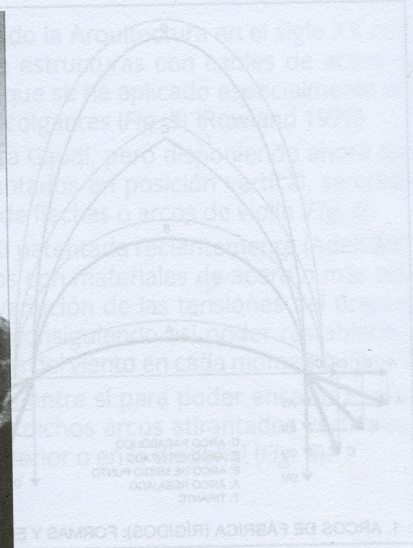


Fig. 1. El arco como almacén de tensión. Arcos equilibrados entre sí, trabajando sólo a compresión y dispuestos en el plano vertical, del Acueducto romano de Segovia.

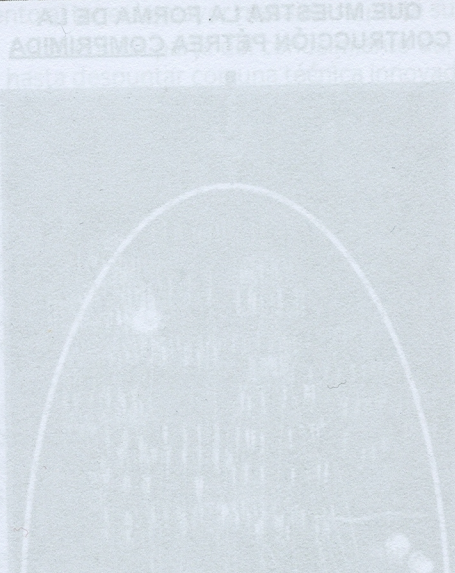
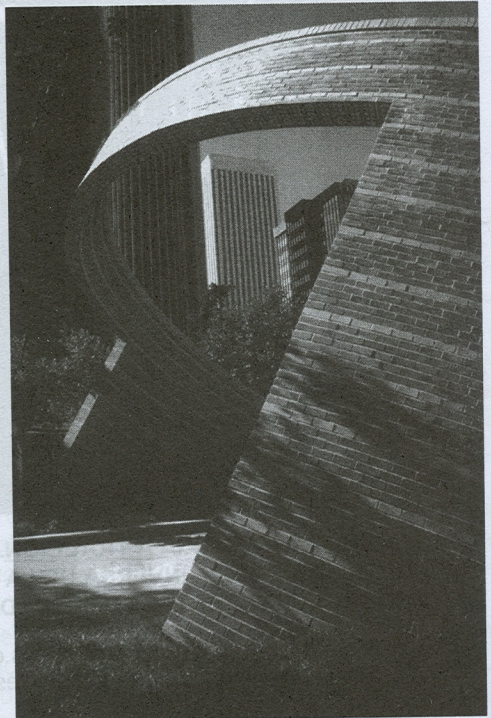


Fig. 2. "Arco del Milenio" construido por J.M. Adell, con Ladriflor y el Sistema de Albañilería Integral, fuera del plano vertical (60° de inclinación) gracias a incorporar la capacidad a tracción del acero.



