

EVOLUCIÓN DE LOS EDIFICIOS EN ALTURA DESPUÉS DEL PERÍODO ICÓNICO

Análisis del desarrollo formal en la edificación en altura mediante la simulación fluidodinámica de la acción del viento (CFD)

Maria Cristina Modesto Monedero



Con la colaboración de Maximilian Tomac, Ingeniero Aeronáutico de la Universidad KTH de Estocolmo, en la simulación de viento por CFD (Computational Fluid Dynamics).

SUMARIO

Ante la decadencia actual del periodo icónico, originado por la crisis económica y financiera mundial, surgen nuevos planteamientos en la arquitectura en altura. Por un lado los nuevos rascacielos son más esbeltos, siendo más sensibles a la acción del viento. Por otro lado, pretenden presentar formas no convencionales, siguiendo principios socio culturales, que a la vez queden justificados funcionalmente.

El reto de la arquitectura en altura y el tema de esta tesina es abogar por la elección de una forma aerodinámica, que palie los efectos del viento. Esto se realiza mediante modelos en CFD, simulación fluidodinámica basada en métodos numéricos y algoritmos que resuelven la interacción del viento con las superficies sólidas de la arquitectura. En el capítulo 2, apartado 2.1 *Objetivo general* se recogen los objetivos a alcanzar.

Hasta ahora, los ensayos e investigaciones sobre la forma óptima a viento han sido desarrollados en base a resultados empíricos obtenidos del túnel de viento. En el capítulo 2, apartado 2.3 *Alcances y límites*, se comparan los dos métodos: CFD versus túnel de viento. En el momento actual, las ventajas que presenta la herramienta informática son destacables.

En el capítulo 3. *Historia*, se hace referencia al desarrollo de la forma aerodinámica a través de la historia y cómo ha devenido materia de estudio en los últimos cincuenta años, con la ayuda de los túneles de viento y, en la última década, con la aportación de análisis por CFD.

Esta tesina presupone en un futuro una sustitución del análisis del túnel de viento por simulaciones numéricas, sobretodo en la etapa del diseño, cuando se desarrolla la forma. El objetivo es una optimización estructural del rascacielos mediante la arquitectura pasiva del diseño formal que ofrezca mayor resistencia a viento.

Para llevar a cabo todo el estudio, se analizan los tres campos de interacción, esto es, Ingeniería, Aerodinámica y Arquitectura, correspondientes a los capítulos 4,5 y 6. En el capítulo 4. *Ingeniería* se presenta el cálculo dinámico y los sistemas y recursos estructurales empleados en los grandes rascacielos. En el capítulo 5. *Aerodinámica* se reconocen los fenómenos del viento que afectan especialmente la construcción y cuáles son las soluciones formales hasta ahora empleadas. En el capítulo 6. *Arquitectura* se citan las formas geométricas no ortodoxas, pertenecientes a la segunda generación de rascacielos. El futuro de la arquitectura en altura reside en una estrecha relación entre los tres campos para obtener el resultado óptimo.

El trabajo desarrollado en la presente tesina se ha centrado en la vinculación entre la *Arquitectura* y la *Aerodinámica*. Para ello se han analizado cinco edificios tipo de geometrías diferentes, de altura: 600metros y esbeltez 6, mediante el CFD. De los resultados extraídos, sería necesario contrastarlos con la respuesta de los últimos sistemas y recursos estructurales que se están empleando. Sin embargo, esta interacción con el campo de la *Ingeniería* no ha podido ser desarrollada en el tiempo estipulado, pendiente de realizarse en el futuro bajo el marco de una tesis doctoral.

En los capítulos 7. *Estado del arte* se citan los pocos documentos existentes sobre la aplicación del CFD en la arquitectura. En el capítulo 8. *Viabilidad del estudio*, muestra la potencia de la herramienta del CFD en la modelización del viento exterior para rascacielos, y cómo ésta, se encuentra en fase de investigación.

En el capítulo 9. *Metodología* se desarrolla el estudio de los cinco edificios llamados: cono, rotor, hiperboloide, prisma rectangular y prisma torsionado. Estos se analizan mediante el software EDGE 4.1.0 como pre-procesador y solucionador. Para el pos-procesador se recurre al programa informático PARAVIEW. El fluido se discretiza en elementos tetraédricos y prismáticos integrando una malla. Los cinco edificios son sometidos a una velocidad del viento constante en toda su altura de 15m/s, en un campo de actuación circular de radio 2000Km y a intensidades de turbulencias altas y bajas.

Mediante los coeficientes aerodinámicos se compara la efectividad aerodinámica de las figuras geométricas. También se extraen las fuerzas, momentos y frecuencias medias del fluido, ya que éstas varían con el tiempo. Se reconocen posibles fenómenos como el "vortex shedding" que pueden afectar a la integridad del edificio o ocasionar vibraciones molestas a los usuarios. En el apartado 9.4.1 *Cono*, se realiza el cálculo simplificado de la frecuencia propia que presenta un edificio de dimensiones similares. Este resultado es comparado con la frecuencia estimada del fluido, evaluándose el rango de posibilidades de alcanzar la frecuencia de resonancia.

Finalmente, en base a este estudio, se extraen una serie de conclusiones sobre la forma aerodinámica ideal para rascacielos de 600 metros de altura.

Esta tesina pretende marcar las pautas y las tendencias a seguir, gracias al soporte de las nuevas herramientas informáticas, en la arquitectura en altura después del periodo icónico.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN

2. OBJETIVOS A ALCANZAR

- 2.1 Objetivo general
- 2.2 Justificación
- 2.3 Alcances y límites

3.HISTORIA

- 3.1 Breve reseña histórica

4. INGENIERÍA

- 4.1 Características dinámicas de las estructuras
- 4.2 Estructuras empleadas en los rascacielos

5. AERODINÁMICA

- 5.1 Teoría
- 5.2 Modificaciones aerodinámicas en edificios
 - 5.2.1 Ejemplos
 - 5.2.2 Caso Burj Dubai

6. ARQUITECTURA

- 6.1 Geometría de los edificios en altura

7. ESTADO DEL ARTE

8. VIABILIDAD DEL ESTUDIO

9. METODOLOGÍA

- 9.1 Elementos a analizar
- 9.2 Casos
- 9.3 Métodos informáticos
 - 9.3.1 Software utilizado
 - 9.3.2 Malla numérica
 - 9.3.3 Condiciones de límite
- 9.4 Resultados
 - 9.4.1 Cono
 - 9.4.2 Rotor
 - 9.4.3 Hiperboloide
 - 9.4.4 Prisma rectangular
 - 9.4.5 Prisma torsionado
- 9.5 Comparación
- 9.6 Conclusiones

10. EPÍLOGO

11. NOTAS

12. BIBLIOGRAFÍA

TÍTULO: EVOLUCIÓN DE LOS EDIFICIOS EN ALTURA DESPUÉS DEL PERÍODO ICÓNICO

SUBTÍTULO: Análisis del desarrollo formal en la edificación en altura mediante la simulación fluidodinámica de la acción del viento (CFD)

1. INTRODUCCIÓN

Reflexionando en las construcciones llevadas a cabo en los últimos años, los intelectuales se aventuran a definir una nueva época, reconociéndola en la historia de la arquitectura, como el periodo icónico o simbólico. Marcando sus orígenes en la década de los 90 del siglo pasado y concluyendo gradualmente con la presente crisis económica y financiera mundial.

El desarrollo de la informática, utilizada en la concepción y producción del proyecto, como los avances tecnológicos en las estructuras y en los materiales de construcción, ha hecho posible una libertad, hasta ahora desconocida, en la arquitectura. Todo esto acompañado por el gran crecimiento financiero neoliberal que han experimentado algunos estados en las últimas décadas, ha ocasionado que exista un tipo de arquitectura sin ninguna limitación, ya sea del tipo económica, formal o constructiva.

Añadiendo a esto la revolución de las comunicaciones y la imagen que ha propiciado un conocimiento rápido y eficaz de lo que acontece en el mundo entero; la arquitectura sin excesivas limitaciones ha empezado a surgir casi simultáneamente en varios países.

El sentimiento de autoconciencia de las ciudades y naciones se ha afianzado y proyectado hacia el exterior por medio de la imagen. Los avances en las redes de comunicación permiten fácilmente “observar” y a la vez “ser observados”, de manera que los países tienden a exhibir sus arquitecturas al resto del mundo. La arquitectura ha pasado a transmitir un determinado mensaje semiótico (1) de prosperidad económica y desarrollo del país donde se ubica.

Estos edificios son símbolos de una era, donde la globalidad mundial es un hecho, y por tanto son similares entre ellos, a pesar de su distante emplazamiento.

Muchos, en su ansia de superar y competir, se elevan a grandes alturas, dando lugar a los altos rascacielos.



Fig. 1: Proyectos “icónicos”: Trump Tower en Dubai, Torre de Noida en Nueva Delhi, Shanghai Center Dragon en Shanghai

Pero el problema radica en la calidad de la arquitectura producida, la cual peca de demasiado icónica y poco específica. Jeanne Gang, arquitecta y profesora del Instituto de Tecnología de Illinois, Chicago, analiza el problema formal de los grandes rascacielos: “El diseño carece de fundamento, se encuentra en una fase ecléctica, donde todo sirve como referente, mientras se convierte en un símbolo” (2). Efectivamente, los edificios icónicos llevan una connotación implícita formal de otros objetos, sin importar los criterios auténticos que definen la buena arquitectura. Esto es, según Howler (3): considerar el sitio específico, la respuesta ambiental, el modelo de coste, las herramientas de construcción, la tecnología y las ideas contemporáneas que den respuesta a las necesidades de la arquitectura.

Georges Binder (4) subdividió la historia de los rascacielos en tres grandes grupos cronológicos. Cada periodo finaliza coincidiendo con una crisis económica. El primer boom de los rascacielos finalizó en los inicios de los años 30 cuando se construyeron el “Chrysler Building” y el “Empire State Building”, justo después de “la depresión del 29”. El siguiente apogeo en la construcción de edificios altos se llevó a cabo a principios de los años 70 con la ejecución del “World Trade Center” de Nueva York y las “Sears Towers” de Chicago. Y se terminaron una vez empezada la llamada “Crisis del petróleo”. El tercer grupo cronológico de rascacielos se erigió en los años 90 hasta la fecha actual, coincidiendo con la presente crisis americana que ha afectado al resto de la economía mundial. Este grupo de rascacielos pertenece, según varios intelectuales, por sus connotaciones al periodo icónico o simbólico.

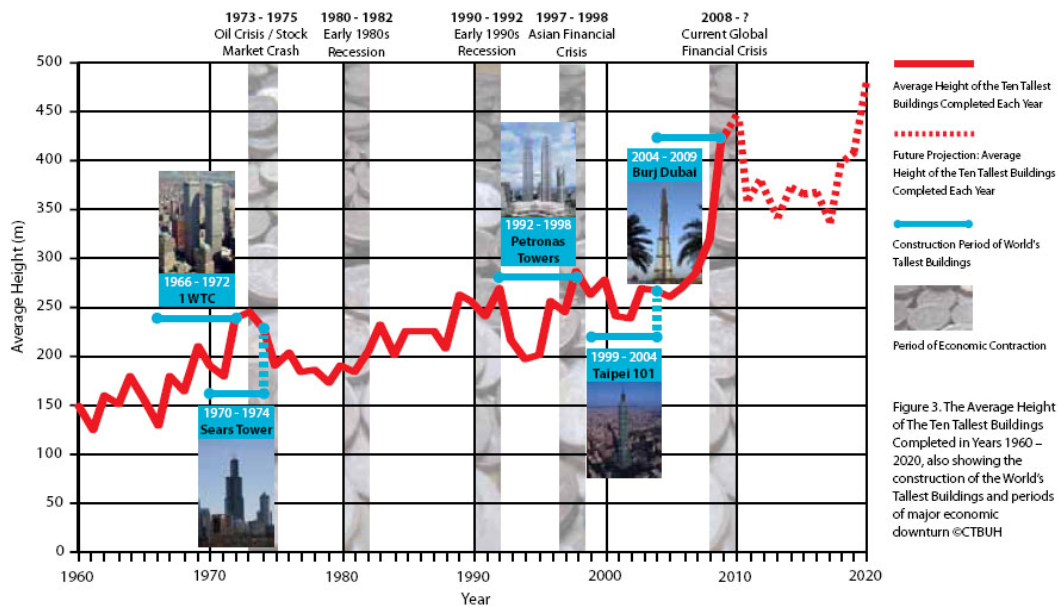


Fig. 2: Esquema cronológico sobre la edificación en altura

El periodo icónico, en cuanto a edificios en altura se refiere, tiene su inicio con la construcción de las Torres Petronas en Kuala Lumpur, Malasia, en 1998. El economista Andrew Lawrence demostró como casi todos los edificios más altos del mundo a lo largo de la historia han alcanzado su fecha de término al comienzo de una recesión económica. Y así, parece suceder con las obras arquitectónicas más altas actuales. Entre ellas el esbelto Burj Dubai que a pesar de encontrarse todavía en fase de construcción, alcanzó su altura máxima el pasado mes de enero con 818 metros, en plena crisis económica mundial.

Las nuevas potencias emergentes de Asia y Oriente Medio son las que han llevado a cabo más rascacielos en los últimos diez años. Philip Oldfield y Anthony Wood prevén un aumento de edificios con alturas considerables en esta zona del planeta, una vez superada la crisis.

Locations: The Tallest 20 in 2020

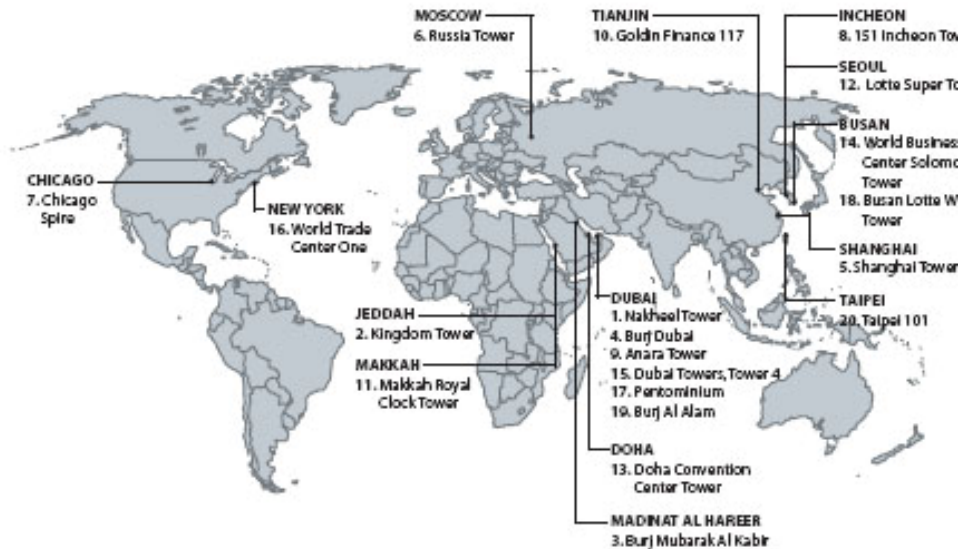


Fig.3: Ubicación de los edificios más altos estimados para el año 2020

La construcción en altura se convirtió en un símbolo cuando todavía no existían muchos rascacielos en las ciudades. Ahora, que la mayoría de las ciudades modernas de Norte América, Oceanía, Asia y Oriente Medio contienen numerosos rascacielos, el monumento, con toda la singularidad inherente, decae y pierde significado. El pasado 15 de junio del 2009 el urbanista inglés Peter Hall (24) resumió este fenómeno con la célebre frase *“Los iconos arquitectónicos nos llevan a una suma cero”*. Hall critica la construcción de elementos arquitectónicos singulares y aboga por una nueva imagen de la ciudad basada en el desarrollo de las infraestructuras y comunicaciones. Aunque en un principio la aparición de iconos en una ciudad sirvió para atraer a inversores foráneos, ahora con la enorme producción, la arquitectura icónica ha perdido la atracción y el significado simbólico que la caracterizó.

