

El atrio como estrategia estructural en nuevos rascacielos que renuncian a la verticalidad: casos de estudio

The atrium as structural strategy in new skyscrapers which decline the verticality: case studies

M. Cámara^(*), V. Compán^(*), J. Sánchez^(*)

RESUMEN

En la última década, ha venido emergiendo un nuevo tipo de edificio en altura. Se trata de rascacielos inclinados u ondulados que, desafiando toda la lógica edificatoria que supone la conservación de la verticalidad, se convierten en auténticos hitos e iconos arquitectónicos. El reconocimiento de este último aspecto está conduciendo a la emergencia de varias representaciones de este tipo respaldadas por algunos de los estudios de arquitectura más influyentes del panorama internacional.

Pero, ¿vienen estas actuaciones acompañadas de nuevos conceptos o estrategias estructurales o de diseño que respondan a la singularidad que las caracteriza? Se analiza aquí la solución estructural de dos ejemplos para identificar aquellas aportaciones de carácter estructural/arquitectónico que apuntan a servir de base para el desarrollo del tipo. Reconociéndose la utilización del atrio como una de ellas, se lleva a cabo una evaluación basada en modelos de su influencia en el comportamiento estructural de torres inclinadas.

405-8

Palabras clave: Rascacielos; torre inclinada; torre *Capital Gate*; torres Dubai; atrio.

SUMMARY

In the last decade, a new type of high rise building has been emerging. They are leaning or undulating skyscrapers which become real architectural icons by defying the building logic that the preservation of the vertical line implies. The acceptance of this last aspect is making emerge several works of this kind signed by some of the most influential architectural firms in the world.

But, do these new involve works new structural concepts or strategies that answer to their singular characters? Here, the structural solution of two examples is analyzed to identify those contributions with a structural/architectural nature that could become a base for the development of this type. The use of the atrium is recognized as one of them. An assessment based on models of its influence on the structural behavior of leaning towers is carried out.

Keywords: Skyscraper; leaning tower; *Capital Gate Tower*; Dubai Towers; atrium.

^(*) Universidad de Sevilla, (España).

Persona de contacto/Corresponding author: mcamara@us.es (M. Cámara)

1. Torres Puerta de Europa en Madrid (1989-1996), de Philip Johnson. Con una inclinación de 15° sobre la vertical, alcanzan una altura de 114 m.

1. INTRODUCCIÓN

El siglo XX fue clave para el desarrollo de la tipología de edificio en altura. Se trata de un desarrollo marcado por la búsqueda de mayores prestaciones traducidas, fundamentalmente, en el mayor aprovechamiento de un mismo paquete de suelo. Así, el desafío que ha hecho evolucionar esta tipología ha venido marcado por la consecución de edificios cada vez más altos y más esbeltos. En este proceso, han jugado un papel fundamental las incorporaciones de nuevos materiales, como el acero y los hormigones de alta resistencia, de nuevas técnicas como el postesado y, sobre todo, de nuevos conceptos estructurales entre los que destacan aquéllos derivados del tubo estructural, de Fazlur Khan y Myron Goldsmith, concepto que marcó un antes y un después en el desarrollo de esta tipología.

Sin embargo, en el nuevo milenio, se viene alcanzando un estado en el que el edificio en altura intenta conferirse de un carácter distintivo que lo haga destacar entre otros edificios semejantes y/o entre los de su entorno y, en este contexto, destacamos aquéllos que optan por desafiar las leyes físicas más elementales, retando a la propia ley de la gravedad. Es aquí donde ubicamos a las nuevas torres inclinadas.

Existen torres que, por diversas circunstancias, han ido perdiendo su verticalidad inicial. Algunas de ellas no han logrado mantenerse en pie porque el propio aumento del deterioro ocasionado por las acciones añadidas han causado su derrumbe, como la Torre original de San Marcos en Venecia. En otras ocasiones, son las propias administraciones las que deciden demolerlas por considerarlas un peligro inminente, como fue el caso de la Torre Nueva de Zaragoza. Otras, en cambio, las que sobreviven a su situación, con o sin la ayuda de nuevas tecnologías,

se convierten en auténticos iconos arquitectónicos de las localidades donde se ubican, como la Torre de Pisa, con 3,97 grados de inclinación o la Torre de Suurhausen, en Alemania, con 5,07 grados de inclinación.

Por otro lado, con una inclinación intencionada, se presenta la torre del Estadio Olímpico de Montreal. Se trata de una torre de 175 m de altura cuya inclinación de 45 grados la convierte en el elemento insignia del conjunto. Es un elemento a caballo entre lo civil y lo arquitectónico ya que, aunque no es totalmente habitable en su interior, cuenta con un cuerpo de grandes dimensiones cuya cabeza avanza para sostener la cubierta del propio estadio, quedando así la inclinación de la torre justificada desde un punto de vista funcional. Asimismo, como precedente de rascacielos contruidos de inclinación intencionada, destacar las Torres Puerta de Europa de Madrid (Figura 1), con una inclinación justificada, en este caso, desde motivos estéticos/urbanísticos.

En los contextos urbanos actuales, incluido cualquier *skyline*, la singularidad de una torre que renuncia a la verticalidad está garantizada. Todo lo anterior está conduciendo a la emergencia en la última década de varias propuestas arquitectónicas en las que, intencionadamente, el edificio en altura se inclina o incluso se ondula.

Este documento trata, por un lado, de determinar si este tipo de edificaciones en altura, partiendo de las actualmente construidas o en proceso de construcción, vienen acompañadas de nuevos conceptos estructurales o de nuevas estrategias de diseño que respondan específicamente a la inclinación u ondulación de rascacielos.

Así, se trata la situación a la que deben enfrentarse estas torres desde un punto de vista estructural y se analizan a modo de precedente las realizaciones llevadas a cabo en las Torres Puerta de Europa de Madrid, como primeros rascacielos contruidos de inclinación intencionada.

A continuación, se procede al estudio de dos casos actuales: la torre inclinada *The Capital Gate Tower*, de RMJM y las *Dubai Towers*, de TVSA, de forma sinuosa.

El atrio está presente en los casos estudiados. Se trata de un elemento arquitectónico que ha sido empleado en algunos de los edificios en altura verticales más emblemáticos de los últimos 20 años y valorado en ellos desde puntos de vista como el ambiental y el sostenible. Ahora este elemento arquitectónico está siendo utilizado como estrategia estructural para incidir



1

sobre el momento de vuelco en rascacielos que renuncian a la verticalidad. A partir de lo anterior, se realiza por otro lado una evaluación basada en modelos de la influencia de este elemento en el comportamiento estructural de una torre inclinada.

1.1. La pérdida o la renuncia a la verticalidad y el momento de vuelco

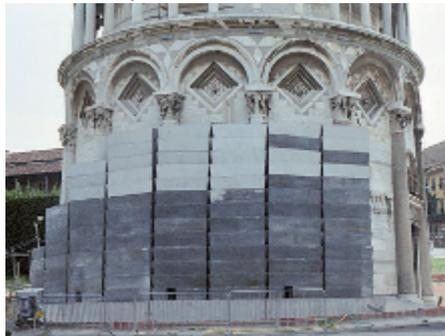
La accidentalidad de la causa que ha dado lugar a la inclinación de torres como la de Pisa, es precisamente el aspecto donde radica la principal diferencia con las torres inclinadas enmarcadas en el contexto actual. Ambos grupos contienen torres cuya pérdida de verticalidad las distingue del resto pero, mientras que en las primeras la inclinación es producto de factores externos no considerados en las fases anteriores a su edificación, en las más recientes se reconoce desde un principio como estrategia de distinción dentro de la tipología de edificio en altura.