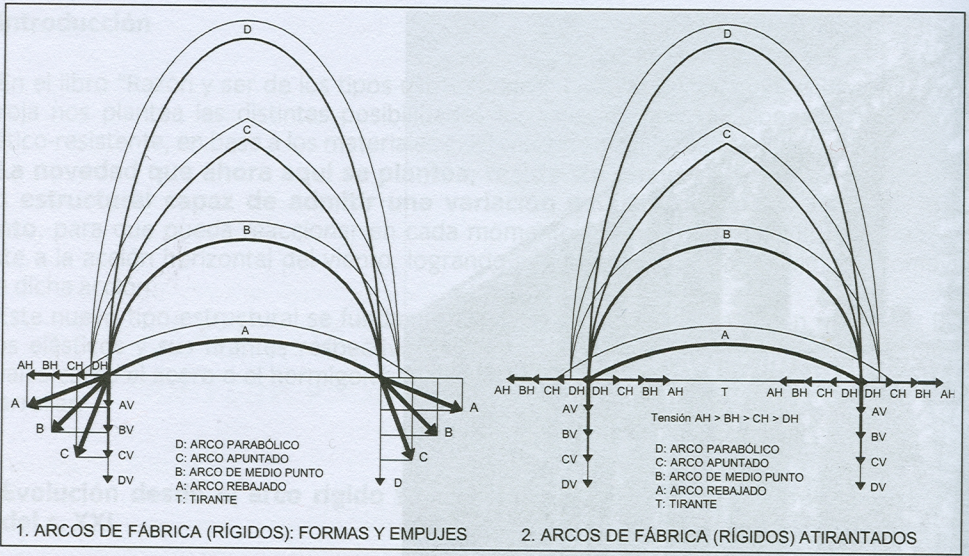
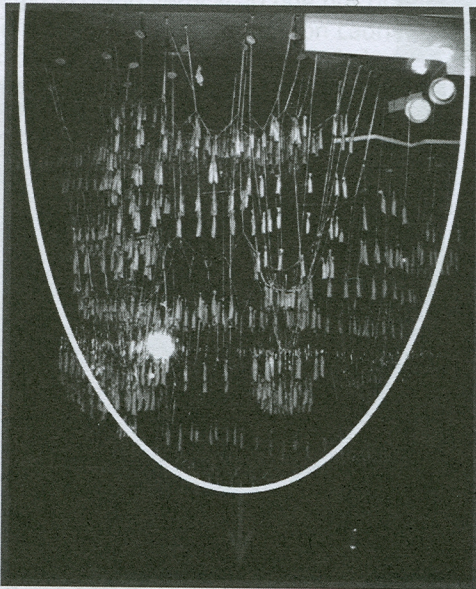


Fig. 3. Arcos de fábrica con los empujes que generan y con la posibilidad de absorber la acción horizontal con la capacidad a tracción de los tirantes.



MAQUETA CATENARIA A TRACCIÓN. SIMULA LA FORMA INVERSA DE LA CONSTRUCCIÓN PÉTREA COMPRIMIDA

REFLEJO INVERTIDO DE CATENARIA QUE MUESTRA LA FORMA DE LA CONSTRUCCIÓN PÉTREA COMPRIMIDA

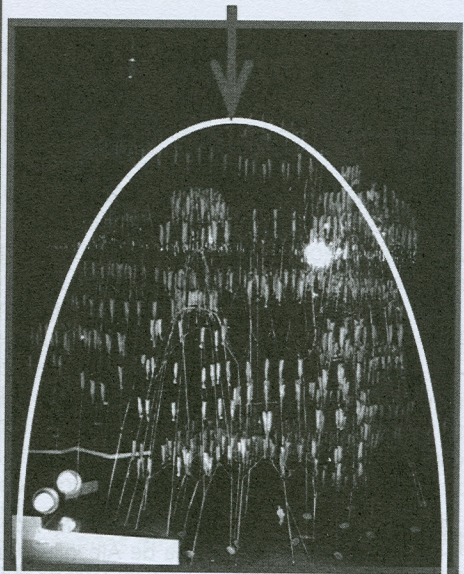


Fig. 4. Estudio invertido de cargas y formas de la Cripta Güell realizado por Gaudí, mediante simulación de tracciones equivalentes a las compresiones debidas a los pesos de la fábrica.

La capacidad a tracción del acero ha revolucionado la Arquitectura en el siglo XX con el hormigón armado, siendo muchos los ejemplos de estructuras con cables de acero que permiten llegar a luces de grandes dimensiones, lo que se ha aplicado especialmente en la ingeniería civil y más concretamente en los puentes colgantes (Fig. 5) (Rowland 1975).