Parece que se vuelven a plantear las pautas de la construcción en los rascacielos. La forma, no es el fin, sino el medio para llegar a responder las necesidades funcionales de los edificios. Este es el motivo que ha inspirado esta tesina, encontrar una morfología en los rascacielos que sea pura y desinteresada en sí misma. Es decir, que no se deje impregnar por unos principios socio-culturales que manipulen una forma sin sentido práctico, sólo por el mero hecho de conseguir una *“monumentalidad dada”*.

Con una mirada en la futura generación de rascacielos, inmediatamente después del periodo icónico, se pretende estudiar la forma ideal que deberían presentar los edificios, según la acción del viento, para una tipología estructural determinada.

2. OBJETIVOS A ALCANZAR

2.1 Objetivo general

El objetivo a alcanzar es el estudio y análisis de diferentes morfologías de edificios en altura para determinar la forma que se adecua mejor al efecto de los esfuerzos laterales del viento. Para la obtención de la dirección y magnitud de estas cargas se recurre al estudio de movimiento de fluidos, mediante programas informáticos de última generación, CFD, que simulan el movimiento del viento.

El uso del CFD, "Computational fluid dynamics" en la edificación ha sido sobretodo para emular condiciones medioambientales y térmicas en relación al aire y temperatura del interior y exterior del edificio. Sin embargo, actualmente se encuentra en fase de experimentación la aplicación de CFD para determinar y mejorar el diseño aerodinámico de los rascacielos, mediante la modelización de la acción del viento. Dicha aplicación especializada en flujos atmosféricos se denomina "Computacional Wind Engineering", CWE.

Las grandes estructuras de la historia contemporánea han sido analizadas a cargas dinámicas de viento, por los llamados túneles de viento. La aplicación de los túneles de viento en los años sesenta del siglo pasado en los modelos aereoelásticos significó un gran avance tecnológico. No sólo se reproducen las características elásticas del edificio, sino también la sollicitación del viento, que por su propio carácter dinámico obliga a un estudio que incorpore el tiempo como variable analítica. De esta manera aparece un método que permite analizar fenómenos que no tenían expresión matemática, facilitando medir aceleraciones, frecuencias, amortiguamientos y tensiones estáticas y dinámicas. El túnel de viento, proporciona un conocimiento empírico del movimiento del aire.

El objetivo principal en términos generales es una optimización estructural del rascacielos mediante la arquitectura pasiva del diseño formal que disipe la energía cinética del viento.

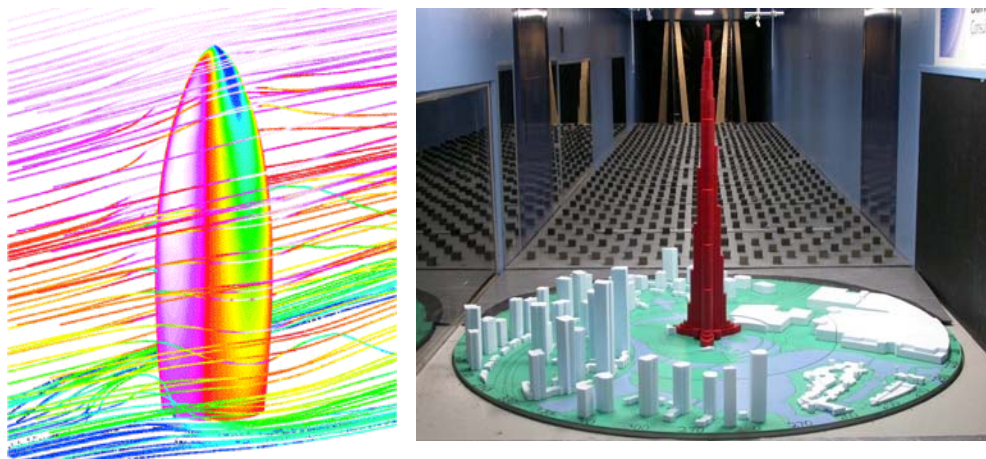


Fig. 1: Análisis de la torre St Mary Axe, Londres, por CFD y análisis del edificio Burj Dubai en el túnel de viento.

2.2 Justificación

El hecho que en las últimas décadas la arquitectura en altura deviene cada vez con formas más complejas, añadida al inminente desarrollo de los diferentes software informáticos, permiten crear en una etapa de diseño del proyecto basada en el tanteo

de modelos aerodinámicos informáticos que permitan mejorar la respuesta formal de los edificios a viento.

Para la obtención de la forma adecuada, no sería necesario someter varias veces el proyecto al túnel de viento, con el consiguiente ahorro económico, energético y material que supone. Ya que el CFD, mediante el método de elementos finitos, obtiene una modelización aproximada del movimiento del aire alrededor del edificio y por tanto unos esfuerzos a absorber sobre la construcción.

El problema que conlleva levantar edificaciones cada vez más altas es la disminución del peso del edificio, por el uso de los nuevos materiales más resistentes y más ligeros, y por tanto reducción del material de amortiguamiento, aumentando la esbeltez y flexibilidad general del edificio, la cual produce efectos negativos de cara al viento.

Con estos factores el viento produce excesiva vibración, perjudicial para el confort del usuario, y susceptible de entrar en resonancia con la frecuencia propia del edificio, lo cual puede ocasionar daños irreparables en la estructura.

H. Emre Ilgin y M. Halis Günel llegaron a la conclusión en el año 2007 (5) que las modificaciones aerodinámicas en el edificio pueden mitigar la acción del viento, pero no la pueden eliminar totalmente. Por lo tanto siempre será necesario masas amortiguadoras integradas en la arquitectura que absorban el exceso de vibraciones que ocasionan las cargas horizontales. Ambos coinciden en señalar que el estudio en túneles de viento de los edificios en altura, es necesario realizarlo durante la etapa de diseño del proyecto. De esta manera la forma que adquiere el proyecto tiene sentido propio y una función determinada: evitar la intensidad máxima de la fuerza del viento sobre la estructura.

De las conclusiones extraídas por H. Emre Ilgin y M. Halis Günel, esta tesina coincide también con un necesario estudio aerodinámico de los modelos, pero en lugar de basarse en los resultados del túnel de viento, recurre a los modelos de CFD, simulación fluidodinámica basado en métodos numéricos y algoritmos para resolver y analizar la interacción de gases (viento) con las superficies sólidas (piel del edificio).

2.3 Alcances y límites

Una vez estudiada la forma del edificio, teniendo en cuenta la variable del viento, por la simulación informática de movimiento de fluidos y por consiguiente cerrado el proceso de diseño; se cree oportuno someter el proyecto final al túnel de viento para contrastar los resultados informáticos con la experiencia empírica y detectar posibles errores o diferencias. Para determinadas situaciones con excesivas turbulencias, el CFD no es práctico, debido a las limitaciones actuales que presentan los recursos informáticos. Con todo, el rápido avance tecnológico y la investigación de los últimos años han perfeccionado mucho esta herramienta informática.

Una de las limitaciones que presentó el túnel de viento en sus inicios fue el problema de la escala, ya que se deben extrapolar las acciones a una escala real. Al contrario que el túnel de viento, el CWE, modeliza el edificio y el viento en una escala real posibilitando reproducir de forma simultánea el número de Reynolds (23). El CWE puede provocar errores si no se tienen nociones claras del orden de magnitud de las fuerzas.

Por otra parte, la herramienta computacional tiene gran libertad a la hora de modelar el entorno del modelo y las condiciones de entrada del flujo. Es posible representar la

geometría del terreno, los edificios colindantes o imponer un perfil de viento determinado, lo cual es complicado de reproducir en un túnel de viento.

El túnel de viento por su naturaleza física tiene una sección de paso limitada al viento, ya que se da en un espacio cerrado. Se debe tener en cuenta el efecto de bloqueo, relación entre el área frontal del modelo y el área de la sección del túnel aerodinámico. En cambio, los análisis CWE por su carácter virtual no cuentan con ninguna limitación en la sección de paso del viento, situación equivalente a la realidad de campo abierto.

Los modelos aeroelásticos que se exponen al túnel de viento permiten obtener la respuesta del edificio en el movimiento traslacional. Sin embargo, esta técnica obvia el modo torsional.

En cuanto a la posibilidad de efectuar medidas, el modelo numérico no tiene limitaciones físicas como el túnel de viento, ya que admite cientos de miles de sensores de presión sobre la superficie del modelo sin alterar en absoluto la corriente de aire, y además posibilita la opción de analizar el comportamiento en el interior del flujo.

Esta tesina presupone en un futuro la sustitución total de los túneles de viento en el diseño de los edificios altos, por la simulación fluidodinámica en informática. El análisis sucesivo de una tipología edificatoria concreta en el túnel de viento y su contrastación en CFD proporciona cierta fiabilidad al programa informático. Lo que da lugar en estudios posteriores de la misma tipología a recurrir sólo al CFD, sin compararlo con los datos empíricos del túnel de viento.

En el campo de la aeronáutica, el avión de reacción, SpaceShipOne (2003) fue diseñado por Burt Rutan sin usar ningún túnel de viento, sólo con modelos CFD. Lo que da pie a pensar, una aplicación parecida en el campo de la arquitectura.

El objetivo a alcanzar es obtener un diseño óptimo de formas aerodinámicas mediante la herramienta informática. Considerándose como ideal la forma que consiga paliar como máximo las consecuencias negativas del efecto del viento en los edificios en altura. Por tanto, la forma que requiera menos masa amortiguadora para absorber las vibraciones, ya que en sí misma el viento no incide con la máxima intensidad.

3. HISTORIA

3.1 Breve reseña histórica

Buckminster Fuller (1895-1983) fue uno de los pioneros en propagar al mundo una visión sobre la energía y la eficiencia en la materia, con aplicación en los campos de la arquitectura, ingeniería y diseño. Americano de nacionalidad, planteó las relaciones de la arquitectura con el medio físico en términos de energía y superó la visión evocativa de los avances técnicos desarrollada por el maquinismo simbólico del Movimiento Moderno. Proclamó la idea de Dymaxion (dinamismo máximo e iones) como una suma de ventajas a partir de una absorción mínima de energía, idea transferible a la arquitectura.

En 1927 Fuller publica *4D Time-lock* (6) donde incluye un prototipo de viviendas organizadas verticalmente en torno a un mástil. Basada en el principio de la proporcionalidad entre pérdidas calóricas y coeficiente de resistencia a la presión ejercida por el aire, se dispone de un escudo aereodinámico que rota sobre el eje en función de las direcciones del viento. De esta manera se reduce la incidencia frontal

del viento y se impide la acción de las turbulencias en la zona de succión. Todos los principios fueron extraídos de la construcción naval y aeronáutica pues en ellas encuentra Fuller una aplicación técnica avanzada de los principios energéticos que fundamentan su trabajo.

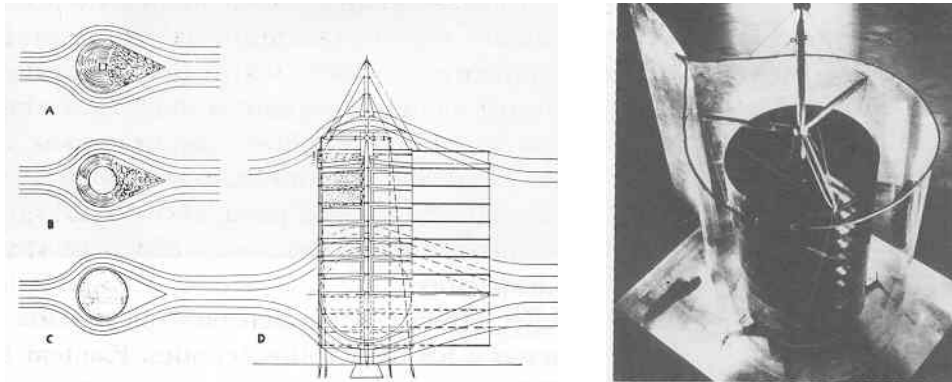


Fig.1: Propuesta de Buckminster: edificio de diez plantas provisto de escudo aerodinámico.

El uso de calibradores electrónicos introducidos a través de la industria aerodinámica tras la Segunda Guerra Mundial permitió medir deformaciones mediante la reproducción de las características elásticas del edificio, asimilando la presión del viento a cargas estáticas. Con lo cual, se posibilitó analizar configuraciones complejas, no simétricas, en las que la aparición de torsiones impedía una formulación matemática.

El túnel de viento, fue una herramienta inicialmente utilizada en el mundo de la aviación. El primer túnel de viento data del año 1871 por Francis Herbert Wenham (1824-1908), miembro del Consejo de la Sociedad Aeronáutica de Gran Bretaña. Posteriormente, los primeros aviones de la historia, como el Flugan obra del sueco Carl Rickard Nyberg en 1897, fueron diseñados gracias a los resultados que proporcionó el túnel de viento.

En los años sesenta del siglo XX, se aplicaron por primera vez los modelos aeroelásticos, los cuales reproducen las características elásticas de los edificios, a los túneles de viento, obteniendo resultados empíricos de la presión y succión del viento en las caras de los edificios. El modelo aeroelástico permite una deformación de la maqueta, de esta manera se evalúa el la respuesta del edificio a la acción del viento.

En 1967, un estudio sobre seis plantas diferentes de idéntica superficie para el U.S Steel Building de Pittsburg (Harrison, Abramovitz & Abbe) permitió conocer de forma sistemática esta influencia. Este estudio sirvió para poder valorar con suficiente exactitud el comportamiento tensional del edificio ante pequeñas modificaciones en el contorno. Como consecuencia de este estudio, la esquina como tal se intenta disolver mediante cortes biselados o entalladuras en sus bordes en búsqueda de una forma que dé mejor respuesta aerodinámica. La simplicidad de los ángulos y las rectas demandada por el ideal moderno decae.