A pesar de esta diferencia principal, tanto las torres de inclinación accidental como las que se desvían de la vertical intencionadamente (inclinándose u ondulándose) han de resolver el momento de vuelco añadido. Para esto, las nuevas torres pueden partir de las posibilidades que ofrecen distintas tipologías estructurales ensayadas de edificios en altura existentes. Pero, tratándose estas últimas de tipologías concebidas para torres verticales, puede ocurrir que no sean capaces de responder de un modo completamente satisfactorio al momento de vuelco añadido, por lo que también pueden acudir como referente a las distintas técnicas de rehabilitación y estabilización que han venido empleándose en las torres de inclinación accidental.

En relación con el primero de estos aspectos, se mantiene de partida la confianza en las denominadas megaestructuras para hacer frente al desafío que supone la edificación intencionada de este tipo de torres. Dentro de esto, vuelve a situarse en posición de ventaja el concepto tubular como punto de partida. En el caso de edificios en altura existe una especial confianza en las posibilidades de este concepto por haber supuesto una revolución en esta tipología edificatoria y haber sido capaz de dotar a la misma de una serie de prestaciones sin precedentes gracias a alguna de sus múltiples variantes. Desde sus primeras aplicaciones arquitectónicas en los años 60, ha dado respuesta a una proporción importante de los edificios en altura más emblemáticos por derivar en soluciones estructurales eficaces y económicas. Así, ante el planteamiento, más bien reto, de edificar intencionadamente torres inclinadas, es de partida uno

de los principales candidatos a ser utilizado como concepto estructural principal.

Por otro lado, en cuanto a las técnicas que ya han sido y son planteadas o incluso empleadas en la estabilización de torres de inclinación accidental, destaca la utilización de lastres que compensen el momento de vuelco. El planteamiento de lastres como el de 600 toneladas que fue dispuesto en la Torre de Pisa en 1993 sobre su cara norte, y que consiguió reducir el momento de vuelco en un 10% (1) (Figura 2), está vinculado al que, según se verá más adelante, fuera utilizado en las Torres Puerta de Europa de Madrid como instrumento para combatir la misma acción.



2

En una torre sometida a un momento de vuelco adicional, es la cimentación el elemento principalmente encargado de resistirlo. Sin embargo, no es el único elemento a cuidar. Ya se ha citado la importación del principio tubular como punto de partida para la resolución de las estructuras de las nuevas torres inclinadas. Se trata de un concepto maduro en edificios en altura verticales, pero su extrapolación a edificios en altura sometidos a momentos de vuelco adicionales derivados de formas excéntricas no es inmediata, puesto que el trabajo del conjunto es distinto en ambos casos.

En un edificio en altura vertical, la acción principal a tener en cuenta es la acción del viento, que da lugar a momentos de flexión que han de ser resistidos por el sistema estructural correspondiente. En este sistema, la carga gravitatoria resulta favorable actuando en conjunción con el viento por tener una acción centradora del momento que éste provoca y, es desde el planteamiento de cómo resistir más eficazmente esta acción principal, desde el que nace un concepto de tubo que se desarrollará más tarde según distintas variantes. Por otro lado, en una torre que no sigue la vertical, el principal aspecto a tener en cuenta es el momento de vuelco que implica la propia forma. En este punto, la carga gravitatoria es todo menos favorable, ya que participa directamente en el valor de dicho momento de vuelco. Obviamente, el viento sigue incidiendo sobre el edificio y sería especial-

2. Lastre de plomo sobre la base de la cara norte de la Torre de Pisa. Actuación de 1993 para garantizar una estabilidad que no se conseguiría hasta 2008, tras la retirada de unas 70 toneladas de suelo bajo la parte norte de la torre (1).

3. Torres Puerta de Europa. Sistema de postesado vertical.

mente preocupante actuando en la dirección en la que aparezcan excentricidades, ya que colaboraría en el incremento de la acción principal a resistir. Sin embargo, es tal la rigidez que un edificio de estas características ha de tener debido al momento de vuelco, que los elementos de la estructura encargados de aportar dicha rigidez serán diseñados y dispuestos para la resistencia del momento debido a excentricidades en primer término y, en un segundo término, serán dimensionados para resistir, además, la acción añadida del viento. La flexión producida por la acción del viento es variable por serlo también la propia acción. Sin embargo, el momento de vuelco derivado de la forma del edificio pasa a ser una acción permanente sobre la estructura.

Según lo anterior, y tal como se comprobará más adelante en los casos de estudio tratados, cobra importancia el concepto denominado "núcleo+outriggers" dentro de las variantes regidas según el principio tubular y ensayadas para edificios en altura verticales. Se trata de un concepto en el que el núcleo interior se encarga fundamentalmente de resistir el cortante, mientras una estructura perimetral exterior aporta eficacia frente al vuelco al contar con una mayor inercia global. Sin embargo, para que el funcionamiento de la estructura sea el descrito, ambos elementos deben tener un sistema de conexión que compagine deformaciones, ya que en caso contrario sería el núcleo el que se encargaría fundamentalmente de resistir flexión y cortante. Es aquí donde los elementos de conexión denominados *outriggers* hacen su aparición.

1.2. Precedente: las Torres Puerta de Europa

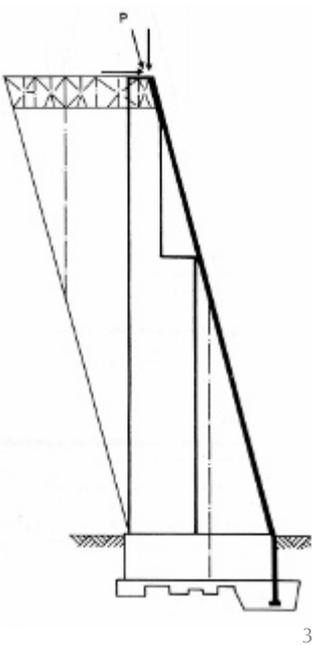
El equipo del norteamericano Leslie E. Robertson fue el encargado de diseñar la estructura de estas torres. Básicamente se optó por un tubo interior de hormigón escalonado que conserva la verticalidad y una estructura perimetral diagonalizada de acero, trabajando ambos conjuntamente gracias a los forjados de hormigón, que actúan a modo de diafragma. El descrito, es un sistema estructural que podría responder a los requerimientos de un edificio en altura vertical convencional, y se sirve de aspectos ampliamente implementados como la utilización de la estructura diagonalizada de acero de fachada para aportar la rigidez suficiente ante acciones horizontales.

Lo interesante en este caso es analizar, precisamente, las principales acciones llevadas a cabo para hacer válida la aplicación de un concepto estructural convencional en edificios en altura verticales a un edificio en altura inclinado.