Planteando un proceso equivalente al que hiciera Gaudí, pero disponiendo ahora arcos de gran tamaño flexibles (en lugar de rígidos) atirantados en posición vertical, se crea un nuevo tipo estructural cuyo referente son los arcos de flechas o arcos de violín (Fig. 6).

La nueva invención para la Arquitectura del s.XXI patentada recientemente (Adell 2003), parte de la posibilidad de emplear arcos atirantados con materiales de acero o más elásticos, que admiten tracciones, y que logran con la variación de las tensiones del tirante, la consiguiente variación de las formas de los Arcos, consiguiendo así poder restablecer un nuevo equilibrio en donde intervenga además la acción del viento en cada momento (Fig. 7).

Se requerirán al menos dos arcos contrapuestos entre sí para poder ensayar el efecto de equilibrio de las acciones en un mismo plano de dichos arcos atirantados verticales, si bien los tirantes podrán disponerse en el interior, exterior o en la diagonal (Fig. 8).

3. El nuevo tipo estructural inteligente aplicado a la Copa-Torre Mirador

Desde un punto de vista estructural, el hecho de asociar el diseño de un edificio del tamaño de un rascacielos a las características de una Copa, es algo que no tiene precedentes, y la consecuencia inmediata de este cambio de escala, manteniendo la forma y proporción de una Copa, da como resultado un edificio muy sensible a la acción horizontal del viento al tener la mayor masa en su parte superior.

La invención parte del conocimiento del Arco y su evolución como elemento constructivo hasta despuntar con una técnica innovadora, al aplicarlo a las estructuras con materiales actuales y con tecnología inteligente.

Bajo este planteamiento novedoso de arcos atirantados, y aplicándolo en sentido vertical en la Copa-Torre Madrid 2012, disponiendo como mínimo tres arcos atirantados contrapuestos girados 120° entre sí, se crea un nuevo tipo estructural que actúa inteligentemente frente a la variable acción horizontal del viento, que incide sobre el vaso de la Copa-Torre, pudiendo reequilibrar en cada instante los movimientos que dicha acción ejerce, incorporando una centralita de tensado que actúe sobre los tirantes en tiempo real, al igual que ya ocurre con los sistemas de frenado, tipo ABS, ampliamente aplicados en los automóviles (Fig. 9).

La constante actuación sobre los tirantes autotensables que la invención propone, como reacción a la acción del viento, permite variar la curvatura de los arcos que sustentan la Torre, logrando con ello crear esfuerzos contrapuestos al viento, capaces de inmovilizar al instante la Torre en el espacio, cualquiera que sea el valor de la acción horizontal del viento, así como cualquiera que sea la dirección o sentido que tenga, al disponer varios arcos.

Gracias a la colaboración del Instituto Eduardo Torroja, se está preparando un programa de ensayos específico para experimentar en laboratorio el efecto de esta nueva invención de arcos verticales atirantados y autotensables, para llevarla a la práctica con toda seguridad y fiabilidad (Fig. 10).

Esta **estructura inteligente** de la Torre, que por primera vez en el mundo se presenta en esta obra, permitirá construir el vaso del mirador-restaurante giratorio (y pebetero olímpico, si se adjudican las olimpiadas de 2012 a Madrid), sobre el pie tripartito más esbelto posible, gracias a esta nueva técnica de arcos verticales atirantados y autotensables (Fig. 11).