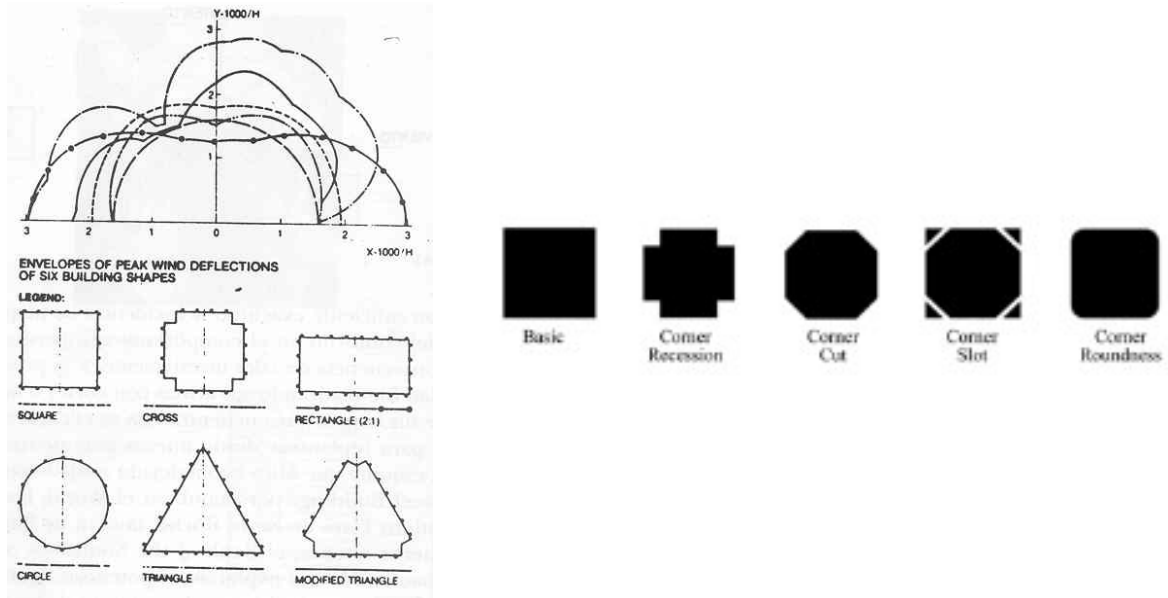


Fig. 2: Estudio de diferentes geometrías en planta frente al viento para el U.S Steel Building de Pittsburg (1967)

Numerosas investigaciones en edificios aerodinámicos fueron llevadas a cabo a partir de la década de los ochenta. Uno de los primeros artículos dedicados a la simulación numérica de la acción del viento es de Hirt (12). Sin embargo, los primeros autores que compararon los resultados de la simulación numérica con datos numéricos proporcionados por los túneles de viento fueron Hanson y Summers (13) en los inicios de 1982.

En el año 1992 el edificio de la Universidad de Texas Tech (TTU) fue usado como punto de referencia para validar y confirmar los modelos de CWE, ya que existía amplia documentación sobre estudios realizados en el túnel de viento. Los investigadores fueron Selvam, Mochida, He y Song y Senthoooran.

Del trabajo más reciente destaca Huang, que en el año 2007 investigó el análisis aerodinámico con la ayuda de los modelos del CAARC (Commonwealth Advisory Aeronautical Council) Melbourne, Australia. Los coeficientes aerodinámicos y los flujos de aire fueron determinados usando CFD.

Hasta la actualidad la mayoría de los CWE analizan edificios rígidos por análisis numérico. Sin embargo, los modelos aeroelásticos de edificios son raramente analizados por procedimientos numéricos. Por un lado se obtiene la presión y succión del viento sobre un cuerpo rígido de geometría similar al modelo a estudiar. Y por otro lado, se estudia el modelo aeroelástico del edificio, con la respuesta estructural a los esfuerzos obtenidos por la simulación de fluidos.

La interacción entre fluido-estructura mediante análisis aeroelásticos es susceptible de investigación, dada la actual carencia informática en la fusión de estos dos campos. Uno de las pocas investigaciones sobre esta materia fue la que realizaron Swaddiwudhipong y Khan (15) en el año 2000 donde se modelizó de forma muy simple la interacción entre el fluido y la estructura del edificio. Los métodos de interacción fluido-estructura deberían ser empleados en los análisis aeroelásticos con el fin de conseguir una respuesta correcta mecánica frente a las fuerzas aerodinámicas en la superficie de contacto.

4. INGENIERÍA

4.1 Características dinámicas de las estructuras.

El cálculo de un sistema dinámico se caracteriza por un cambio o evolución de su estado en un tiempo determinado. De ahí que las cargas de viento cuando pasan a ser relevantes, en estructuras altas, es necesario un cálculo dinámico. De hecho el Eurocódigo 1 “Bases de Proyecto y Acciones en Estructuras”, parte 2-4 “Acciones en estructuras: acciones del viento” ofrece dos métodos para calcular las cargas de viento. En el primer método las cargas de viento se simplifican a cargas estáticas. El segundo método, es aplicable en estructuras susceptibles de excitación dinámica. Como criterio de elección determina que las estructuras mayores de 200m de altura deben calcularse por el cálculo dinámico, mientras que el resto puede utilizarse el método simplificado de cálculo por cargas estáticas, ya que la excitación dinámica en edificios bajos es escasa o prácticamente nula.

Para llevar a cabo el cálculo dinámico las estructuras se esquematizan como sistemas discretos constituidos por un cierto número de masas unidas entre sí y al terreno a través de muelles y amortiguadores. Los muelles representan el comportamiento de los elementos elásticos que unen las masas, mientras que los amortiguadores permiten tener en cuenta la disipación de energía durante el movimiento. Las posibilidades de movimiento que tienen las masas son los grados de libertad del sistema.

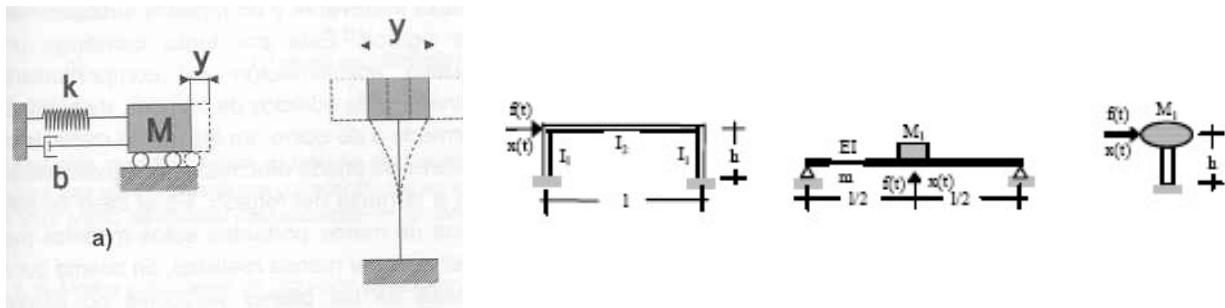


Fig. 1: Esquemas de sistemas con un grado de libertad

Los sistemas con un grado de libertad representan el sistema dinámico más sencillo, cuyo movimiento puede ser descrito por un solo parámetro en función del tiempo. Un ejemplo de representación serían los edificios de planta baja, constituido por pilares con una rigidez global k y por vigas y forjado con una masa total M . Se supone que los pilares son axialmente indeformables y desde el punto de vista de la flexión, y que su masa es irrelevante respecto a la de las vigas y forjado. Bajo esta hipótesis el sistema sujeto a acciones horizontales tiene un comportamiento denominado “shear type”, similar a un elemento sujeto a esfuerzos de cortante.

El período propio de un sistema con un grado de libertad no amortiguado se denomina T y está constituido por oscilaciones armónicas. Durante el movimiento el intervalo de tiempo T entre un máximo y el siguiente se mantiene constante y representa una magnitud característica del oscilador. El período propio de un oscilador con un grado de libertad está ligado a la rigidez k , y a la masa M , por medio de la siguiente relación:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{M}{k}}$$

El inverso del período T es la frecuencia propia del sistema f . Representa el número de oscilaciones completas que son cumplidas por el sistema en la unidad de tiempo.

$$f = \frac{1}{T}$$

La pulsación propia o frecuencia angular w del oscilador está relacionada al período propio por la relación:

$$w = \frac{2\pi}{T}$$

Los sistemas con más grado de libertad representan los edificios con más de un piso. El número de grados de libertad considerado suele corresponder con el número de forjados. También en este caso se supone que el edificio tiene un comportamiento "shear type". La masa M de cada planta se supone concentrada en el nivel de forjado, axialmente inextensible y rígido en cuanto a flexión. Los pilares, en cambio, pueden deformarse sólo mediante flexión. Bajo tales hipótesis, cada masa tiene como único grado de libertad el desplazamiento horizontal.

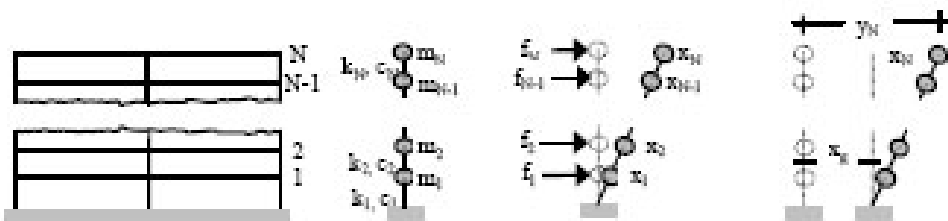


Fig. 2: Sistema con más grados de libertad

Los sistemas con más grados de libertad tienen tantos períodos propios como grados de libertad. El período fundamental es el período propio más grande de la estructura. Las oscilaciones libres de un sistema con más grados de libertad ocurren según una combinación de todos los modos principales de vibrar y tienen en general una evolución bastante desordenada. El conocimiento de los modos principales de vibración es fundamental en el estudio de los sistemas.

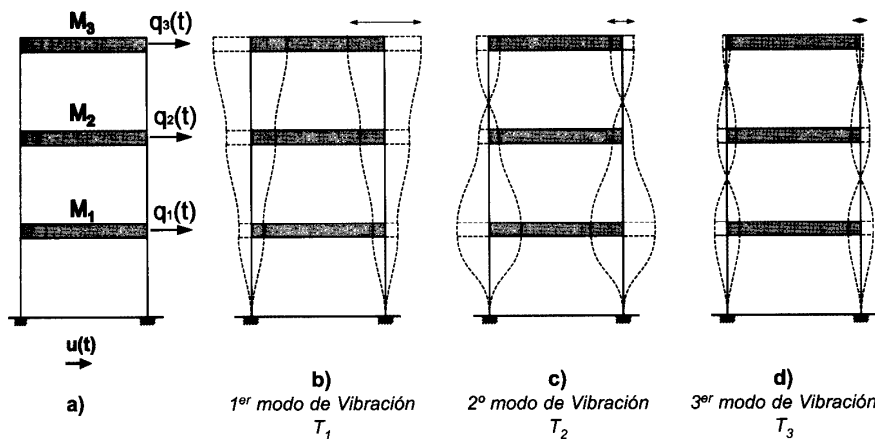


Fig. 3: Modos principales de vibración del sistema en el que T_1 , T_2 y T_3 son los períodos propios del sistema, verificándose que $T_1 > T_2 > T_3$

Todo cuerpo o sistema tiene una, o varias, frecuencias características. Cuando un sistema es excitado a una de sus frecuencias características, su vibración es la máxima posible.

Esto ocurre cuando el periodo de vibración del cuerpo rígido coincide con el periodo de vibración característico de dicho cuerpo, de manera que se produce un aumento de forma progresiva de la amplitud del movimiento. Este fenómeno es conocido como resonancia. Cuando un sistema estructural entra en resonancia, es muy perjudicial para la integridad de los elementos que lo constituyen.

La determinación de la rigidez representa un paso fundamental para la caracterización dinámica de una estructura, porque permite calcular el período propio de oscilación de la estructura y conocer las fuerzas de tipo elástico que se oponen al movimiento. Para pequeños desplazamientos el comportamiento de las estructuras es elástico, lineal, y por tanto los desplazamientos son directamente proporcionales a las fuerzas aplicadas, siendo la constante de proporcionalidad la propia rigidez de la estructura. Para elevados niveles de esfuerzo el comportamiento de las estructuras deja de ser elástico lineal y la rigidez no se mantiene constante sino que tiende a disminuir, con el fenómeno llamado degradación de la rigidez.

La rigidez de un sistema con un grado de libertad se define como:

$$k = \frac{F}{\delta}$$

Donde F es una fuerza cualquiera estática aplicada a la masa M y δ el desplazamiento horizontal. La rigidez de un pórtico constituido por dos pilares y un forjado es:

$$k = 2 \cdot 12 \frac{EI}{h^3}$$

Siendo $12EI/h^3$ la rigidez de cada pilar, la cual se obtiene de las ecuaciones de resistencia de materiales. La E es el módulo elástico del material, h la altura de los pilares e I el momento de inercia de la sección.

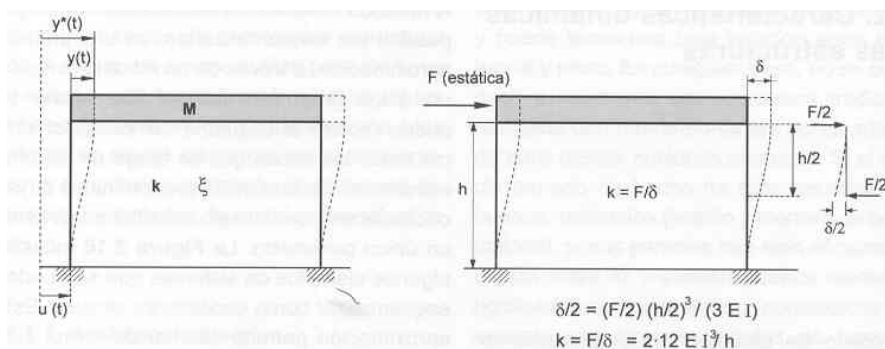


Fig. 4: Esquema dinámico de un edificio de una planta (Shear Type)

En el caso de sistemas con más de un grado de libertad, la rigidez es una matriz (C) cuadrada y simétrica con un número de filas y columnas igual al número de grados de libertad del sistema.

$$[C] = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \dots & c_{1n} \\ c_{21} & c_{22} & \dots & c_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ c_{n1} & c_{n2} & \dots & c_{nn} \end{bmatrix}$$

La introducción de amortiguamientos en los sistemas dinámicos permite considerar la disipación de la energía, que puede darse por fenómenos de distinta naturaleza como las fricciones externa e interna, imperfecciones de las uniones...El amortiguamiento se opone al movimiento con una fuerza proporcional a la velocidad de la masa a través de un coeficiente llamado coeficiente de amortiguamiento.

En los sistemas con un grado de libertad el coeficiente de amortiguamiento es:

$$b = 2M\omega\xi$$

Donde ω es la pulsación propia del oscilador y ξ es el factor de amortiguamiento adimensional. En las estructuras civiles comunes el factor de amortiguamiento es siempre bastante bajo y en cualquier caso menor de 1. Los valores de ξ se expresan generalmente como porcentajes de la amortiguación crítica, dado por $2M\omega$

En los sistemas con más grado de libertad se introduce una matriz de amortiguamiento (D). Se supone que las fuerzas amortiguadoras que se oponen al movimiento de las masas son proporcionales a la velocidad de éstas, por medio de la matriz de amortiguamiento:

$$[D] = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & \dots & d_{1n} \\ d_{21} & d_{22} & \dots & d_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ d_{n1} & d_{n2} & \dots & d_{nn} \end{bmatrix}$$

El primer edificio que se equipó con amortiguamiento fue el Citicorp Center de Nueva York en 1977. Se emplearon 400 toneladas de hormigón sobre una capa lubricante situado en el piso 59, sostenido en ambas direcciones por resortes y elementos elásticos que absorben el impacto. Este sistema de amortiguamiento utilizado en el Citicorp Center disipa la energía cinética en un 50%.