- En primer lugar, existe una preocupación por reducir la carga gravitatoria y, de este modo, el momento de vuelco. Con este objeto, se emplea hormigón ligero para la conformación de forjados mixtos para las plantas destinadas a oficinas.
- Se utilizó un lastre de hormigón para colaborar frente a la acción del momento de vuelco. Consiste en un potente elemento de hormigón, con unas dimensiones de 60 m de largo, 10 m de ancho y otros 10 m de altura y un peso total de 15000 toneladas (2).
- Se recurrió a la técnica del postesado en aquellos puntos en los que se producen concentración de esfuerzos de tracción sobre elementos de hormigón. Así, se realizan dos postesados horizontales: uno a nivel de planta baja y otro en la planta 13. Sin embargo, el sistema de postesado principal es el vertical que se realiza en la fachada trasera. Está constituido por 24 torones con una longitud total de unos 135 m. En su extremo inferior está anclado al lastre de hormigón y en el superior a la coronación de la estructura metálica. Esta coronación, rígida, queda constituida por una serie de cerchas que, además de transmitir los esfuerzos de postesado, rigidizan las cabezas de los pilares (3) (Figura 3).
- Una cimentación profunda mediante pilotes, con una mayor capacidad para resistir el momento de vuelco sobre el edificio que una cimentación superficial.
- Se dispone en la base un muro a modo de diafragma. Este muro conforma el perímetro de la excavación y, además, se utiliza para formar el propio lastre de hormigón anteriormente mencionado (4).

Según lo descrito, puede observarse que el conjunto se concibe principalmente a partir de dos sistemas diferentes: por un lado, el sistema formado por la estructura exterior de acero trabajando en conjunción con el núcleo interior de hormigón y, por otro, el sistema de postesado trabajando con el lastre. Así, aunque son sistemas que funcionan en conjunción, no se aporta una solución estructural única que sea capaz de responder ante el momento de vuelco.

De este modo, se trata de un edificio en altura básicamente resuelto a partir de un concepto de tubo interior al que se añade un sistema que garantiza la estabilidad ante las acciones derivadas de la propia inclinación. Dentro de esto, destaca el hecho de haber acudido al concepto de tubo dentro de un rango de esbeltez inferior a 3. El edificio considerado cuenta con 27 plantas y una esbeltez de 2.3 y el principio tubular comienza a resultar adecuado en términos económicos para esbelteces a partir de valo-



res entre 3 y 4. Sin embargo, el empleo del concepto tubular descrito frente al de otras tipologías convencionalmente más propias para el rango tratado queda justificado en este caso por una mayor colaboración en la resistencia de las grandes flexiones a las que se somete al sistema debido a la inclinación particular.

A pesar del salto al empleo del concepto tubular con la altura y esbelteza manejadas, el sistema resultante, incluso ayudándose de una cimentación profunda, no logra ser lo suficientemente eficaz en la resistencia de las acciones añadidas por la inclinación como para prescindir de cualquier otro sistema complementario. En este punto, cobra sentido la utilización del lastre de hormigón y el sistema de postesado. Sin duda son técnicas adecuadas para enfrentarse a las acciones derivadas de la propia inclinación. Incluso destaca la actuación del sistema de postesado que, ejerciendo la correspondiente acción de compresión, reduce las solicitaciones que puedan conducir al cansancio y la fluencia del hormigón.

Existe una correspondencia directa con el recurso de utilizar lastres en la estabilización de torres de inclinación accidental, y se concluye que no se aprovecha la edificación de estas torres inclinadas para incorporar alguna innovación estructural que pueda, al menos, conducir al desarrollo posterior de un nuevo concepto capaz de responder por sí mismo a la totalidad de las acciones que genera este tipo de edificaciones, sino que se recurre a una conjunción de técnicas y sistemas ensayados que, adicionales, hagan posible su construcción.

2. CASO DE ESTUDIO: THE CAPITAL GATE TOWER

Recientemente concluida se encuentra *The Capital Gate Tower* en Abu Dhabi, de RMJM. Este edificio fue concebido desde un principio para cubrir el objetivo de entrar en el *Libro Guinness de los Records* como la torre más inclinada del mundo, cosa que consiguió (Figura 4).

El edificio, destinado a albergar oficinas y un hotel, posee 36 plantas y alcanza los 165 m de altura y su inclinación, de 18°, da lugar a que la cumbre se desplace respecto a la base de la fachada 33 m. La torre parte de una ascensión casi vertical, se inclina cuando ha recorrido aproximadamente un cuarto de su altura total y recupera la verticalidad cerca de su cumbre. Para resistir adecuadamente el momento de vuelco, se disponen 490 pilotes separados mínimamente y atados mediante una losa. Cuentan con una profundidad de unos 20 m,

en la zona hacia la que vuelan las plantas superiores, y 30 m en la zona opuesta. Se tratan estos últimos de pilotes inicialmente comprimidos durante el proceso constructivo que trabajan a tracción sometidos a la acción de vuelco (5).

En este caso, se opta por partir de la tipología de "núcleo+outrigger" para resolver la estructura del edificio, lo que supone partir de una tipología asociada a la resolución de edificios en altura convencionales dentro del mismo rango en cuanto al número de plantas y esbelteza. Sin embargo, un tubo interior de hormigón convencional no sería capaz de responder adecuadamente a las solicitaciones derivadas de la propia inclinación, por lo que se ejecutan sobre él dos acciones conducentes a que su comportamiento sea el adecuado. Por un lado, se postesa la cara del núcleo opuesta a la inclinación, con lo que se minimizan las tracciones sobre dicha cara. Por otro lado, se lleva a cabo un proceso de preinclinación, innovador en la tipología edificatoria de rascacielos. Consiste en inclinar ligeramente el núcleo en sentido opuesto a la inclinación que se proyecta para la torre de manera que, a medida que ésta va siendo cargada, va recuperando su verticalidad.

En este caso, el núcleo era construido a partir de ascensiones de 4 m, de modo que la sección superior se desviaba de la inferior 20 cm, generando así la preinclinación. Cada cuatro ascensiones se insertaban en el hormigón 36 tendones en vainas y se procedía al postesado (6).

Ambas técnicas, postesado y preinclinación, no habían sido contempladas en el proyecto original, sino que fueron el resultado de modificaciones posteriores, pero actualmente podrían considerarse como acciones principales sobre el principal elemento resistente. Sin embargo, el núcleo es el principal pero no es el único elemento resistente, ya que para soportar el peso de las distintas plantas, en vez de acudir a pilares convencionales, se dispone una piel estructural de acero que sigue el patrón de una malla *diagrid*. Recurrir a este tipo de malla tiene ventajas: la permisión de una mejor adaptación a la particular forma del edificio, un reparto más uniforme de las tensiones que aparecen sobre ella, el ahorro de material estructural y, por tanto, la reducción del peso propio de la estructura y del momento de vuelco.

Así, se reconoce una estructura perimetral trabajando en conjunción con el núcleo interior de hormigón (Figura 5), pero dicha piel no es suficiente en sí misma para soportar la carga de todas las plantas, ya

4. *The Capital Gate Tower*, en Abu Dhabi (2011), de RMJM.

5. *The Capital Gate Tower* durante su construcción. Núcleo de hormigón tras piel estructural de acero.



4



5

6. *The Capital Gate Tower*: Sección transversal. Esquema de cimentación. 1) Núcleo; 2) *Diagrid* de acero; 3) Viga para contrarrestar el vuelco; 4) Protección solar; 5) Hotel Hyatt; 6) Oficinas; 7) Atrio.

7. *Capital Gate Tower*. Imagen del atrio.

8. *Dubai Towers*, de TVSA (*Thompson, Ventulett, Stainback & Associates*), con la colaboración de *CDGi Engineers*.

que las superiores, al seguir la inclinación, vuelan demasiado desde el núcleo, por lo que se lleva a cabo una serie de acciones complementarias inmersas en el diseño de la propia torre con el doble objetivo de mejorar la transmisión de cargas al núcleo y de desviarlas de la inclinación, centrando la resultante.