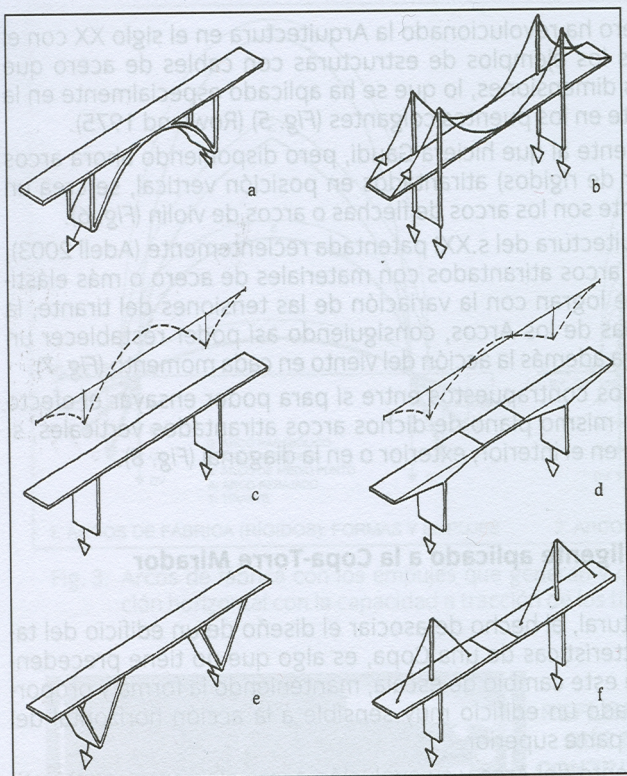
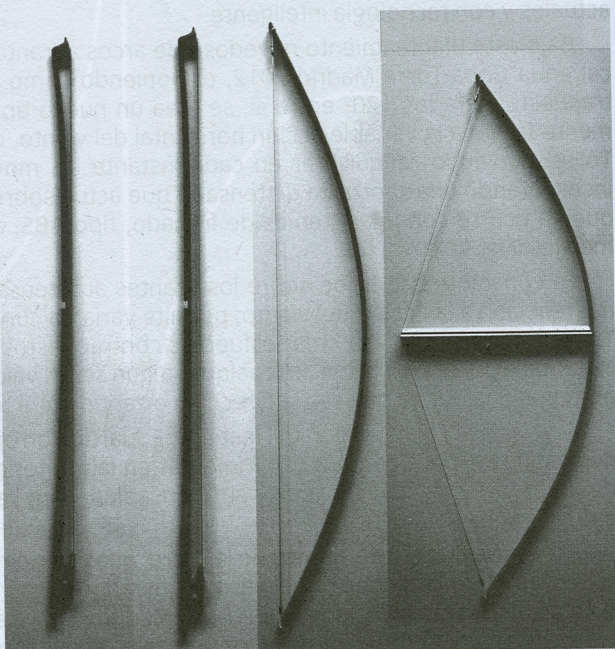


Fig. 5. Diagrama de los principales tipos de puentes en donde las flechas indican la dirección de las acciones ejercidas sobre el terreno, según Rowland J. Mainstone.

Fig. 6. Fotografías comparativas entre sí de arcos de flecha y de violín atirantados, con la variación de sus formas a partir de modificar las tensiones de los tirantes.



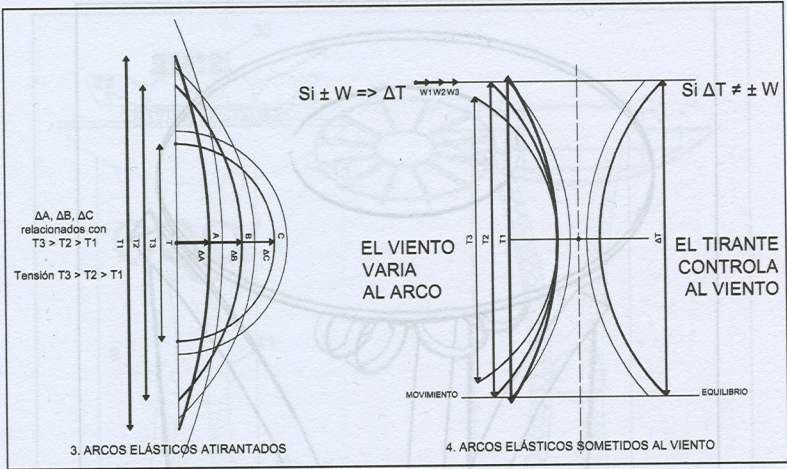


Fig.7. Cambios de la forma de la directriz del arco, por variación de la longitud (o tensión) de los tirantes en arcos elásticos atirantados, aplicable a la variación de la forma por el esfuerzo de la acción del viento.