4.2 Estructuras empleadas en los rascacielos

Ante las acciones horizontales del viento, las estructuras del rascacielos deben responder a una serie de esfuerzos para evitar deformaciones y movimientos no deseados. Los esfuerzos principales a los que queda sometido son: flexión, cizalladura y vibración excesiva.

En la década de los años 60 del siglo pasado surgieron parámetros para medir la eficiencia estructural a flexión y a cortante de las estructuras. Le Messurier presentó un cuadro comparativo de distintas tipologías estructurales en edificios en altura, midiendo el índice de rigidez a vuelco (BRI) (Bending Rigidity Index) determinado por la suma total de inercia de la masa estructural. La solución ideal a vuelco sigue la lógica de la excentricidad: situar en lo posible la masa del edificio lejos del centro, concentrándola en los vértices. A modo de ejemplo la Torre City Corp tiene un BRI de 33 y el Southwest Bank of Houston de 63, siendo el caso ideal un BRI de 100.

El otro parámetro comparativo es el (SRI) (Shear Rigidity Index) y mide la rigidez a cortante que presenta la estructura. En la historia de los rascacielos, la triangulación de elementos ha sido un recurso muy utilizado en las tipologías estructurales para absorber el exceso de cortante. Así barras dispuestas a 45° alcanzan un SRI de 62.5. Sistemas de barras horizontales trabajando conjuntamente con barras inclinadas a 45° tienen un SRI de 31.3. Siendo el caso óptimo el edificio que para SRI alcanza el valor

de 100. La eficiencia de un pórtico medida en SRI depende de las proporciones de la profundidad y de la longitud de sus miembros.

A nivel de concentración de cargas, existen cuatro sistemas puros estructurales en edificios esbeltos:

-Sistema reticular: El peso del edificio se reparte en las dos direcciones del plano de una manera ortogonal e igual en ambos sentidos. Con este sistema, el edificio no puede alcanzar alturas considerables.

-Sistema perimetral: Las cargas gravitatorias se concentran en el perímetro del rascacielos. Mejora notablemente la condición de rigidez a vuelco.

-Sistema nuclear: El descenso principal de cargas a la cimentación se realiza por el núcleo central en planta.

-Sistema puente: Las cargas se recogen a través de una estructura de mayor magnitud.

Autores como Johann Eisele y Ellen Kloft (21) clasifican los sistemas estructurales para rascacielos en dos grandes grupos: los que transfieren la carga directamente y los que la transfieren indirectamente.

En el primer grupo se sitúan:

a) Sistemas de esqueleto: estos soportes estructurales están compuestos por pilares articulados y barras en cruz, los cuales sólo pueden transmitir cargas verticales. Las cargas horizontales son asumidas por paneles. Estos pueden ser diseñados como macizos o como entramados que resisten el momento flector. El núcleo, macizo, suele ser utilizado para arriostrar el sistema y contiene las comunicaciones en vertical.

Los sistemas en esqueleto se han ejecutado en edificios de altura muy variable. Ejemplo de ello son el Seagram Building, sistema estructural en esqueleto con puntales por el arquitecto Philip Jonson, 157metros de altura y el Chase Manhattan Bank de los arquitectos SOM alcanzando los 250 metros. La clave para el desarrollo de los sistemas de esqueleto en altura es el momento final a absorber por el núcleo o los paneles. Las únicas restricciones espaciales se imponen en el piso de planta baja por la situación de los pilares y las pantallas, los cuales transfieren directamente la carga al terreno. Una de las ventajas de esta tipología es la libertad en el diseño formal de la fachada.



Fig 5: Seagram Building, Nueva York

b) Pantallas de cortante "Shear Wall systems"

Estas pantallas difieren del sistema en esqueleto en que no sólo transmiten la carga horizontal sino también la gravitatoria. Pueden ser longitudinales o transversales. Las pantallas se suelen ejecutar en hormigón armado de alta resistencia, las cuales se solidarizan a los forjados de hormigón adquiriendo el conjunto gran rigidez.

Al solidarizar las pantallas entre ellas mediante elementos articulados, se obtiene una mayor rigidez del conjunto frente las cargas horizontales. La deformación horizontal en la pantalla y en el forjado es la misma en cada piso, ya que se contrarrestan los desplazamientos entre los dos elementos: pantalla y pórtico. Las pantallas a cortante se unen entre sí a toda altura. Sin embargo, si el forjado y la pantalla son conectados con elementos rígidos (jácenas), se obtienen momentos en los extremos de las vigas que reducen todavía más la deformación horizontal del conjunto.

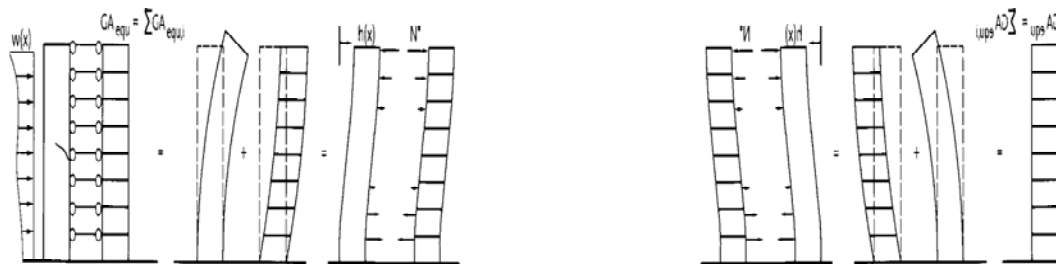


Fig 6: Esquema del comportamiento de pantallas a cortante

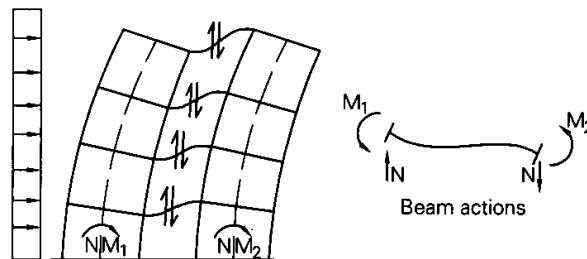


Fig 7. Pantallas unidas por elementos rígidos

Fazlur Khan ya había trabajado con Sbarounis sobre la interacción entre pórticos y pantallas en Estados Unidos durante la década de los 60. Gracias también al trabajo realizado por Hubert Beck en Alemania, fue posible obtener el comportamiento dinámico estructural de las pantallas de cortante con relativa facilidad.

Las pantallas transversales dificultan la flexibilidad del espacio, por eso, se suelen emplear en construcciones cuyo uso principal es vivienda: apartamentos, hoteles... donde la distribución interna entre módulos se encuentra bastante definida. Por el contrario las pantallas longitudinales son más usadas en la tipología de oficinas, donde la flexibilidad es un requerimiento muy importante. El sistema de pantallas longitudinales suele ser perimetral, con lo cual se consigue espacios diáfanos el interior del edificio. Sin embargo, este sistema obliga a pequeñas oberturas en la piel estructural del edificio, reduciendo la capacidad de diseño de las fachadas. Un ejemplo de esta última tipología es la Metropolitan Correccional Center, en Chicago de los arquitectos Harry Weese & Associates.

c) Sistemas de tubos:

En el sistema simple de tubo, las cargas horizontales son transferidas por la fachada, la cual se constituye como una entidad rígida en tubo. Las fachadas están fuertemente definidas por la exigencia estructural dinámica para paliar el efecto del cortante.

Otra modalidad de los sistemas simples en tubo son los tubos exteriores de hormigón. Ejemplo de ello es el Deutsche Bank en Frankfurt de los arquitectos ABB. La fachada se convierte en el elemento estructural. Este sistema no da el mismo grado de rigidez que aquellos que tienen un núcleo central.



Fig 8: Deutsche Bank, Frankfurt y John Hancock Center, Chicago

La mayoría de los rascacielos en tubos suelen tener un núcleo central interior, necesario para albergar las comunicaciones verticales, el cual es usado para contribuir a la rigidez horizontal del conjunto, solidarizando el núcleo con la fachada mediante los forjados. Este sistema estructural se denomina “tube-in tube”, tubo en tubo.

Estos tubos pueden ser ejecutados en acero. La arquitectura americana en altura se inclinó más por este desarrollo. Al igual que el hormigón, el tubo o los tubos exteriores de acero contemplan una obertura mínima de ventanas para salvaguardar la misión estructural de la fachada.

Ejemplos de rascacielos con sistemas de tubos, muy en boga en los años 70, son el World Trade Center por los arquitectos Yamasaki, Roth & Sons en Nueva York, el John Hancock Center y la Sears Tower, estos últimos situados en Chicago y realizados por el estudio de arquitectura SOM.

Cabe destacar que el hecho que las dos torres del World Trade Center de Nueva York no colapsasen inmediatamente después de los impactos producidos por los aviones en el atentado del 11 de septiembre del 2001 fue debido a la transmisión de las cargas horizontales por los tubos exteriores. Aunque más del 50% de los pilares de fachada quedaron destruidos, los forjados superiores fueron capaces de funcionar como vigas Vierendeel y redirigir el descenso de las cargas verticales. La construcción del tubo exterior fue diseñada para soportar la máxima carga de viento, por lo tanto, los tramos de fachada que no quedaron afectados por el atentado tenían suficientes reservas

para absorber las cargas horizontales originadas por el impacto de los aviones. Gracias a esto, dio tiempo a salvar a muchas vidas humanas.

El sistema de tubos presenta respuestas estructurales muy diferentes según si el tubo es ciego constituyendo una caja estructural perfectamente rígida o si los tubos están formados por un entramado de pilares y vigas donde la continuidad entre las caras del paralelepípedo es proporcionada por la rigidez individual de cada viga a los esfuerzos de cortante.

En el caso que el tubo funcione como una caja rígida ante la acción horizontal, las caras paralelas a la dirección del viento experimentan tensiones por el momento flector inducido, que al transmitirse a la cara perpendicular por la continuidad elástica existente en las esquinas, provoca una tensión constante en las caras perpendiculares. Esto es debido al alto grado de resistencia a cortante que ofrece el núcleo en las esquinas como caja rígida.

Sin embargo, en las estructuras de tubos abiertos, la flexibilidad de las vigas interiores que unen caras paralelas frente a la rigidez de las fachadas transversales produce un "retraso" en la transmisión del cortante hacia éstas que incrementa las tensiones reales en los soportes de las esquinas. Lo que ocasiona que la distribución de la tensión no sea constante en las caras perpendiculares a la acción del viento debido al aumento de esfuerzo a añadir en las esquinas por el retraso de cortante. Originando una consecuente deformación de las esquinas. La concentración de tensiones por el cortante es considerable en la parte inferior del rascacielos y puede superar en gran medida las tensiones ocasionadas por las cargas gravitatorias. Para paliar estos efectos, es necesario reducir dicha tensión mediante elementos rígidos como pantallas a cortante, o núcleos. Estos elementos se encargan de liberar gran parte de la tensión producida por el momento flector en la parte baja del rascacielos.

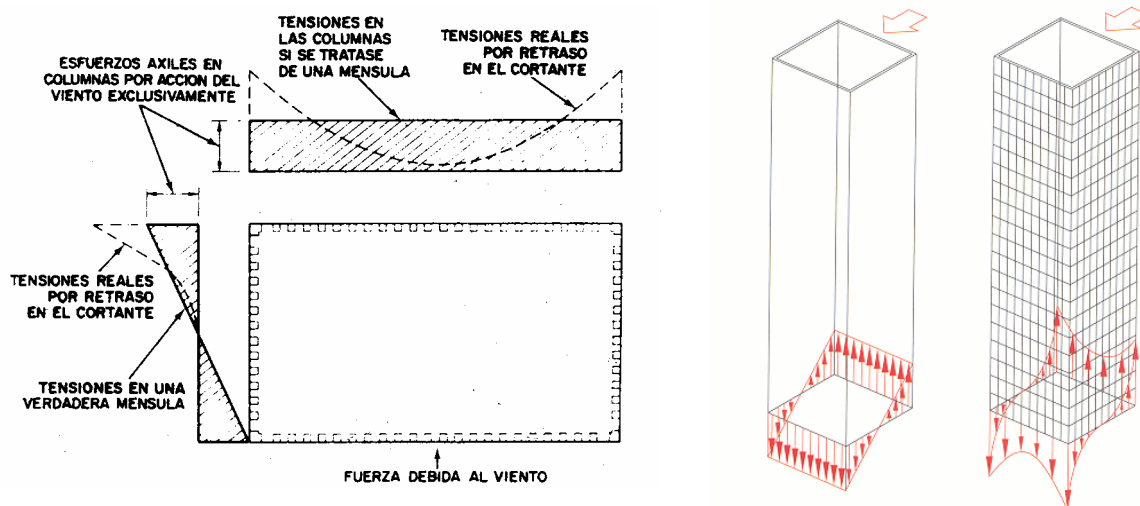


Fig. 9: Comportamiento del tubo rígido: retardo en la transmisión del cortante.

Algunas maneras de introducir rigidez a cortante en los sistemas de tubos es mediante un entramado de tubos en fachada dispuestos a 45°, los cuales asumen las cargas horizontales transmitiéndolas en las barras como valores puros de axil: compresión y tracción. Esta nueva redistribución de esfuerzos lleva a considerar un ahorro en el material considerable.

Posiblemente el mejor ejemplo conocido de entramado de tubos con diagonales es el John Hancock Center en Chicago de los arquitectos SOM. Las diagonales dispuestas en fachada a 45° asumen la fuerza de cortante del viento. A la vez, llevan parte de las cargas verticales para minimizar el efecto retrasado de cortante y asegurar que la construcción del tubo se comporte en lo posible como una caja rígida.

En el Citycorp Center de New York las diagonales se ocultan tras la fachada.

Otra modalidad de sistemas en tubos es el conformado por un haz de tubos. Para mejorar el efecto del tubo de la fachada, éste se integra con el resto de la estructura mediante una red de tubos que se introduce en el interior del edificio. Con esta adicional red el tubo principal puede subdividirse en pequeños tubos o células. Esto puede ser llevado a diferentes alturas, contribuyendo a la imagen formal del edificio. La torre Sears de Chicago de los arquitectos SOM es un ejemplo de esta tipología. Consiguió alcanzar los 445m de altura.

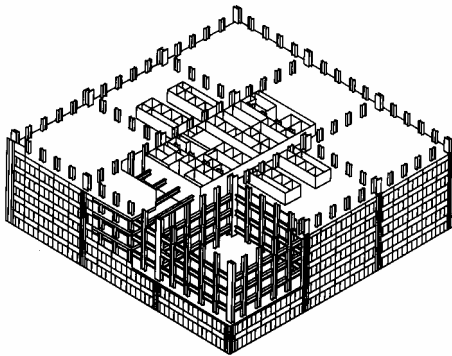


Fig. 10: Axonometría de la estructura y vista del edificio Torre Sears, Chicago

El segundo grupo de sistemas estructurales para rascacielos está constituido por aquellos que transfieren la carga indirectamente.

Según la clasificación de Johann Eisele y Ellen Kloft (21) encontramos los siguientes grupos:

a) Sistemas de soporte

Presentan una similitud estructural con los árboles. Parten de un solo tronco o núcleo para ensancharse y ramificarse a medida que el edificio alcanza altura. El núcleo que suele albergar las comunicaciones verticales es la base del soporte de la estructura, y aguanta todos los forjados y pilares. Las cargas horizontales son absorbidas directamente por el núcleo. Este sistema demanda formas simétricas alrededor del núcleo para minimizar los esfuerzos dinámicos de la estructura que ocasiona el viento.