Por un lado, encontramos la disposición de una serie de *megavigas* actuando como *outriggers*. Están ubicadas en el nivel 17 de la torre y conectan el núcleo y la *diagrid* exterior (5).

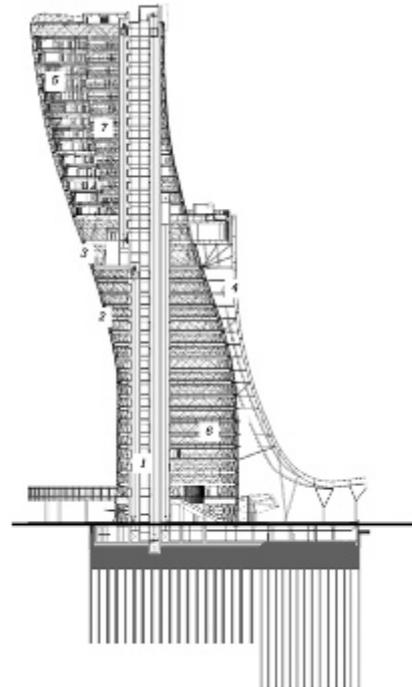
Por otro lado, se dispone un atrio de 60 m de altura formado por una malla *diagrid* independiente. Comienza en el nivel 19 y se extiende hasta la cumbre de la planta 33. Con él se consigue desviar la carga del saliente superior, centrándola, así como reducir su masa (Figuras 6 y 7).

La estrategia para combatir las acciones añadidas por la inclinación de esta torre es distinta a la empleada en las torres Puerta de Europa de Madrid. En ambos casos se parte de un concepto estructural con aplicación en múltiples representaciones arquitectónicas dentro de la tipología del edificio en altura vertical. Sin embargo, mientras que en las torres madrileñas la estrategia principal consistió en añadir un sistema complementario a la estructura propiamente dicha de cada una de las torres (se recuerda el sistema de postesado y el lastre de hormigón empleados), RMJM plantea acciones sobre el diseño del edificio (como el atrio) así como sobre los elementos propios del concepto estructural de partida. La estructura se diseña y se define con las particularidades en sus elementos conductores a ofrecer una respuesta adecuada a la situación específica que proporciona la inclinación. De este modo, no estamos ante un concepto estructural nuevo pero sí ante la incorporación de nuevos elementos de diseño empleados como estrategia estructural y ante una vuelta de tuerca más en la explotación de posibilidades y prestaciones que aún puede obtenerse de un concepto estructural tan maduro como el tubular.

3. CASO DE ESTUDIO: DUBAI TOWERS - TORRE 29

Esta misma línea de actuación engloba la estructura que se ha definido para las *Dubai Towers*, de TVSA (Figura 8). Su construcción comenzó a mediados de 2008 y está previsto que finalice en 2014.

Se trata de un proyecto que engloba cuatro torres de planta octogonal y forma sinuosa. Las torres aportan el carácter más expresivo



6



7



8

y se constituyen como pieza central del área conocida como *The Lagoons*, en Dubai, cuya construcción comenzó en 2006. Los centros de las distintas plantas se sitúan a lo largo de una curva sinuosa con una forma similar a la de una columna vertebral humana.

En la definición geométrica final de la torre destacamos, además, una reducción de la superficie en planta a medida que se asciende en altura (lenta en las plantas inferiores y más rápida en las superiores), y la rotación de factor constante de cada una de estas planta con respecto a la inmediatamente inferior. Consiste en una rotación de $0,74^\circ$ en cada nivel, de manera que se consiga una rotación de 90° total desde la base de la torre hasta su coronación (7).

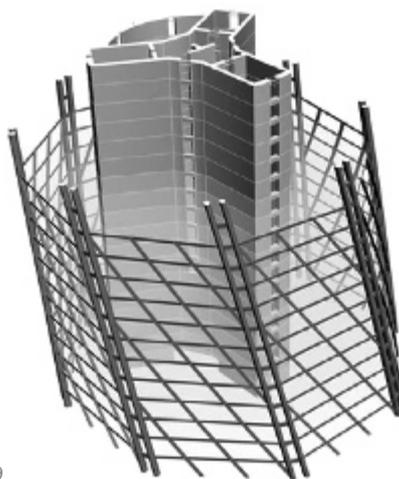
La altura de las distintas torres oscila entre los 360 m y los 550 m, correspondiendo esta última altura a la conocida como *Torre-29*, que será la analizada precisamente por alcanzar la máxima altura de las cuatro, acercando al límite la solución estructural empleada.

Mahjoub M. Elnimeiri es el principal responsable de la definición y análisis de la estructura de la Torre-29. Se trata de una estructura básicamente constituida por los siguientes elementos (Figura 9):

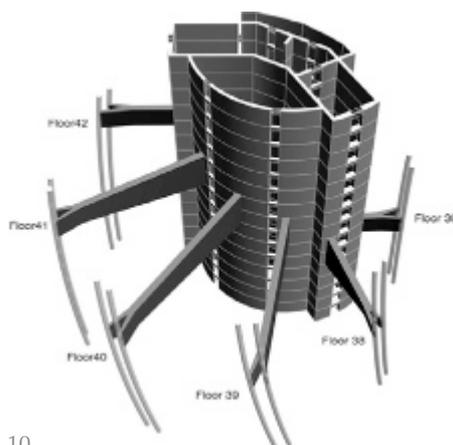
- Una estructura perimetral diagonalizada. Su definición parte de la disposición de ocho megapilares situados en los vértices de las distintas plantas octogonales de tal modo que, al seguir la rotación de las mismas, ascienden siguiendo una curva espacial. Para la formación de la estructura perimetral se cuenta además con una serie de barras inclinadas ascendiendo en continuidad que están separadas en vertical el equivalente a cuatro plantas. Además, el sistema está provisto de vigas horizontales a nivel de cada planta. Los megapilares, pareados, van revestidos de hormigón de alta resistencia, quedando conectados en cada planta de manera que se comporten como un único elemento.
- Un núcleo de hormigón armado que mantiene la verticalidad. Según asciende, el núcleo va desapareciendo a medida que la batería de ascensores va disminuyendo. Parte en la base como núcleo en forma de Y. En la reducción de superficie que sufre al ascender, llega a perder dos de los tres brazos que actúan a modo de contrafuertes.
- Dos sistemas *outrigger* de acero. El primero de ellos se sitúa en el nivel 63 y está incluido en una planta técnica. El segundo de ellos comprende de la planta 38 a la 42 y se trata de un sistema que asciende en espiral alrededor del núcleo (Figura 10).
- Una serie de pilares interiores de acero estructural destinados a recibir únicamente carga vertical.
- Los distintos forjados. Salvo en plantas singulares, se trata de forjados mixtos ejecutados con hormigón de densidad normal sobre entramado metálico.

Siendo los anteriores los principales constituyentes del sistema estructural global, se destaca el hecho de que todos son elementos o sistemas empleados en la resolución de estructuras de edificios que, conservando la verticalidad, alcanzan alturas similares a la que se destina para la Torre 29. El propio concepto estructural general podría identificarse como uno de los empleados en una serie de actuaciones desarrolladas a final de la década de los 90 en las que se partía del concepto de tubo interior y estructura perimetral de tal forma que esta última quedaba definida a partir de unos elementos principales a modo de megapilares y se recurría a la consideración de *outriggers* para aumentar la resistencia ante el momento de vuelco debido al viento. Nos referimos a torres como las Petronas (1997), en Kuala Lumpur, de César Pelli, o el *Jin Mao Building* de Shanghai (1998), de SOM.