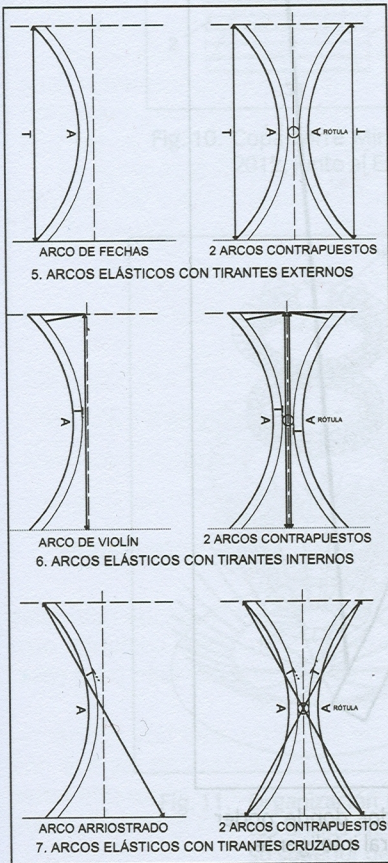


Fig.8. Equilibrio por contraposición de arcos elásticos flexibles (2 mínimo), dispuestos verticalmente. Aplicable a la estructura de un rascacielos con los tirantes autotensables exteriores, interiores o diagonales al edificio.