El Olivetti Administration and Training Center en Frankfurt aplica este sistema estructural.

b) Sistemas en voladizo

Los forjados son los elementos que asumen las cargas horizontales, transmitiéndolas al núcleo central. Como el núcleo debe asumir todas las cargas, las tensiones

producidas por las cargas horizontales son contrarrestadas con las cargas verticales del núcleo, disminuyendo la tensión final.

Para obtener un sistema en voladizo es necesario que los forjados se encuentren unidos rígidamente al núcleo para transmitir los momentos.

Aunque en teoría la fachada queda libre de restricciones estructurales, ya que la transmisión de cargas se considerada únicamente por los forjados; en la práctica la fachada debe diseñarse ligera con el fin de evitar tensiones que agraven todavía más el estado de los forjados.

Los edificios Jonson Wax Building de Frank Lloyd Wright en Racine 1936-39 y el Price Tower en Bartlesville 1956 presentan una tipología estructural en voladizo.

c) Sistemas suspendidos

Estos sistemas transfieren las cargas horizontales primero hacia arriba vía un circuito hacia la parte superior del edificio para luego descender por el núcleo o los núcleos centrales al terreno. Este sistema es el único que desvía la carga hacia tramos más elevados. A diferencia de los sistemas de soporte y en voladizo, los sistemas suspendidos pueden contemplar uno o más núcleos interiores.

Con un sólo núcleo la cimentación se concentra en una sola zona, por lo tanto es más fácil de ejecutar y presenta ventajas en terrenos no favorables a la construcción. En cambio, para varios núcleos es necesario ejecutar tantos elementos de cimentación como núcleos existan.

Los sistemas suspendidos se construyen de arriba abajo. Primero se levanta el núcleo y posteriormente se van colocando los forjados, los cuales son prefabricados, y ejecutados previamente en el suelo.

Permiten un tratamiento liberal de la fachada. Las barras que atirantan los forjados pueden ser movidas al interior del edificio para prevenir las dilataciones y contracciones de la estructura.

Edificios con sistemas suspendidos son el Hong Kong & Shanghai Bank de los arquitectos Foster and Partners, el BMW Tower Munich del arquitecto Kart Schwanzer y el Standard Bank Centre Johannesburgo de la firma de arquitectos HPP.

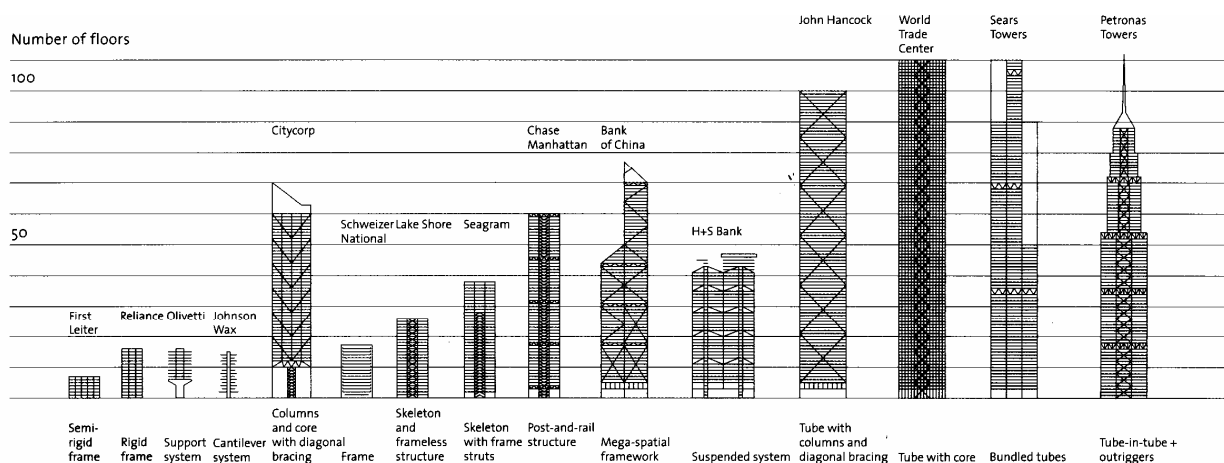


Fig. 11: Sistemas estructurales de los edificios más altos.

Los sistemas estructurales que presentan los edificios más altos realizados en la última década son una combinación de varias de las tipologías anteriormente mencionadas, siempre encaminados a hallar la mejor respuesta estructural.

Cuando los núcleos devienen tan esbeltos para asumir las cargas horizontales surgió la idea de unirlos mediante jácenas o elementos que presentaran cierta rigidez. Este sistema se denomina cinturón de rigidez. A diferencia de las pantallas de cortante, el cinturón de rigidez une los núcleos en determinados niveles y no a lo largo de toda la altura, como ocurre en las pantallas de cortante.

Los cinturones de rigidez suponen la optimización máxima del sistema de pórticos y pantallas permitiendo mediante conexiones rígidas que las diferentes deformaciones de ambos elementos se contrarresten. El pórtico y la pantalla tienen distinta definición ante la acción lateral. Al unirlos la pantalla reduce la traslación del pórtico abajo y arriba, es el pórtico el que ata la cabeza de la pantalla: se reducen así flexión lateral y distorsiones aunque los forjados deben colaborar. Al atar los soportes periféricos a las pantallas con elementos de gran canto se aprovechan los axiles de los soportes para colaborar en la rigidez del conjunto. Ejemplos en los que se unen dos pantallas mediante cinturones de rigidez son el Deutsche Post Building en Bonn de los arquitectos Murphy/Jahn y el BoCom Financial Tower en Shanghai por la firma de arquitectos ABB.

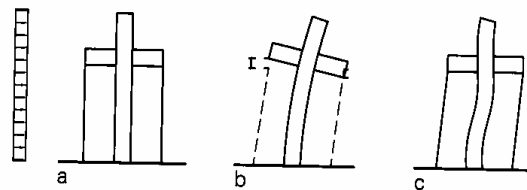


Fig 12: Dinámica de los cinturones de rigidez:

- a. Sin carga
- b. Deformación de la estructura sin la influencia del cinturón.
- c. Deformación inversa del núcleo causado por el cinturón de rigidez.

Los cinturones de rigidez también pueden disponerse de manera que unen el núcleo con los pilares de fachada.

Sobek y Sundermann compararon la efectividad de los elementos de conexión que asocian las pantallas y la altura ideal a incorporar en un rascacielos.

Los edificios más altos del mundo como las Torres Petronas en Kuala Lumpur por los arquitectos Cesar Pelli Associates usan los cinturones de seguridad para conectar el núcleo rígido del interior con las megacolumnas ocultas tras la fachada. El núcleo central y las megacolumnas se proyectaron de hormigón altamente resistente, en cambio, la sección que integra los cinturones de seguridad son de acero para una mejor transmisión de la carga. De esta manera el núcleo y las megacolumnas constituyen una gran masa de hormigón que ya por su naturaleza, amortiguan las frecuencias inducidas por el viento. Las Torres Petronas con una anchura de 46.2m alcanzan una altura de 452m, sin colocar ningún artefacto especial para amortiguar la posible oscilación producida por el viento.

El Jin Mao Building en Shangai por los arquitectos SOM también consiste en un núcleo de hormigón solidarizado a los megapilares de acero que se sitúan detrás de la fachada mediante cinturones de rigidez de acero.

En España, de las cuatro torres de Madrid, tres de ellas disponen cinturones de rigidez: la Torre Espacio, la Torre Sacyr Vallehermoso y la Torre Caja Madrid.

La Torre Caja Madrid se erige como el edificio más alto de España y quinto de Europa con 250m de altura. La estructura vertical principal está constituida por dos núcleos laterales de hormigón armado. Entre estos núcleos se encuentran tres bloques de pisos de oficina apoyados en tres grandes cerchas metálicas que alcanzan dos pisos de altura cada una, invadiendo las plantas técnicas. Estas cerchas metálicas confieren un cinturón de rigidez al edificio, mejorando la respuesta estructural del conjunto.

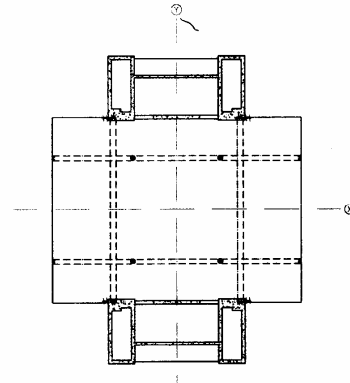


Figura 22: Cerchas metálicas
Figure 22: Steel transfer trusses

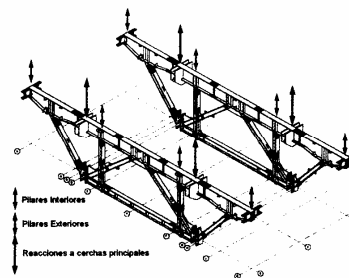


Figura 23: Cercha secundaria [6]

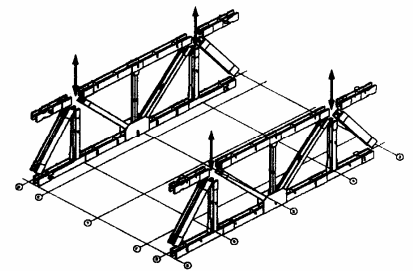


Figura 24: Cercha principal [6]

Fig 13: Vista y planta Torre Caja Madrid, Madrid

Los cinturones de rigidez de la Torre Sacyr Vallehermoso y la Torre Espacio están formados por pantallas de hormigón de un piso de altura o 5 metros, y conectan núcleo con pilares de la fachada o interiores.

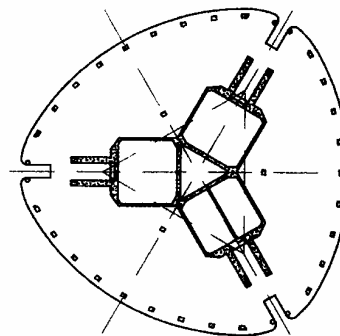
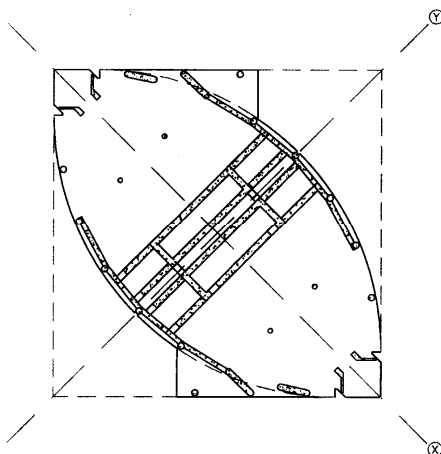


Fig 14: Plantas Torre Sacyr Vallehermoso y Torre Espacio, Madrid

La posición ideal del cinturón de rigidez se encuentra a los 2/3 de altura del edificio. La Torre Espacio fue la única que llevó a cabo este postulado.

Un efecto secundario es que a causa de la elevada rigidez que proporcionan dichos cinturones, se transmite gran parte del esfuerzo axial de los pilares por encima de este nivel al núcleo. Esto conlleva una reducción de los efectos de acortamientos diferenciales pero origina tracciones importantes en el forjado superior a tener en cuenta.

5. AERODINÁMICA.

5.1 Teoría

La aerodinámica es la rama de la mecánica de fluidos que estudia las acciones que aparecen sobre los cuerpos sólidos cuando existe un movimiento relativo entre éstos y el fluido que los baña, siendo éste último un gas.

A grandes trazos, este apartado pretende presentar los conceptos básicos pertenecientes a la rama de la aerodinámica, que por su naturaleza afectan directamente en el diseño y cálculo de los edificios en altura. Por lo que todo arquitecto debería tenerlos en cuenta a la hora de proyectar rascacielos.

El movimiento del fluido (aire) alrededor de un edificio alto, en forma de prisma rectangular frente a la acción del viento, se da principalmente siguiendo tres modos de acción: “along wind”, en la misma dirección del viento (sentido longitudinal), “across wind” en la dirección perpendicular (sentido transversal) y “torsional modes”, modos torsionales (16)

a) “Along wind” Las fuerzas se manifiestan en la dirección de la corriente de flujos, la dirección principal del viento. Bajo la acción del flujo en movimiento las estructuras experimentan fuerzas aerodinámicas en el sentido del arrastre del viento.

Este movimiento y las fuerzas que generan ocasionan presiones en la cara de barlovento (cara perpendicular a la acción incidente del viento) y a sotavento (cara trasera del edificio) (17)

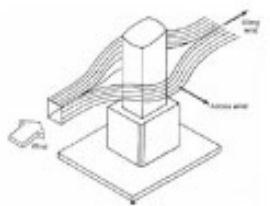


Fig1: “Along wind” en la dirección del viento.

a) “Across wind”. Este término se refiere al flujo que actúa transversal a la dirección del viento. La respuesta es un movimiento en el plano perpendicular a la dirección incidente del viento. La magnitud que alcanza suele superar el “Along wind” y puede perjudicar mucho el edificio.

De la prueba que se realizó para el edificio Jim Mao en Shangai, analizándolo por el túnel de viento, se obtuvo que la máxima aceleración en sentido transversal “Across

wind” es del orden de 1,2 veces más que la presión que ejerce el viento en el sentido longitudinal “Along wind”. (18)

Los edificios altos son muy sensibles a este modo, ya que suelen ser esbeltos, flexibles y tienen poca masa que sirva para amortiguar las vibraciones. Lo que puede ocasionar grandes daños estructurales si no se coloca la masa adecuada que pueda absorber estas vibraciones laterales.

Es destacable mencionar el fenómeno del “vortex-shedding”. Originado a causa de las corrientes o vórtices que se generan en los laterales del edificio al incidir un flujo de aire perpendicular a la fachada. El flujo principal al incidir sobre el obstáculo arquitectónico se divide en dos corrientes a cada lado del edificio denominadas vórtices. Cuando el viento alcanza velocidades bajas los vórtices que se originan en los laterales son simétricos en el mismo instante, y por consiguiente el edificio no vibra en la dirección transversal “across wind”. Ahora bien, a velocidades altas del viento, los vórtices que se generan son distintos y se van alternando en el tiempo. Cuando esto ocurre, el edificio experimenta un impulso en el sentido longitudinal “along wind” y un impulso de forma alternativa en el sentido transversal “across wind”, primero en un lado y luego en otro, causando vibraciones en el edificio.

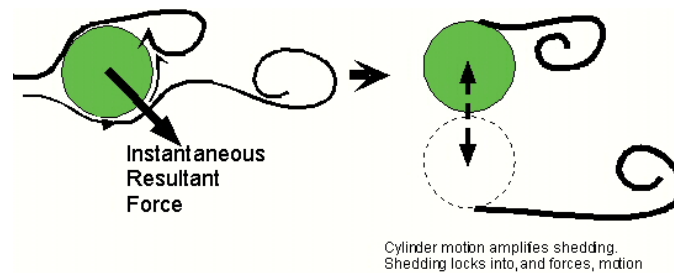


Fig. 2: Esquema del fenómeno “vortex shedding”

Es necesario controlar la excitación producida por el “vortex-shedding”, ya que puede introducir fuertes vibraciones en el edificio que al entrar en resonancia con la frecuencia propia del cuerpo origina los periodos propios del sistema (19), acrecentando la energía cinética de modo considerable.