Según lo descrito, puede comprobarse que no se introducen inicialmente componentes estructurales que específicamente respondan a la inclinación de la torre, sino que de nuevo se recurre a un concepto estructural ensayado para torres verticales de una envergadura similar y a sus sistemas asociados, cuyas capacidades se exprimen con objeto de hacerlos eficaces ante las singularidades de este caso.



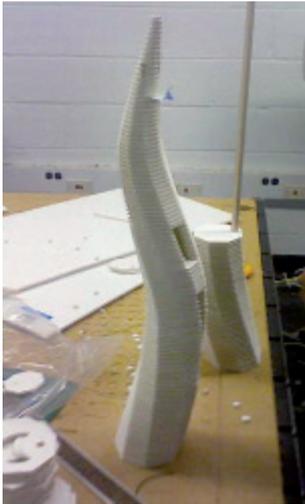
9



10

9. *Dubai Towers*. Torre 29. Elementos principales del sistema estructural.

10. *Dubai Towers*. Torre 29. Sistema *outrigger* de las plantas 38 a la 42.



11

11. *Dubai Towers*. Torre 29. Maqueta del diseño arquitectónico. En la imagen se aprecia el perfil de la torre y se intuye la disposición de los atrios.

12. *Dubai Towers*. Torre 29. Atrios

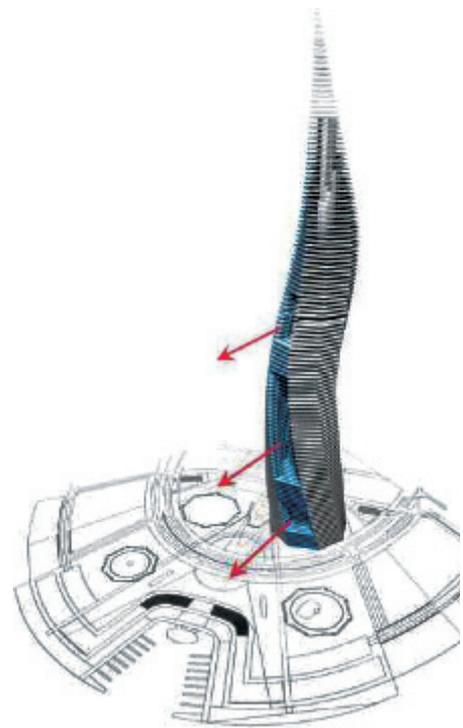
En este sentido, cobra interés la propia geometría del edificio por favorecer el hecho de poder partir de los mismos sistemas utilizados en edificios en altura verticales. El edificio se inclina desde el arranque siguiendo un perfil definido por una línea ondulada con dos curvaturas opuestas, tal y como se da en una columna vertebral humana. Esto da lugar a dos concentraciones de masas alejadas del núcleo vertical de hormigón, cada una a un lado del mismo, obteniéndose dos momentos de vuelco de sentido contrario. Estos momentos no se compensan totalmente, ya que la reducción de la superficie de planta a medida que se asciende da lugar a que el provocado por la masa bajo el punto de inflexión sea mayor que el provocado por la masa localizada sobre el mismo.

El propio diseño final del perfil de la torre es una de las acciones pasivas llevadas a cabo en este proyecto en el marco de la colaboración entre arquitectos e ingenieros y con un objetivo doble: conservar la idea arquitectónica inicial y favorecer un comportamiento estructural lo más próximo posible al convencional de un edificio en altura vertical de envergadura semejante.

Tres son las fases principales de generación de la forma final de este edificio. En primer lugar, se generan los que serán los ocho megapilares del tubo exterior asignándoles la forma de la línea base de doble curvatura. Seguidamente se procede al afilamiento de la cumbre de la torre y, por último, se retuerce el conjunto. A lo largo de todo el proceso se pasa así de pilares cuyos ejes están definidos por una línea plana de doble curvatura a otros definidos por una línea alabeada en el espacio. Se trata por tanto de una configuración nada favorable a efectos de pandeo para pilares metálicos, pero no sólo se cuenta con el atado de los restantes elementos que conforman el tubo exterior completo para reducir esta acción, sino con el confinamiento de cada una de las parejas de perfiles que forman parte de cada pilar en un hormigón de alta resistencia. La efectividad de esta solución frente al pandeo se incrementa.

Con el objeto de clarificar las ventajas y desventajas que la forma del edificio podía tener sobre la propia estructura, se ejecutó con anterioridad a la definición última de dicha forma una maqueta física (Figura 11) que llegó a ser útil en dos aspectos principalmente. En primer lugar, sirvió para consolidar el establecimiento de la segunda de las acciones pasivas llevadas a cabo para reducir el momento mayor de vuelco debido a la carga gravitatoria. Se trata de la disposición de tres atrios que aligeran

la masa bajo el punto de inflexión de la torre (Figura 12), acción análoga a la ya comentada para la *Capital Gate Tower*. Sin embargo, en este caso, los atrios se disponen adyacentes a la estructura perimetral en lugar de adosados al núcleo, con lo que no sólo se reduce la masa sino también la excentricidad que tan directamente participa en el valor del momento de vuelco debido a la inclinación. En segundo lugar, la ejecución de esta maqueta, capaz de mantenerse en pie por sí misma, colaboró en la formación de la idea de que el edificio presentaría una transmisión adecuada de las cargas gravitatorias a cimentación sin necesidad de componentes adicionales.



12

Es precisamente el recurso a estas acciones que hemos denominado pasivas el que caracteriza la estrategia seguida para resolver la estructura de un edificio de forma tan singular. Con ella se consigue en este caso dotar de representatividad y expresividad a un edificio en altura ondulado sin recurrir a nuevos conceptos o sistemas estructurales.

Así, estamos ante un ejemplo en el que la conjunción del diseño arquitectónico y el estructural da lugar finalmente a una estructura enmarcada dentro de conceptos estructurales ensayados que alcanza prestaciones mayores que sus precedentes gracias a la puesta en marcha de una serie de acciones desde el propio diseño del conjunto.

En cualquier caso, y habiéndose recurrido a los atrios también en el caso tratado anteriormente de la *Capital Gate Tower*, desta-

camos éste como posible elemento común dentro de los edificios que pretendan incluirse en esta tipología de torres inclinadas, no sólo por las ventajas descritas anteriormente, sino por ir en consonancia con la tendencia creciente de hacer sostenibles los edificios en altura, ya que son capaces de incrementar la entrada de iluminación y ventilación naturales y de crear espacios de expansión. Si bien es un recurso que, atendiendo precisamente a estos criterios sostenibles, ya fue empleado por Norman Foster en edificios como el *Commerzbank* de Frankfurt (1997) o la torre *Swiss Re* de Londres (2000), es en este tipo de edificios en altura inclinados donde encontramos una aplicación de dicho recurso en relación directa con la efectividad estructural que puede llegar a convertirse en elemento característico de los edificios de esta tipología.

4. EVALUACIÓN BASADA EN MODELOS DE LA INFLUENCIA DEL ATRIO EN RASCACIELOS INCLINADOS

Para la evaluación, a nivel comparativo, de la influencia de la existencia y ubicación del atrio en el comportamiento estructural de rascacielos inclinados, se han analizado estructuralmente cuatro modelos utilizando el Método de los Elementos Finitos.

4.1. Descripción de la configuración geométrica de los distintos modelos

Se han considerado cuatro modelos denominados Modelo A, Modelo B, Modelo C y Modelo *Capital Gate* (Modelo CG de aquí en adelante) (Figura 13).