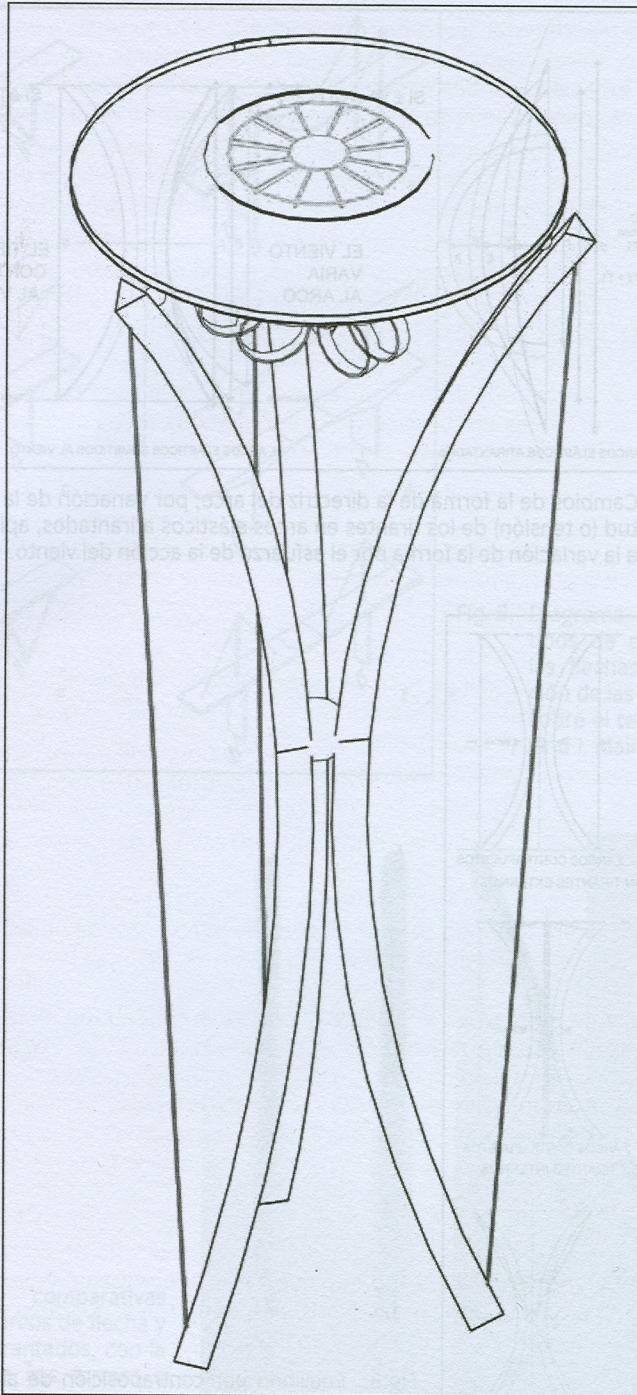


Fig.9. Volumetría de la Copa-Torre Mirador donde poder experimentar el nuevo tipo estructural inteligente.

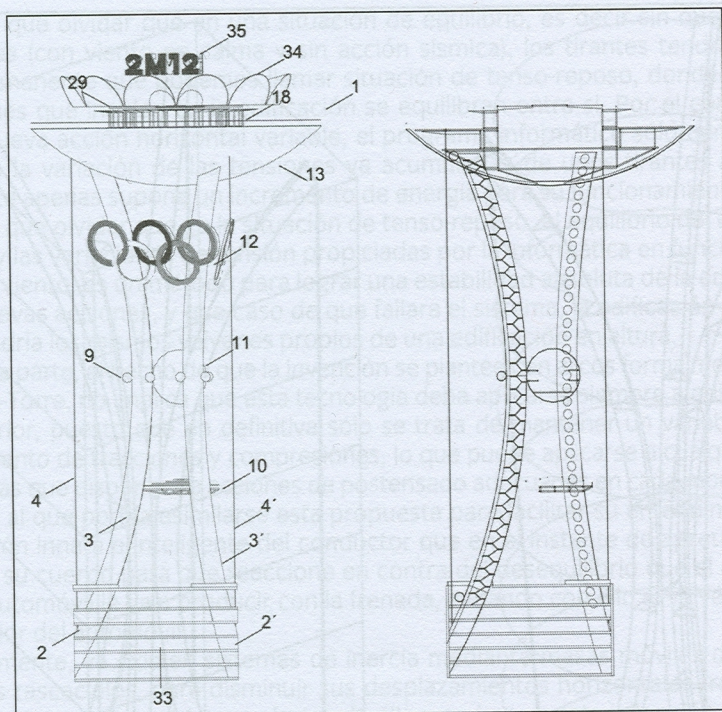


Fig. 10. Copa-Torre Mirador propuesta para las olimpiadas de Madrid 2012, junto al Estadio Bernabeu.

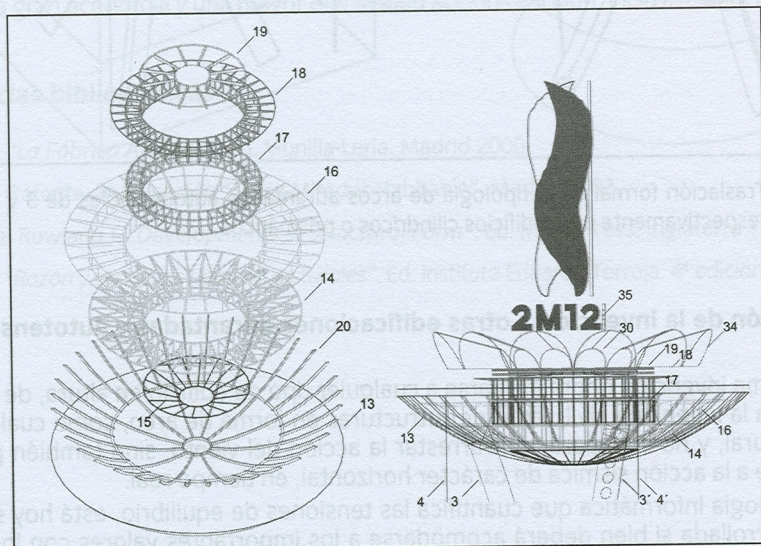


Fig. 11. Organización interna de la Copa-Torre Mirador con los distintos anillos fijos y giratorios, del restaurante existente en el vaso superior del edificio.