Una de las maneras para evaluar la respuesta de “across wind” en las estructuras es mediante el método de Saunders y Melbourne (1975). Este método usa la medición del desplazamiento del espectro del “cross wind” para dar un modo generalizado de la gama de fuerzas en el primer modo de vibración:

$$S_f(n) = \frac{(2\pi n_o)^4 m^2 S_y(n)}{H^2(n)}$$

Donde:

S_y(n)= espectro del desplazamiento del “cross wind” en la parte superior del edificio.

n_o= frecuencia del primer modo de vibración.

m= masa modal

H²(n)=acceso mecánico; $1/\{[1 - (n/n_o)^2]^2 + 4\zeta^2 (n/n_o)^2\}$

ζ = ratio crítico de amortiguamiento

La máxima presión y desviación de las corrientes se observa desde el “along wind” (principal dirección del viento). Sin embargo, la máxima aceleración del edificio a la percepción humana e incluso desconfort aparecen desde el “across wind” (dirección perpendicular al viento). La magnitud límite de aceleración que se considera para no sobrepasar el bienestar de los usuarios ha variado a lo largo de los últimos 30 años. La investigación pionera fue de Chen y Robertson (1973) que dieron valiosa información sobre la percepción humana en la función de frecuencia sinusoidal que ocasiona la excitación dinámica del edificio. Hansen en 1973 (20) fue el primero en facilitar resultados subjetivos de personas sometidas a movimientos de baja frecuencia en edificios reales. Extrajo como conclusiones que sólo el 2% de la población puede percibir el movimiento y propuso limitar el valor cuadrático medio de la aceleración a 0.005 g (0.049 m/s²) para un viento con periodo de retorno de 6 años.

Posteriormente Irwin instauró el primer criterio de aceleración que adoptó la ISO 6897. Irwin calibró la curva de límite de percepción del 2% de la población para un período de retorno de 5 años. En ambos estudios se señaló la dependencia existente entre los límites de percepción y la frecuencia de oscilación: disminuye la percepción para frecuencias más bajas.

Davenport propuso dos curvas de aceleración de pico en función de la recurrencia, representando una percepción por el 2% y el 10% de la población. El criterio de Davenport sentó la base de los criterios adoptados por el “Boundary Layer Wind Tunnel Laboratory” (BLWTL) de la Universidad de Ontario Occidental, de aplicación extendida en América del Norte.

Basado en estudios anteriores y en algunos experimentos Melbourne y Cheung (1988) propusieron una expresión para determina el valor de la aceleración por debajo del cual se asegura el confort en los ocupantes de los edificios altos. Esta expresión viene relacionada con la frecuencia del edificio y el período de retorno. Este criterio corresponde a la aceleración máxima admisible en un edificio:

$$\ddot{y} = \sqrt{2 \ln n T} \left(0.68 + \frac{\ln R}{5} \right) \exp(-3.65 - 0.41 \ln n)$$

Donde:

\ddot{y} =aceleración (m/s²)

n= frecuencia de resonancia del edificio.

T=duración de la aceleración (usualmente 600 segundos)

R=período de retorno en años. Definiéndose como la probabilidad de ocurrencia de esta aceleración límite en un periodo de referencia definido R.

La mayoría de las investigaciones sobre percepción humana de movimientos se han presentado en términos del valor cuadrático medio (root-mean-square o rms) de la aceleración, resultado de un fenómeno sostenido en el tiempo. El valor cuadrático medio constituye una representación del valor medio de la intensidad de la aceleración en un período de tiempo. Sin embargo, otros autores afirman que el valor de pico de la aceleración describe mejor la percepción del movimiento, ya que los seres humanos se ven más afectados por eventos extremos y tienden a olvidar la aceleración media.

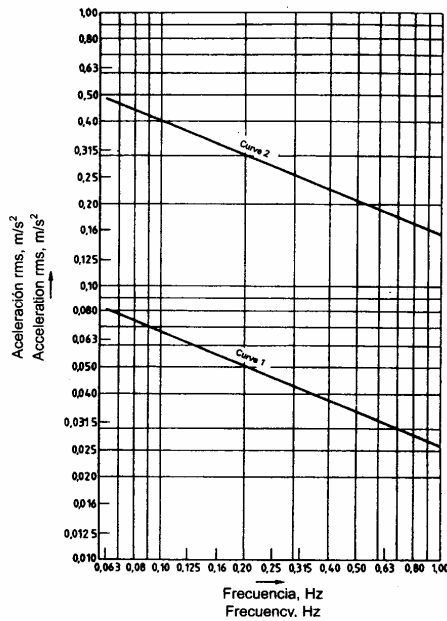


Fig. 3. Aceleraciones rms máximas con un periodo de retorno de 5 años según ISO 6897

La aceleración que ocasiona el movimiento “across wind”, depende directamente de la relación de aspecto (25), del tamaño de la planta y de la densidad media del edificio. Indirectamente también depende de la altura, pues la velocidad del viento es variable según la altura que alcanza el edificio. Este concepto que define la velocidad diferente del viento respecto la altura del edificio es llamado “wind profile” y se refiere a una función cuyos valores son próximos a 0 cerca de la superficie terrestre y tienden a crecer exponencialmente a medida que nos alejamos del suelo.

La magnitud que adquiere el espectro de fuerzas del “across wind” está en función de la reducción de velocidad del viento y de la forma geométrica del edificio.

Otro fenómeno a tener en cuenta es el llamado “one-two punch”, esto es, la excitación transversal a la dirección del viento de la vibración del edificio originada por turbulencias en las zonas de sotavento.

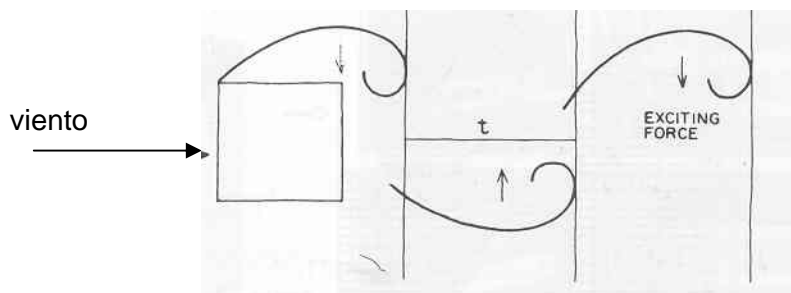


Fig 4: Fenómeno “one-two punch”

La importancia del método experimental que proporcionan los túneles de viento permite conocer la incidencia de alteraciones en la sección con retranqueos y configuraciones de geometría compleja, capaces de amortiguar la vibración.

Distintas maneras de optimizar el trabajo frente al viento son sugeridas por los ensayos aeroelásticos: alteraciones en la configuración general que mejoran la penetración aerodinámica, alteraciones en la sección que afectan al período de vibración, alteraciones en la textura superficial del cerramiento que amortiguan la acción horizontal y sistemas exteriores de descomposición tangencial del viento. A partir de formas irregulares o sistemas altamente texturados de cerramiento se

obtienen zonas de turbulencias, lo que propicia la creación de un colchón aéreo periférico, transformando la energía cinética del viento en calorífica por efecto de la fricción. De esta manera se disipa la energía cinética del viento.

5.2 Modificaciones aerodinámicas en edificios

5.2.1 Ejemplos

A raíz del estudio para el U.S Steel Building de Pittsburg (Harrison, Abramovitz & Abbe) en 1967 se llevan a cabo modificaciones en las esquinas de los proyectos de U. S. Steel Building, el World Trade Center, la United Nations Plaza de Kevin Roche, la obra de Philip Jonson en los primeros años de la década de los setenta, el Bank of Southwest y Banco de Bilbao en Madrid.

Los edificios John Hancock Center (Chicago 1969), Chase Tower (Chicago, 1969) y el Transamerica Pyramid (San Francisco, 1972) son ejemplos de una disminución gradual de la sección en altura. De esta manera las superficies expuestas al viento son menores cuanto más altas se sitúan, mitigando los efectos del viento (7)

El Jim Mao Building (Shangai 1998) y las Torres Petronas (Kuala Lumpur, 1998) agudizan las partes superiores de los rascacielos mediante acabados en punta que le dan un aspecto más escultórico al edificio, a la vez que reducen el peso de la estructura y favorecen la respuesta aerodinámica (8)

Edificios como el Burj Dubai (UAE, 2009) (9) y las Sears Towers (Chicago 1974) varían la forma del edificio en alzado a medida que alcanza altura. De esta manera el comportamiento del viento es diferente según la zona del edificio, lo que minimiza bastante el efecto eólico en todo el conjunto.

Las formas circulares no son tan vulnerables a la presión del viento como los prismas rectangulares. Ali y Amstrong en 1995 (7), comprobaron que una forma geométrica circular, elíptica, cilíndrica, piramidal... proporciona mayor rigidez estructural frente a los empujes horizontales del viento que una forma rectangular. De manera que la presión que ejerce el viento sobre una forma circular se encuentra entre un 20-40% menos que la presión que ejercería el viento sobre un prisma rectangular.

De ahí la aparición de rascacielos como la Marina City Towers (Chicago, 1964) con su forma cilíndrica, el proyecto de la Torre Millenium (Tokio 2009), en forma de cono, el Toronto City Hall (1965) en forma de arcos en planta o la U. S Steel Building Pittsburgh (1970) con la planta triangular.

Leighton Cochran (10) analizó la problemática relativa a los esfuerzos torsores generados en los edificios altos frente a la acción del viento y como la forma de diseño afectaba el cálculo de las estructuras. Cochran afirmó que la mayoría de volúmenes edificatorios contemporáneos presentan el centro de rigidez desplazado respecto al centro de masas. Con la presencia de vecinos altos, el viento ocasiona turbulencias asimétricas alrededor del edificio cuyo centro de rigidez se encuentra desplazado; de manera que se generan esfuerzos torsores importantes. Esta torsión es más significativa en los edificios de planta en arco. El centro de rigidez, (pantallas de hormigón, caja de comunicaciones), suele encontrarse en uno de los extremos. Al incidir el viento perpendicularmente a una de las caras del edificio, genera un momento en planta (fuerza multiplicada por la distancia al centro de rigidez) que puede agravarse con la existencia próxima de edificios altos. Ante la presencia de un

obstáculo próximo, la corriente de aire incidente generará turbulencias y, por consiguiente, posibles presiones en las caras del edificio a estudiar.

Algunas de las modificaciones en la planta y los alzados de los edificios como redondear las esquinas, aparición de chaflanes, corte en las esquinas mitigan considerablemente los efectos del viento. Según Irwin (11) los redondeos de las esquinas en Taipei 101 provocan un 25% de reducción del momento respecto a la planta cuadrada inicial. Los chaflanes de dimensión el 10% de la anchura del edificio provocan el 40% de reducción de la presión longitudinal del viento y el 30% en la presión transversal del viento.

El excesivo redondeo de las esquinas hasta llegar a las formas circulares y cilíndricas mejora la respuesta de los rascacielos frente al viento.

El hecho de menguar los volúmenes arquitectónicos en las partes superiores reduce la frecuencia de la vibración, creciendo la amplitud de onda y por tanto, se reduce el valor máximo del espectro “cross wind”. También decrece la masa del edificio.

A raíz de estudiar tres modelos de edificios diferentes: edificio de planta cuadrada, de planta cuadrada con chaflanes en las esquinas y de planta cuadrada modificada, en el túnel de viento; Melbourne y Cheung llegaron a la conclusión que para reducir las fuerzas transversales del espectro de viento es necesario:

- Tender a formas circulares, partiendo de edificios en forma de prisma rectangular, redondeando o achaflanando las esquinas.
- Estrechar el volumen edificatorio en las partes superiores.
- Introducir huecos en los edificios, especialmente sobre los niveles superiores y cerca de las esquinas puntiagudas.

Los tres modelos presentan similar esbeltezh $h/b=9$. Se modificó el ángulo de incidencia del viento para comprobar la respuesta estructural tanto en las caras como en las aristas de los prismas.

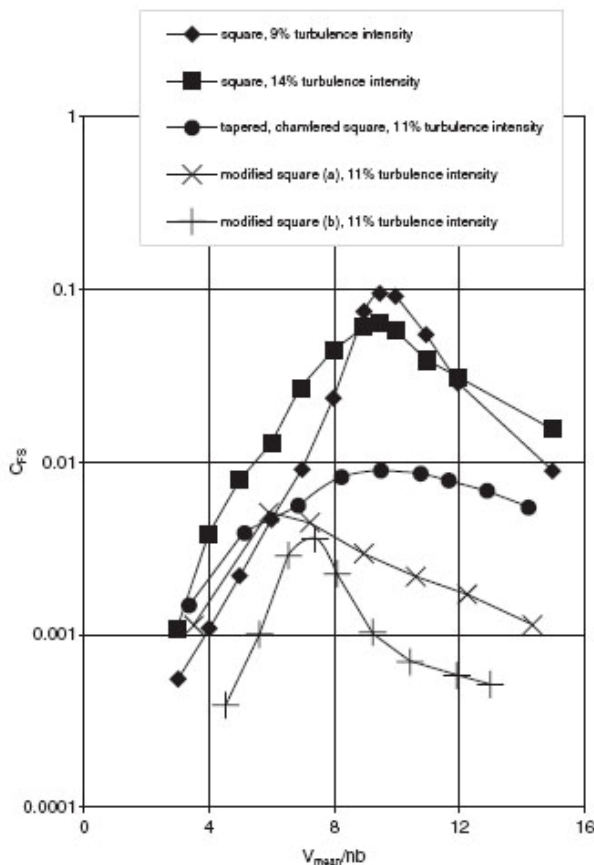


Fig.5: Estudio realizado por Melbourne y Cheung

Las oberturas en la parte superior de los edificios constituyen un modo útil de mejorar la respuesta aerodinámica frente al viento, reduciendo los efectos de la presión transversal del viento y por tanto el llamado “vortex shedding”. El reciente rascacielos, ya finalizado, Shanghai World Financial Center (2008) es un buen ejemplo de ello.



Fig 6: Shanghai World Financial Center, Shanghai

5.2.2 Caso Burj Dubai

Merece especial atención atender al estudio a viento que se llevó a cabo en el diseño del edificio más alto del mundo, todavía en fase construcción, para percatarse en qué punto del desarrollo tecnológico nos situamos en el año 2009.

Burj Dubai situado en el corazón de los Emiratos Arabes Unidos, fue proyectado por el arquitecto norteamericano Adrian D. Smith y desarrollado por el estudio SOM (Skidmore, Owings and Merrill) de Chicago.

Inspirado en la imagen del proyecto de rascacielos de una milla de altura, diseñado por Frank Lloyd Wright, el Burj Dubai consigue sobrepasar los 800 metros de altura, equivalente a media milla.

A pesar que la planta del edificio fue inspirada en la forma geométrica de una flor, la *Hymenocallis* blanca de seis pétalos cultivada en la región de Dubai y en la India, ésta fue concretándose a través de los análisis iterativos a viento en el túnel de viento, optimizándose el diseño hasta la versión final.