Todos ellos están basados en la torre *Capital Gate* en los siguientes aspectos:

- Comparten un núcleo elíptico de dimensiones y geometría similar rigidizado mediante pantallas de hormigón.
- La misma altura total.
- Unas dimensiones similares en planta, contemplándose además que el desfase de las mismas respecto al núcleo sea igualmente similar a las de la torre *Capital Gate*.

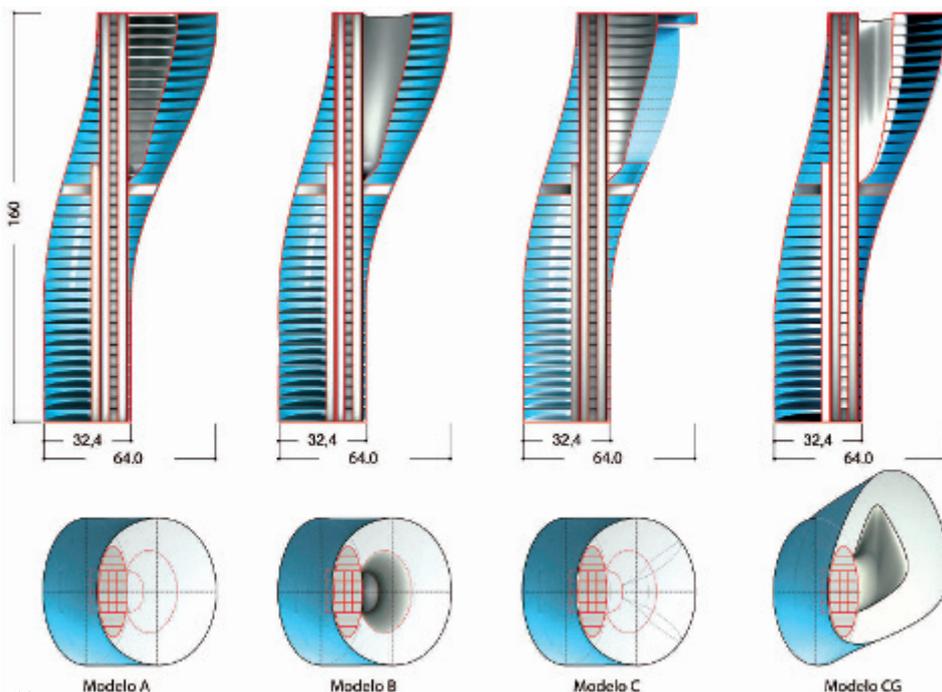
Los Modelos A, B y C mantienen una directa relación entre sí, ya que poseen la misma definición geométrica. Siendo similar a la generación de la torre *Capital Gate*, prescinden del giro a modo de espiral que presenta la estructura perimetral de esta última según asciende. Se plantean inclinadas según una dirección. Por su parte, el Modelo CG conserva dicho giro a modo de espiral.

Todos los modelos cuentan con una estructura perimetral conectada mediante elementos *outrigger* al núcleo en el nivel 17. Asimismo, todos cuentan con una superficie estructural interior con una configuración análoga a la *diagrid* que en la torre *Capital Gate* define el contorno del atrio.

La diferencia entre los Modelos A, B y C radica en que:

- El Modelo A se define sin atrio, es decir, los forjados de las plantas superiores no poseen huecos. Se mantiene la superficie estructural interior que en los modelos B, C y CG se corresponde con el contorno de los atrios. El objeto es que actúe de

13. Modelos analizados.



13

14. Deformada del modo 1 del Modelo CG.

apoyo intermedio en este caso para forjados de una luz que ronda los 30 m.

- El Modelo B es el que guarda, de entre éstos, más similitud con la torre *Capital Gate*, en cuanto a que se define con un atrio interior adosado al núcleo.
- El Modelo C cuenta con un atrio de un volumen similar al del Modelo B. Sin embargo, éste se ubica adosado al perímetro en vez de al núcleo. La definición de este último atrio se ha llevado a cabo cuidando que la masa total del Modelo C fuera similar a la del Modelo B, con objeto de realizar un análisis modal comparativo entre ambos, tal como se verá posteriormente. La distribución de masas y la rigidez varían en ambos casos únicamente lo que pueda afectar la diferente ubicación del atrio en cada uno de los modelos.

Por su parte, el Modelo CG posee un atrio con dimensiones y disposición similares a los de la torre *Capital Gate*.

La diferencia máxima entre las masas totales de los Modelos B y C y el Modelo CG es del 2% de la masa mayor. El Modelo A, no contando con el atrio, presenta una masa alrededor de un 4% mayor que los modelos restantes.

4.2. Bases de la evaluación

El objeto de la evaluación es determinar la influencia de la existencia o no de atrio en el comportamiento estructural de una torre inclinada y, dentro de dicha existencia, la influencia de una disposición del atrio adosado al núcleo o al perímetro exterior.

Para lo anterior, se realiza una comparación a tres a partir de los Modelos A, B y C: sin atrio y con atrio dispuesto adosado al núcleo y dispuesto adosado al perímetro respectivamente.

Por otra parte, para evaluar la influencia que en el comportamiento estructural de una torre inclinada puede suponer una forma para la superficie estructural perimetral que gire a modo de espiral según asciende (a partir de una configuración similar a la de la *diagrid* exterior de la Torre *Capital Gate*), se comparan los resultados de los análisis realizados sobre el Modelo B y sobre el Modelo CG, ambos con el atrio dispuesto adosado al núcleo.

Los distintos elementos que componen los sistemas principales han sido modelados a partir de elementos *shell*: núcleo, pantallas de rigidización del mismo, superficie estructural perimetral, superficie estructural interior de definición del atrio, elementos *outrigger* de conexión y los diferentes forjados.

Se evalúa el efecto del atrio desde los puntos de vista de tensiones, desplazamientos y cimentación. Asimismo, se realiza un estudio del comportamiento global de la estructura en los distintos casos a través de un análisis modal. Se trata de una evaluación cualitativa en la que sólo se ha tenido en cuenta la acción del peso propio sobre las distintas estructuras. Los análisis que se han llevado a cabo son elásticos y lineales y han sido efectuados con ABAQUS 6.9 v1 (8). La simplificación de las hipótesis de cálculo adoptadas implica que los valores obtenidos sean de comparación y no puedan ser considerados como característicos de la estructura del edificio.