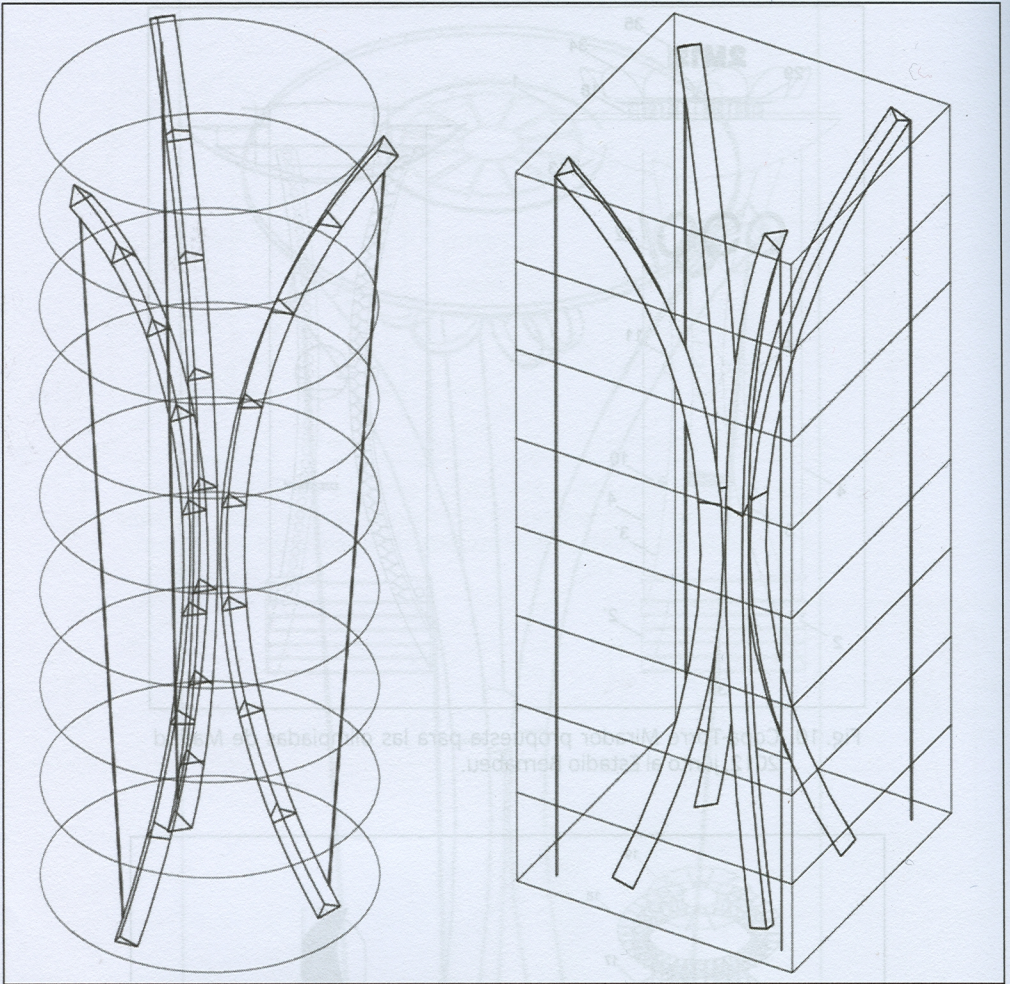


Fig. 12. Traslación formal de la tipología de arcos atirantados autotensables de 3 y 4 arcos respectivamente para edificios cilíndricos o prismáticos.