Meter A. Irwin, ingeniero especializado en las cargas de viento, fue uno de los encargados en analizar la respuesta del Burj Dubai a viento (22)

El proyecto de Burj Dubai fue estudiado exhaustivamente a viento sometiendo el modelo varias veces al túnel de viento. Inicialmente se utilizó un modelo rígido para obtener una respuesta rápida y general del comportamiento del viento. Se empleó el método Tschanz, 1980, basado en la técnica del equilibrio de las altas frecuencias. Sometido a unas condiciones eólicas también reproducidas a escala como el “wind profile”, velocidad variable del viento según su altura, y turbulencias. Los resultados de estos primeros análisis fueron utilizados para acabar de diseñar el proyecto, se cambió la distribución de la masa y se manipuló el grado de rigidez hasta el deseado.

Posteriormente se desarrolló un modelo aeroelástico a escala 1/500 usando presiones de pico. La maqueta aeroelástica es flexible a semejanza del edificio real, con propiedades escaladas de rigidez, masa y amortiguamiento. Es más preciso el análisis

de modelos aeroelásticos que rígidos, ya que se simula la interacción entre la estructura y el viento. En la maqueta aeroelástica se detectó cierta dependencia de los números Reynolds (23) por lo que se llevó a cabo otra prueba a escala mayor. Se emplearon maquetas más rígidas a escala 1/50 de la parte superior del rascacielos obteniéndose números elevados Reynolds. De esta forma se solucionaron los problemas de escala que presenta el análisis de los túneles de viento.

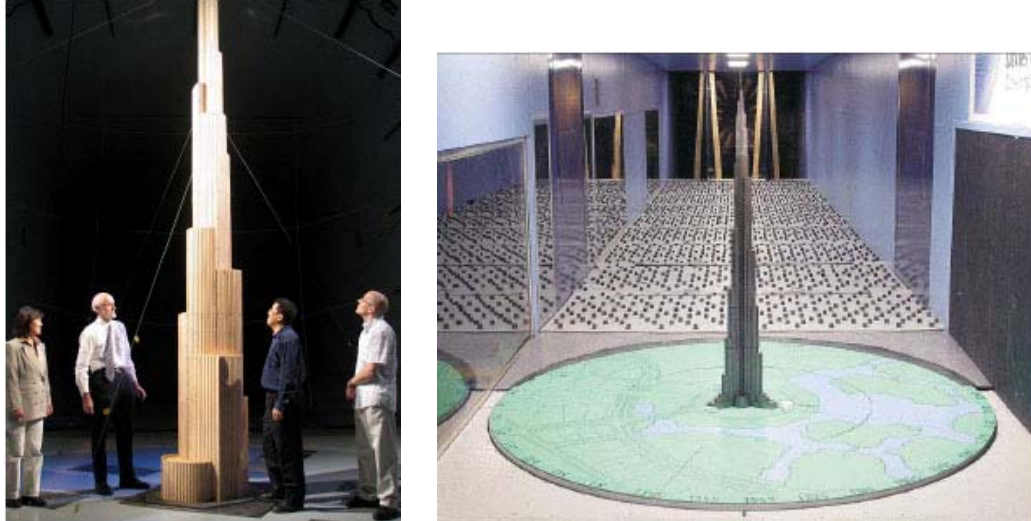


Fig. 7: Maqueta rígida a escala 1/50 de la parte superior del edificio y maqueta aeroelástica a 1/500 situada en el túnel de viento.

El túnel de viento utilizado en las escalas 1/500 abarca una superficie de 2.4x1.9m y de 4.9x2.4m y se encuentra en Guelph, Ontario. Con la maqueta 1/50 el análisis por túnel de viento se realizó en el Nacional Research Council de Canadá, estudiando una superficie de 9x9m, el viento alcanzó velocidades superiores a 55m/s.

La estadística aplicada al viento jugó un papel importante para predecir el periodo de retorno del rascacielos. El Burj Dubai no cuenta con uso suplementario de amortiguadores, ya que prevé una aceleración en la parte superior, dentro del criterio de confort estipulado. Sin embargo, la aguja que remata el edificio es bastante esbelta y todavía se está estudiando si será necesario colocar sistemas de amortiguamiento suplementarios.

Se analizaron otros factores como la presión local del viento en la piel del edificio y la velocidad de éste alrededor de la base del edificio y en las terrazas de varios niveles. Para predecir el espectro de viento que se originaba a nivel de la calle, determinando así el confort de los transeúntes, se construyó una maqueta aeroelástica a escala 1/250 y se sometió al túnel de viento. Se combinaron estos resultados con datos estadísticos locales sobre la presión y el clima. Para el confort de los usuarios se consideraron dos aspectos: el efecto de las fuerzas mecánicas del viento y el confort térmico (temperatura del aire, humedad relativa y radiación solar).

La planta tiene esencialmente seis direcciones importantes en las que incide el viento. Tres de las cuales corresponde cuando el viento sopla directamente a las alas y otras tres entre ellas. Se comprobó que a igualdad de velocidad, el impacto que origina el viento sobre un pétalo o ala es menor que incidiendo entre ellos.

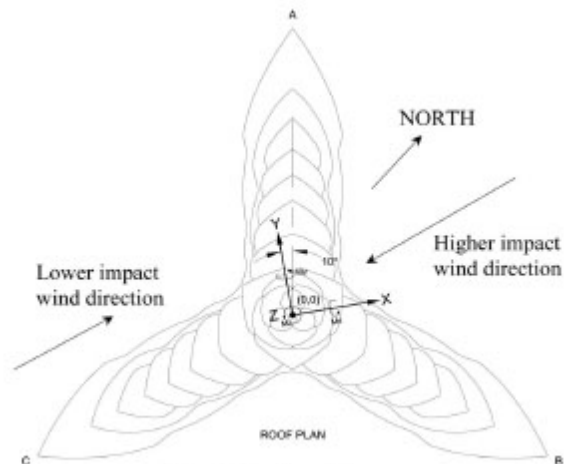


Fig. 8: Vista del Burj Dubai en construcción y planta del edificio.

En la forma en planta se tuvo en cuenta las tres direcciones fuertes del viento en Dubai, esto es, noroeste, sur y este. De manera que se orientó los pétalos de la “flor” que emula la planta arquitectónica en las direcciones pésimas del viento,

Después de los numerosos estudios a viento realizados para la culminación del edificio más alto del mundo Peter A, Irwin extrajo la siguiente conclusión:

Los resultados extraídos de maquetas aeroelásticas producen resultados más bajos de presión y aceleración del viento que los análisis con modelos rígidos. Esto es debido al efecto de los números Reynolds en el método del equilibrio de fuerzas que proporciona la prueba con maquetas rígidas, y a la respuesta estructural de la maqueta aeroelástica; ya que tiene en cuenta el amortiguamiento.

Parece ser que la simulación de CFD sólo fue llevada a cabo para mostrar el sistema de ventilación del aparcamiento de los niveles subterráneos. Johnson Controls/Novenco BV fue quien llevó a cabo el análisis fluidodinámico, estudiando el movimiento de las partículas de monóxido de carbono del aparcamiento. Realizó también estudios relativos a la velocidad del aire interior, la temperatura y el humo en caso de incendio.

Sin embargo, a pesar de ser el edificio más alto jamás construido, no se tiene constancia que se recurriera a la informática para estudiar la influencia del viento.

6. ARQUITECTURA

6.1 Geometría de los edificios en altura

Los primeros rascacielos de la escuela de Chicago se caracterizaban por formas prismáticas rectangulares. El primer Wisconsin Bank Building en Wisconsin (1973) o el Lake Shore Drive Apartments en Chicago de Mies Van der Rohe (1951) son ejemplos claros del rascacielos paralelepípedo. Realizados principalmente con materiales de acero y vidrio. A medida que pasaron los años y cuando el capital económico lo permitió, el rascacielos empezó a conquistar alturas mayores y tornarse más esbelto y complejo. La complejidad geométrica se acrecentaba en la medida que los materiales de las fachadas y sus superestructuras evolucionaban.

Un factor decisivo en la libertad formal ha sido el gran avance informático de los modelos en 3D, con la consecuente facilidad de visualizar geometrías poco convencionales. Ahora bien, el reto de las escuelas de arquitectura en los últimos años ha sido inculcar el papel auténtico que debe desempeñar la estructura en la arquitectura.

La estructura no debe entenderse como un ente fuera del diseño que hace posible el levantamiento de una geometría concreta sino que debe constituir parte de él. Tal como reconoció Ali en 1990 (26): la armonía entre estructura y forma arquitectónica es la clave del éxito en el diseño.

En el campo aerodinámico, como se ha mencionado en los apartados anteriores, la forma juega un papel fundamental. Ya que ésta influye directamente en el comportamiento general del edificio a viento, maximizando o minimizando los esfuerzos.

Gracias al mejor conocimiento de las acciones y al avance tecnológico desarrollado en el campo de las estructuras y la construcción, ha sido posible la aparición de una segunda generación de rascacielos. Estas nuevas tipologías en su forma disciernen mucho del concepto inicial de prisma puro.

Karen Vollers (27) en el año 2008 llevó a cabo un estudio extensivo de la morfología de la segunda generación de los rascacielos. Se percató que hasta la fecha no se había realizado ninguna clasificación de formas no ortogonales.

Las geometrías de la segunda generación de los rascacielos no siguen fórmulas matemáticas puras, nacen simplemente de los comandos de los programas de dibujo: rotar, mover, simetría, escalar...

Vollers subdividió los edificios no ortogonales en dos grandes familias. A la primera pertenecen los volúmenes donde se han manipulado simplemente líneas rectas y superficies planas.

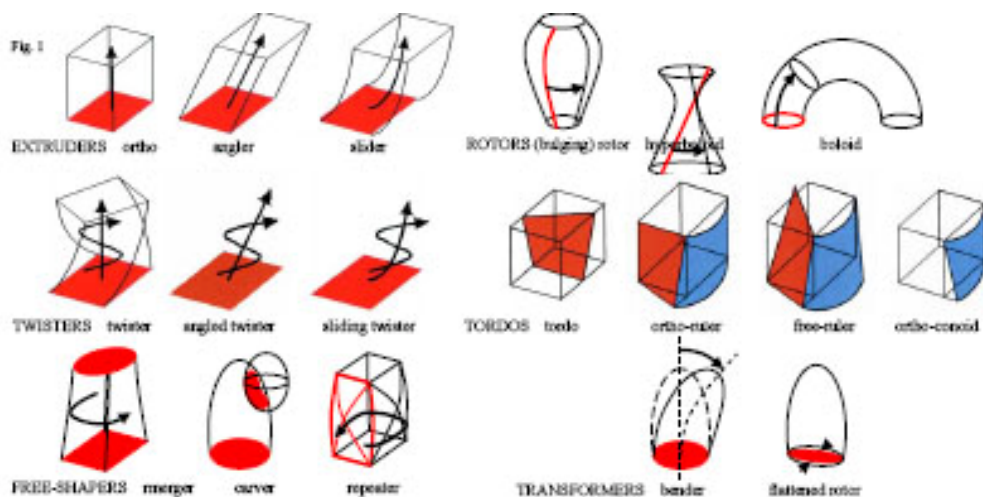


Fig. 1: Clasificación de formas según Vollers

La segunda familia más compleja, utiliza una modelización paramétrica del software, incluye los siguientes tipos:

a) “Extruders”. Surgen de la extrusión de una superficie siguiendo una directriz recta, inclinada o curvada. Ejemplos: Gazprom en San Petersburgo (Herzog De Meuron), Dancing Towers en Dubai (Zara Hadid) The Legs en Abu Dhabi (Aedes)

b) “Rotors” Generados por la rotación de una curva, una recta o un círculo. Ejemplos: Swiss Re en Londres (Foster & Partners), Westhafen Tower en Frankfurt (Schneider Schumacher) y la Torre Agbar en Barcelona (Jean Nouvel)

c) “Twister” Rotación de un cuerpo ortogonal alrededor de un eje ortogonal, inclinado o curvado. Ejemplos: Turning Torso en Malmö (Calatrava), Infinity Tower en Dubai (SOM) y Fordham Spire, Chicago (Calatrava)

d) “Tordos” Estructura ortogonal con una o varias caras torsionadas. Ejemplos: Ocean Heights One residencial tower, Dubai (Aedes) y Avaz Twist tower en Sarajevo (ADS Studio).

e) “Free-shapers” Surgen de la composición libre de varias geometrías. Opus, Dubai (Hadid) y Tower, Perú (M.Ferri)

g) “Transformers” Transformación de una forma geométrica simple mediante la manipulación de sus caras y aristas. Ejemplos: Dostyk Business Centre, Almaty, Kazakhstan (NBBJ) y Caribbean, Keppel Bay, Singapur (Libeskind)

La mayoría de los proyectos pertenecen a los dos últimos grupos “Free-shapers” y “Transformers”. Hay que decir que las formas más complejas han quedado sólo en proyectos, todavía sin construir.



Fig. 2: Dancing Towers en Dubai (Zara Hadid), Swiss Re en Londres (Foster & Partners), Turning Torso en Malmö (Calatrava). Ejemplos de “Extruder”, “Rotor” y “Twister”



Fig 3: Avaz Twist Tower en Sarajevo (ADS Studio), Opus, Dubai (Hadid), Dostyk Business Centre, Almaty Kazakhstan (NBBJ). Ejemplos de “Tordo”, “Free shappers” y “Transformers”.

David Scott, David Farnsworth, Matt Jackson y Matt Clark (28) realizaron un estudio en el año 2007 sobre las consecuencias de una geometría compleja en un rascacielos.

Se analizaron torres inclinadas y torsionadas, revisando los problemas estructurales que derivan de la geometría.

El principal problema que presentan las formas inclinadas es el momento causado por la excentricidad de las cargas de gravedad a sumar con el momento de vuelco provocado por el viento. Una de las soluciones consiste en situar el centro de masas directamente sobre la base del edificio. Para ello, será necesario jugar con las variables relativas a la densidad de los materiales o rotar ligeramente la forma en su base. Una segunda consideración a tener en cuenta es asegurar la transmisión de cargas lo más verticalmente posible. Esto puede ser llevado a cabo limitando el número de pilares inclinados añadiendo voladizos. El tercer aspecto a considerar es el uso de la simetría. Las estructuras simétricas tienden a equilibrarse, de manera que podría equilibrarse la carga de los pilares inclinados por otros orientados simétricamente. Las estructuras inclinadas se deben diseñar teniendo en cuenta estos tres conceptos para garantizar su estabilidad. Un ejemplo es la Torre de Comercio del Songdo Northeast Asia.

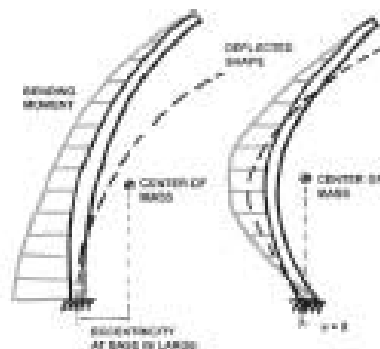


Fig. 4: Minimización del momento flector al centrar la masa del edificio sobre el centro de la base de soporte

Los rascacielos torsionados presentan el problema si el núcleo central de soporte del edificio debe estar también torsionado o no. Siguiendo el sentido común es más aceptable creer en un núcleo vertical y unos forjados que giran alrededor de él. Los pilares por situarse siguiendo la forma torsionada ya originan fuerzas adicionales sobre el núcleo. Por eso, es necesario sobredimensionar el núcleo para aumentar la rigidez o colocar pantallas de cortante que colaboren con la estabilidad del conjunto.