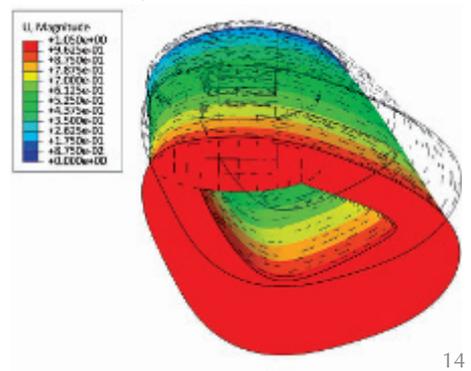
4.3. Análisis de resultados

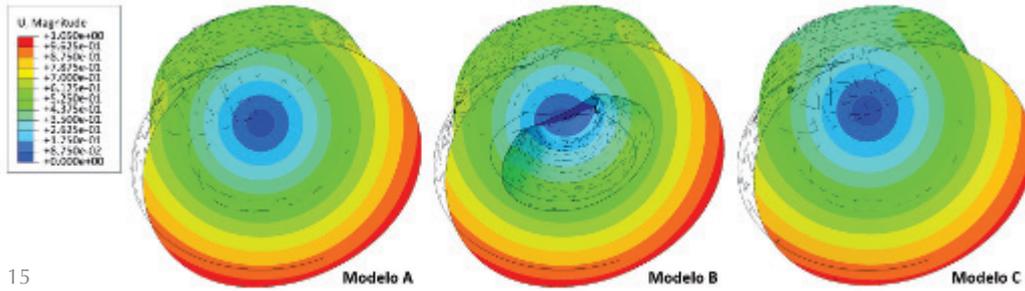
Análisis modal. Comportamiento dinámico

Habiendo analizado los primeros 20 modos de vibración, capaces de excitar una masa de más del 90% de la total, se reconocen los cinco primeros como los modos más significativos. Dentro de esto, se destaca:

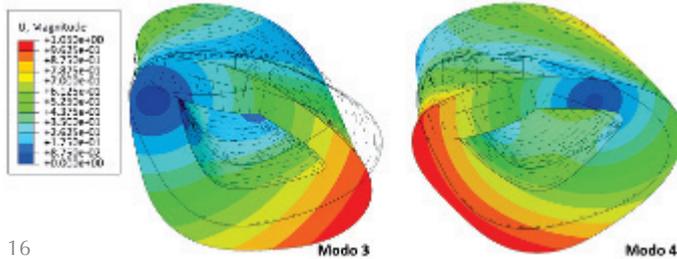
En los Modelos A, B y C, el primer y segundo modo de vibración es de flexión en la dirección de la inclinación y en la perpendicular respectivamente y puede comprobarse cómo la disposición excéntrica de las masas favorece la flexión en el plano de la inclinación. En el modelo CG, la flexión de los dos primeros modos es análoga a la de los modelos anteriores, con lo que se comprueba cómo una configuración del edificio rotando según asciende no implica una variación en la dirección de flexión en dicho modo (Figura 14).

El periodo correspondiente al primer modo está en torno a los 2 seg. en todos los modelos (con desviaciones máximas de 0,1 seg.). Las distintas configuraciones del edificio no hacen que el periodo sea sensiblemente mayor que el propio de edificios verticales de esbeltez similar (según lo obtenido en modelos complementarios), tal como podía preverse, ya que se trataría de estructuras con rigideces similares y masas igualmente similares dispuestas a la misma altura.





15



16

En los Modelos A, B y C, el tercer modo es de flexión con un punto de inflexión intermedio en la dirección de la inclinación; el cuarto modo es de torsión (con un periodo de 0,45 seg.) (Figura 15) y el quinto es análogo al tercero en la dirección perpendicular. Hasta el octavo modo de vibración,

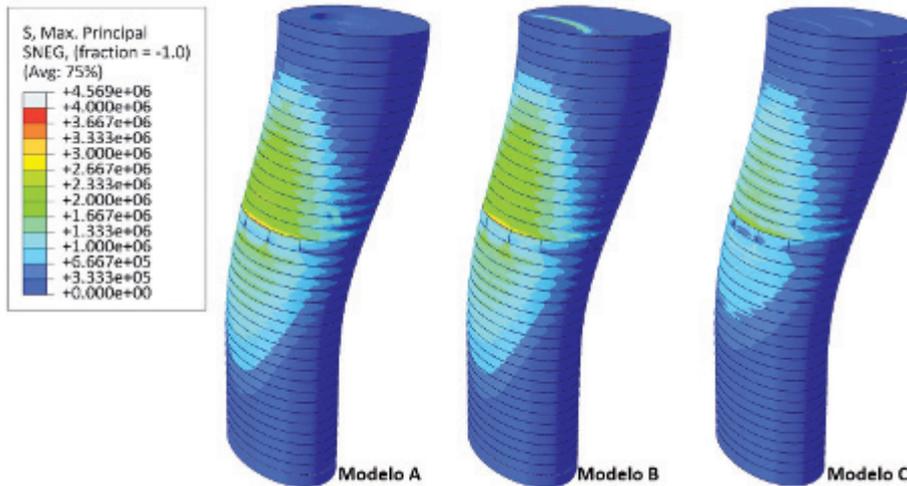
no vuelve a encontrarse torsión en estos modelos, ya con un periodo de 0,16 seg. Por otra parte, en el Modelo CG, ya encontramos como tercero un modo de torsión, aunque con un periodo muy similar al propio del primer modo de torsión de los modelos anteriores (en torno a los 0,5 seg).

15. Deformada del modo 4 de los Modelos A, B y C.

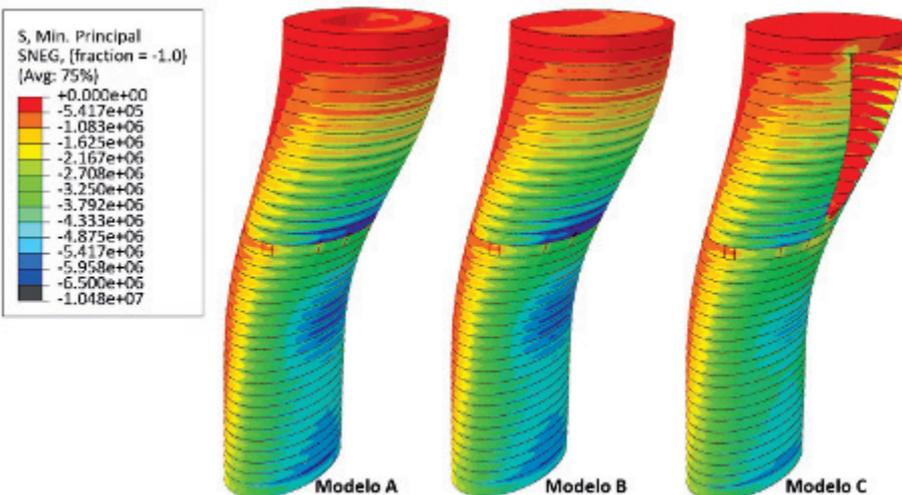
16. Deformada de los modos 3 y 4 del Modelo CG.

17. Tensiones principales de tracción sobre la estructura perimetral. Modelos A, B y C.

18. Tensiones principales de compresión sobre la estructura perimetral. Modelos A, B y C.



17



18

Sin embargo, observando el segundo modo de torsión, puede afirmarse que la singular forma del Modelo CG en rotación ascendente hace que éste sea más sensible a la torsión (Figura 16), ya que, en el Modelo CG, el segundo modo de torsión es el cuarto modo de vibración con un periodo en torno a los 0,5 seg (frente al periodo de 0,16 seg correspondiente al octavo modo de vibración en los modelos restantes).

Tensiones

Como primera aproximación, destacar que, a pesar de la apariencia de estos edificios, la posición del centro de masa de los cuatro modelos es muy próxima al eje vertical del núcleo de hormigón. De hecho, la mayor distancia en planta entre cualquiera de los centros de masa y el centro de la base dicho núcleo queda a un 33% de la dimensión máxima de su núcleo central. Este aspecto de diseño colabora en el control de las tracciones que puedan aparecer sobre el núcleo, algo fundamental por otro lado, ya que una sección fisurada conllevaría la reducción de la sección eficaz y la disminución de la rigidez de dicho núcleo.

Del análisis realizado, se obtiene que los núcleos están comprimidos en todos los modelos. Sin embargo, dicho análisis ha sido realizado teniendo en cuenta exclusivamente el peso propio y es de esperar que aparezcan tracciones debidas a la acción del viento que justifiquen el postesado con que cuenta la cara posterior del núcleo del edificio construido (5).