4. Aplicación de la invención a otras edificaciones atirantadas y autotensables

Esta misma invención podrá aplicarse a cualquier tipo de edificio en altura, de tipologías variables o a la ingeniería civil, tanto de estructuras en forma de arco, como cualquier otro tipo estructural, y no sólo para contrarrestar la acción del viento, sino también para reaccionar frente a la acción sísmica de carácter horizontal, en tiempo real.

La tecnología informática que cuantifica las tensiones de equilibrio, está hoy suficientemente desarrollada si bien deberá acomodarse a los importantes valores con los que nos enfrentamos en la edificación, lo que por otra parte no tiene más inconveniente que tener que aumentar el caudal del aceite de los gatos de los tirante tensados, ó el voltaje de los motores eléctricos que puedan emplearse.

No hay que olvidar que en una situación de equilibrio, es decir sin que haya acciones horizontales (con viento en calma y sin acción sísmica), los tirantes tendrán una tensión propia permanente que podemos llamar situación de tenso-reposo, donde el conjunto de las tensiones que inciden en la edificación se equilibran entre sí. Por el contrario, cuando incida la nueva acción horizontal variable, el programa informático sólo tiene que dirigir la gestión de la variación de las tensiones ya acumuladas de unos tirantes a otros, lo que inicialmente apenas supone un incremento de energía para su funcionamiento.

No hay que olvidar que en la situación de tenso-reposo, el equilibrio del edificio está garantizado y las variaciones de tensión propiciadas por la informática en función de las variaciones del viento, es un método para lograr una estabilidad absoluta de la edificación frente a estas nuevas acciones, y que caso de que fallara el sistema, la edificación correspondiente sólo tendría los mismos vaivenes propios de una edificación en altura.

Por otra parte, el hecho de que la invención se plantee con arcos formalmente expresados en la Copa-Torre, no implica que esta tecnología deba aplicarse siempre a edificios con arcos en su interior, puesto que en definitiva sólo se trata de mantener un variable equilibrio en cada momento de tracciones y compresiones, lo que puede aplicarse a cualquier tipo estructural sin más que disponer de acciones de postensado adecuadas en cada momento.

El símil al que podría asimilarse esta propuesta para facilitar su entendimiento, equivale a la reacción innata e inteligente del conductor que en el instante de apretar el freno, predispone a su cuerpo para que reaccione en contra del desequilibrio que el cambio de inercia en el automóvil le va a producir con la frenada, evitando con ello el vaivén de la persona en el interior del automóvil.

Actualmente, ya existen sistemas de inercia mediante masas móviles dispuestas en lo alto de los rascacielos, para disminuir sus desplazamientos horizontales frente a la acción del viento. Una variante más económica de ello y en base a esta invención, podría hacerse con masas a nivel de cimentación colgando de los tirantes autotensables.

La nueva invención, sin embargo, prescinde de estas masas con los tirantes autotensables guiados por un programa informatizado junto a una central de presión hidráulica, pudiendo lograr una gran economía y una mayor efectividad acción-reacción, inclusive ante el seísmo.

Referencias bibliográficas

- Adell, J.M. "La Fábrica Armada". Ed. Munilla-Lería. Madrid 2000.
- Adell, J.M. Patente de Invención "Torre-Mirador Habitable". Madrid 2003.
- Mainstone, Rowland J. "Developments in Structural Form". Ed. M.I.T. Press. Inglaterra 1975.
- Torroja, E. "Razón y ser de los tipos estructurales". Ed. Instituto Eduardo Torroja. 4ª edición. Madrid 1976.

ABSTRACT

The Structural behavior of slabs has been widely studied by many engineers and researchers. However, many phenomena are not well understood yet. Great effort has been made in the field of numerical simulations, especially because they can now reduce with great accuracy these structures. This research team has made many contributions based on the finite element method. It has develop