Las tracciones asociadas a la estructura perimetral (que equivaldría a la *diagrid* exterior) se localizan en la cara posterior de la superficie. Acudir a una configuración con el atrio dentro reduce en torno a un 5% las tracciones máximas obtenidas en el Modelo A, sin atrio. Esta reducción se hace más relevante con una disposición del atrio en el exterior (Modelo C), alcanzando un 35% (Figura 17). Por otro lado, comparando el Modelo B y el Modelo CG, ambos con el atrio dentro, comprobamos cómo la rotación ascendente de la piel de este último conlleva que la tracción máxima sea un 37% mayor que la del primero.

Por otra parte, en la estructura perimetral, la zona que más sufre a compresión es la de los riñones, bajo el volumen que avanza en la parte superior. En este sentido, disponer un atrio adosado al núcleo reduce un 6% el valor de la compresión máxima en esta zona respecto a una configuración sin atrio. Sin embargo, esta misma reducción se eleva al 20% si se dispone del atrio en el perímetro, ya que

libera de un modo más directo carga sobre dichos riñones (Figura 18). En relación con las tensiones de compresión del análisis del Modelo CG, resultan unas tensiones en los riñones un 17% mayor que las obtenidas analizando el Modelo B, también con atrio en el interior. De nuevo el avance del cuerpo superior rotando y terminando con una disposición casi diagonal respecto al núcleo penaliza las tensiones en la zona más castigada.

Cimentación

En relación con las reacciones obtenidas en cimentación, el análisis se ha centrado en detectar la existencia de reacciones que pudieran suponer elementos de cimentación trabajando a tracción. Según lo tratado anteriormente, los núcleos de todos los modelos analizados están comprimidos, por lo que obviamente no se dan este tipo de reacciones en sus bases. En cuanto a la base de la estructura perimetral, resulta destacable que tan sólo encontramos reacciones de este tipo en el Modelo CG. Torres inclinadas según configuraciones como las descritas para los Modelos A, B y C no provocan tracciones en cimentación a peso propio. En el análisis realizado sobre el Modelo CG, las reacciones que implicarían elementos de cimentación a tracción se presentan con unos valores muy bajos, valores que aumentarán con la introducción de acciones horizontales sobre la estructura. Esto apoya el hecho de que en la Torre *Capital Gate* construida existan pilotes trabajando a tracción, según lo expuesto anteriormente.

Desplazamientos

Realizados los distintos análisis, destaca el hecho de que la utilización del atrio puede llegar a reducir significativamente el desplazamiento horizontal máximo. Comparando los resultados obtenidos para los Modelos A, B y C, se comprueba que acudir a un atrio interior (Modelo B) reduce dicho desplazamiento en torno a un 10% respecto al obtenido en una configuración sin atrio (Modelo A). Por su parte, comparando el modelo sin atrio con el modelo con atrio exterior (Modelo C), se deduce que la misma reducción del desplazamiento horizontal máximo se incrementa hasta alcanzar un 23%.

Por otro lado, tras comparar el Modelo CG con el Modelo B, ambos con atrio interior, se obtiene que el modo en el que avanza el cuerpo superior en el primero de los modelos, da lugar a desplazamientos horizontales un 25% mayores a los obtenidos en el Modelo B.

5. TORRES QUE RESPALDAN LA TENDENCIA ARQUITECTÓNICA

Otros estudios influyentes del panorama arquitectónico internacional han incorporado rascacielos que pierden la verticalidad entre sus propuestas. Un ejemplo de esto queda representado por las *Signature Towers* (Figura 19), de Zaha Hadid. Se trata de un proyecto que, como otros muchos, se ha visto afectado por la situación económica actual y, a pesar de haber llegado incluso a tener fecha de finalización prevista, ha visto paralizadas tanto su definición última como, por tanto, su construcción. Estructuralmente, estas torres se plantean trabajando conjuntamente entre sí, apoyadas unas sobre otras, por lo que, a pesar de conservar una imagen que puede relacionarse con los ejemplos anteriormente expuestos no conservando la verticalidad, responden a un trabajo colaborativo en el que los parámetros estructurales a considerar se alejan de los descritos para las torres inclinadas que se presentan aisladas.

Algo similar ocurre con otras torres respaldadas por estudios de arquitectura tan influyentes como el de BIG, el de Daniel Libeskind o el de Dominique Perrault. Aunque en general se trata de ejemplos que no comparten los principios estructurales expuestos para rascacielos inclinados u ondulados aislados por acudir, por ejemplo, al trabajo colaborativo, participan en la inclinación u ondulación de edificios en altura como estrategia de distinción arquitectónica y suponen, en cualquier caso, un reflejo del interés que esta tendencia está suscitando en el panorama arquitectónico internacional.

REFERENCIAS

- (1) Burland, J.B.; Jamiolkowski, M.B.; Viggiani, C. (2009). Leaning Tower of Pisa: Behaviour after Stabilization Operations. *International Journal of Geoenvironmental Engineering. Case histories*. 1(3): 156-169.
- (2) Domínguez, T.; Martín, J.C.; Lizarbe, J.; Mateos, J.J. (1996). Las torres Puerta de Europa, Madrid-España. *Informes de la Construcción*. 48(444): 5-35, doi:10.3989/ic.1996.v48.i444.
- (3) Bofill de la Cierva, J.E.; Mateos, J. (1995). La estructura de las torres Puerta de Europa. *Hormigón y Acero*, 196(Segundo Trimestre): 103-112.
- (4) Kipnis, J. (1996). *Philip Johnson: recent work*. p.119, London Academy Editions.
- (5) Council of Tall Buildings and Urban Habitat. (2012). <http://www.ctbuh.org/TallBuildings/FeaturedTallBuildings/CapitalGateTowerAbuDhabi/tabid/3380/language/en-GB/Default.aspx>.
- (6) Lane, T. (2010). Twist and shout: RMJM's Abu Dhabi Capital Gate Tower. <http://www.building.co.uk/twist-and-shout-rmjm-s-abu-dhabi-capital-gate-tower/3157416.article>.
- (7) Elnimeiri, M. (2008). Dubai Tower 29, Structure and Form. *CTBUH 8th World Congress*. <http://ctbuh.org/LinkClick.aspx?fileticket=pYjuldbGfKA%3D&tabid=486&language=en-US/>.
- (8) DASSAULT SYSTEMES, SIMULIA, ABAQUS v.6.9-1.



19

19. Proyecto para las *Signature Towers*, en Dubai, por Zaha Hadid. Alcanzarán unas alturas de 358, 305 y 245 m.

6. CONCLUSIONES

En los nuevos rascacielos que renuncian a la verticalidad, no se recogen nuevos conceptos estructurales comparables a aquellos que surgieron a lo largo del siglo XX para los edificios en altura. La forma arquitectónica prevalece sobre la forma estructural. El concepto de "núcleo+outrigger" cobra importancia como concepto estructural base sobre el que se llevan a cabo acciones que puedan hacer edificables este tipo de propuestas.

Dentro de estas acciones, destaca la pasiva de disponer atrios, bien adosados al núcleo o al perímetro del edificio, por tratarse de un elemento arquitectónico utilizado como estrategia estructural. Se trata de una estrategia que, asociada a configuraciones con el atrio dispuesto adosado al perímetro del edificio, puede llegar a suponer reducciones significativas de desplazamientos máximos, y de tracciones y compresiones en la estructura perimetral.

* * *