Como la fuerza torsional es proporcional a la inclinación de cargas que bajan por los pilares, se recomienda variar la magnitud de la torsión con la altura.

David Scott, David Farnsworth, Matt Jackson y Matt Clark analizaron la misma estructura pero tres modalidades distintas: primer modelo núcleo torsionado y pilares torsionados, segundo modelo núcleo vertical y pilares radiales y tercer modelo pilares torsionados que se contrarrestan entre sí.

Las conclusiones fueron que a esfuerzo axial, se obtienen en los tres casos cargas muy parecidas, presentando el modelo 2 (núcleo vertical y pilares radiales) una cierta reducción de la carga axial en relación a los otros dos modelos.

El momento torsor es únicamente resistido por el núcleo central. El modelo 2 (núcleo vertical y pilares radiales) dada su geometría, no sufre a momento torsor, por tanto, es la solución más económica.

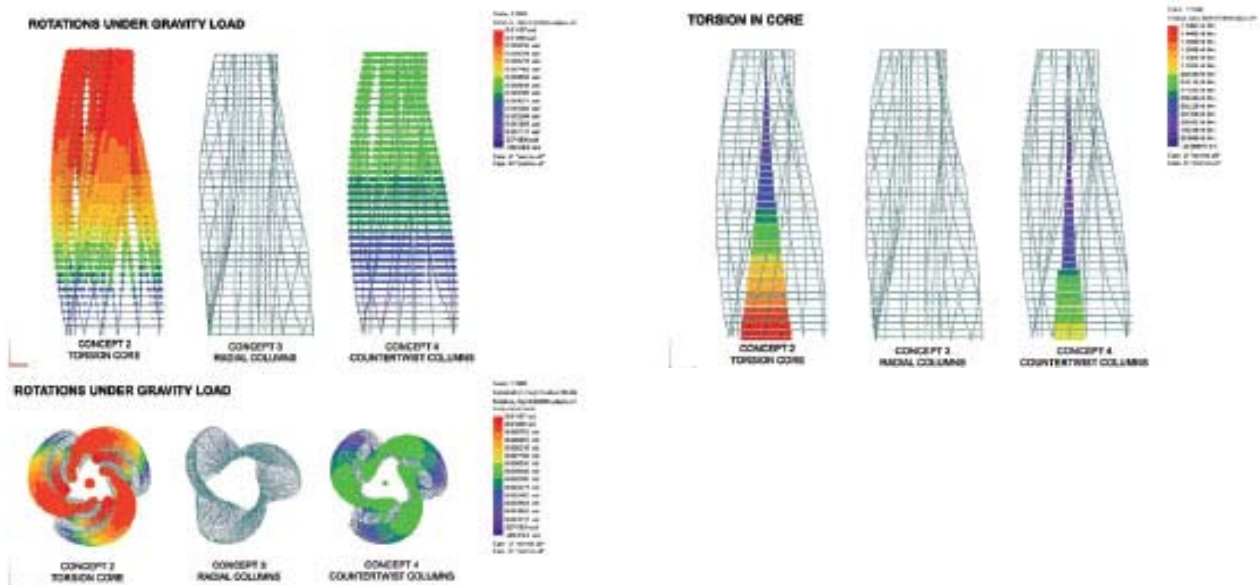


Fig. 5: Modelos 2, 3 y 4 analizados según la carga de gravedad y la torsión que presentan en el núcleo central.

En la bajada de cargas de gravedad a cimentación, se producen rotaciones en todo el alzado en los modelos 1 (núcleo torsionado y pilares torsionados) y 3 (pilares torsionados que se contrarrestan entre sí). La disposición de los pilares del modelo 3 sirve para reducir las rotaciones experimentadas en el caso del modelo 1. El modelo 2 (núcleo vertical y pilares radiales) no sufre a torsor por la disposición simétrica y alineada de los pilares con el núcleo.

En el estudio a viento de los rascacielos la predicción de cargas horizontales y verticales juega un papel muy importante en la seguridad estructural. Las acciones que afectan a un edificio dependen en gran medida de la geometría del edificio (la relación de aspecto (25), la forma de la sección...) y de las propiedades dinámicas que presenta la estructura (frecuencias y formas modales, ratios de amortiguamiento, excentricidad...). Por este motivo es muy importante el papel que desempeña el diseñador en la geometría y en la elección del tipo de estructura. Este conjunto forma-estructura debe acoplarse y trabajar conjuntamente para minimizar en lo posible el efecto que ocasionan las cargas exteriores a viento y las cargas interiores de gravedad.

7. ESTADO DEL ARTE

La simulación numérica del movimiento de los fluidos (CFD) y su interacción con modelos de edificios aerodinámicos tiene sus inicios en la década de los años 80 del siglo pasado. A continuación se menciona una serie de documentos e investigaciones que muestran el desarrollo evolutivo de la materia hasta nuestros días.

-HIRT CW, RAMSHAW JD, STEIN LR, *Numerical simulation of three-dimensional flow past bluff bodies*. Comput Methods Appl Mech Eng 1978;14(1):93-124.

Fue uno de los primeros artículos dedicados a la simulación del viento sobre volúmenes en 1978. Se presenta un modelo simple de elementos finitos que interacciona con cuerpos de línea aerodinámica:

-HANSON T, SMITH F, SUMMERS D, WILSON CB. *Computer Simulation of wind flow around buildings*. Comput Aided, Des 1982; 14(1):27-31

Primera comparación entre la herramienta informática y el comportamiento empírico. Balance de los resultados obtenidos por la simulación numérica del aire en movimiento y los proporcionados por el túnel de viento. Data de 1982

-MURAKAMI S, MOCHIDA A. *Three-dimensional numerical simulation of turbulent air flow around a cubic model by large eddy simulation*. J Wind Eng Ind Aerodynamics 1987;25: 291-305.

-MURAKAMI S, MOCHIDA A, *Three-dimensional numerical simulation of turbulent air flow around buildings by means of the $K-\epsilon$ turbulence model*. Buildings Environ 1989: 24:51-64

-MURAKAMI S, MOCHIDA A, HAYASHI Y *Examining the $K-\epsilon$ model by means of a wind tunnel test and large-eddy simulation of turbulence structure around a cube*. J Wind Eng ind Aerodynamics 1990: 35:87-100

-MURAKAMI S, *Comparison of various turbulences models applied to bluff body*. J Wind Eng ind Aerodynamics 1993:46-67:21-36

-MURAKAMI S, *Current status and future trends in computational wind engineering*. J Wind Eng ind Aerodynamics 1997:67-68:3-34

Estos tratados hacen referencia a la demostración de cómo el LES (large eddy simulation), gran remolino de simulación, lleva a resultados más precisos que no empleando modelos que contemplen las variables $K-\epsilon$ (modelo RNG). A pesar del esfuerzo informático y la memoria necesaria del ordenador para procesar los cálculos. El método LES y el modelo RNG constituyen técnicas numéricas utilizadas para resolver las ecuaciones diferenciales que gobiernan la mecánica de fluidos para flujos turbulentos.

-SELVAM RP *Computation of pressure on Texas Tech building* J Wind Eng ind Aerodynamics 1992;43:1619-27

-SELVAM RP *Computation around Texas Tech building using $K-\epsilon$ and kato Launder $K-\epsilon$ turbulence model.* Eng Struct 1996:18 (11:856-60)

-SELVAM RP *Finite element modelling of flow around a circular cylinder using LES* J Wind Eng ind Aerodynamics 1997:67-68:129-38

-MOCHIDA A, MURAKAMI S, SHOJI M, ISHIDA Y. *Numerical simulation of flowfield around Texas tech building by large eddy simulation* J Wind Eng ind Aerodynamics 1993:46-47:455-60

-HE J, SONG CCS. *A numerical study of wind flow around the TTU building and the roof corner vortex.* Wind Eng ind Aerodynamics 1997:67-68:547-58

-SENTHOORAN S, LEE T-D. *Parameswaran SA computational model to calculate the flow-induced pressure fluctuations on buildings.* J Wind Eng ind Aerodynamics 2004: 92(13):11 31-45

Diversas investigaciones numéricas llevadas a cabo para el edificio Texas Tech University (TTU) en los años comprendidos entre 1992 y 2004. Este edificio ha sido tomado como punto de referencia para evaluar el grado de fiabilidad del CWE, ya que cuenta con una vasta documentación en el campo de las mediciones del túnel de viento.

-GADILHE A. JANVIER L. BARNAUT C. *Numerical and experimental modeling of the three-dimensional turbulence wind flow through an urban square.* Wind Eng ind Aerodynamics 1993: 46-47:755-63

Primera simulación de la incidencia del viento, a nivel urbano, en una plaza semicircular en el centro de Nantes, Francia, año 1993.

-STATHOPOULOS T. BASKARAN BA *Computer simulation of wind environmental conditions around buildings.* Eng Struct 1996:18(11):876-85

Análisis de una manzana de edificios en Montreal, Canadá, en el año 1996

-HUANG S, LI QS, XU S *Numerical evaluation of wind effects on a tall steel building by CFD.* J Construct Steel Res 2007,63. 612-27

Estudio de la incidencia del viento en el edificio CAARC mediante un software comercial de CFD. Se determinan coeficientes aerodinámicos y modelos de flujos alrededor del edificio.

-STATHOPOULOS T. BASKARAN BA. *Boundary treatment for the computation of three-dimensional wind flow conditions around a building.*

J Wind Eng ind Aerodynamics 1990:35:177-200

-SONG CCS, HE J. *Computation of wind flow around a tall building and the large-scale vortex structure.* J Wind Eng ind Aerodynamics 1993;46-47:219-28

-TOMINAGA Y, MOCHIDA A. MURAKAMI S, SAWAKI S. *Comparison of various revised $K-\epsilon$ models and LES to flow around a high-rise building model with 1:1:2 shape placed within the surface boundary layer.* J Wind Eng ind Aerodynamics 2008:96:389-411

Simulación del comportamiento del viento sobre edificios altos entre los años 1990-2008

- ESMAILI, O *Wind Flow Effects on a 56-Story Tall Building and its Surrounding Environment.* et al. ISSN 0784408106 pp 1-9

Crítica de la construcción de rascacielos en las zonas urbanas por el desconfort ocasionado a los transeúntes al analizar por CFD la incidencia de un edificio de 56 pisos, rodeado por tres rascacielos más de 36 pisos cada uno.

-KITSON M, MORAN H *Swiss Re Headquarters Inside & Out* HVAC Industry. London, 2000

Aplicación del CFD para predecir la presión del viento de las superficies en el exterior del edificio 30 St. Mary Axe. También se realizan análisis para determinar la ventilación interior y exterior, y el movimiento de las masas de aire caliente entre los pisos.

-SWADDIWUDHIPONG S, KHAN MS. *Dynamic response of wind-excited building using CFD*. J sound Vib 2002; 253(4): 735-54

Estudio de la interacción entre fluido-estructura mediante análisis aeroelásticos.

-BURNETT J, MILORAD B, YIK F. *Wind-induced pressure at external surfaces of a high-rise residential building in Hong Kong* Building and environment 2005:40 765-777

Análisis de la presión del viento en un bloque de viviendas de 30 pisos en Hong Kong mediante análisis CFD. El objetivo es promover la ventilación cruzada. Se estudia la presión del viento sobre las fachadas y el movimiento del flujo a través de la disposición de ventanas.

-ORTEGA CORNEJO M, LACOMA ALLER LM, HOLMAN DM *Análisis de acciones de viento en edificios singulares. Aplicación al Hotel Vela de Barcelona*. Hormigón y acero 2009; 60, 251, 37-64

Comparación del coeficiente de arrastre obtenido en el túnel de viento y el que resulta de la aplicación de los modelos de partículas, rama del análisis de CFD. Demostrando el análisis de CFD como una herramienta más coherente que el túnel de viento. El edificio estudiado ha sido el Hotel Vela de Barcelona.

8. VIABILIDAD DEL ESTUDIO

Existe amplia investigación sobre técnicas de CFD aplicadas en los edificios para modelizar corrientes de aire internas, ventilación, movimiento de masas de aire caliente y frío, confort de los transeúntes, propagación del fuego y el humo, esto último en caso de incendio.

Sin embargo, son pocos los documentos que analizan la acción del viento en el exterior de los rascacielos mediante el empleo de CFD. Si bien, el túnel de viento ha sido el que ha desempeñado este papel a lo largo de los últimos cuarenta años, parece ser que existe hoy una incipiente tendencia a analizar el viento por data numérica, aunque sólo sea para corroborar resultados con los datos empíricos. Como los llevados a cabo por Ortega Cornejo, Lacota Aller y Colman (29) en el Hotel Vela de Barcelona.

El hecho evidente que los rascacielos van aumentando en esbeltez y altura exige un estudio que indique criterios para escoger la forma más aerodinámica y el sistema estructural que mejor se adecue.

No consta ningún estudio de esta índole mediante análisis en CFD. Como se ha descrito en el capítulo 5: Aerodinámica, los ensayos e investigaciones sobre la forma óptima a viento fueron desarrollados en base a resultados obtenidos por el túnel de viento. Con las consecuentes limitaciones, ya mencionadas en el capítulo 2, apartado 2.3 Alcances y límites.

Por todos estos motivos, se cree viable esta investigación.

9. METODOLOGÍA

Hasta ahora esta tesina ha presentado los tres campos de interacción: Ingeniería, Aerodinámica y Arquitectura. Se han mostrado algunas intervenciones concretas en obras arquitectónicas para mejorar la respuesta aerodinámica, modificando la geometría inicial. También se han presentado varios sistemas estructurales, cuyo comportamiento se adecua en altura a las cargas horizontales.

Sin embargo no existe ningún estudio sistemático que catalogue las formas geométricas puras según su aerodinamismo, en edificios superiores a 300m. A la vez que no existe ningún criterio para evaluar el sistema estructural idóneo según la geometría.

A la vez que crece el afán por conquistar alturas mayores, se cree necesario poseer el conocimiento que garantice la forma geométrica del rascacielos con mejor comportamiento a viento. Una vez escogida la forma más aerodinámica y estimado el tipo de cargas que se originan en la piel del edificio, sería conveniente discernir qué modelo estructural responde mejor al sistema. Malogradamente esta tercera fase que corresponde al campo de la ingeniería estructural no ha podido ser desarrollada en el presente escrito, pudiendo realizarse en el futuro como tesis doctoral.

Para ello, se propone un estudio detallado de cinco torres de geometrías diferentes, pero comparables, sometidas al flujo de aire en movimiento.

Con la confianza depositada en los programas informáticos de simulación fluidodinámica, cuya respuesta se cree más detallada y precisa que el túnel de viento, se ha realizado la siguiente investigación.

9.1 Elementos a analizar.

Se han escogido cinco torres de diferente geometría, llamadas: cono, rotor, hiperboloide, prisma rectangular y prisma rectangular torsionado. Las bases de los tres primeros corresponden a círculos de 100m de diámetro. En los prismas la base es un cuadrado de 100m de arista. La altura es de 600 metros, se ha tomado este valor y estas geometrías, ya que representan las alturas y las tendencias de los rascacielos construidos en los últimos años.

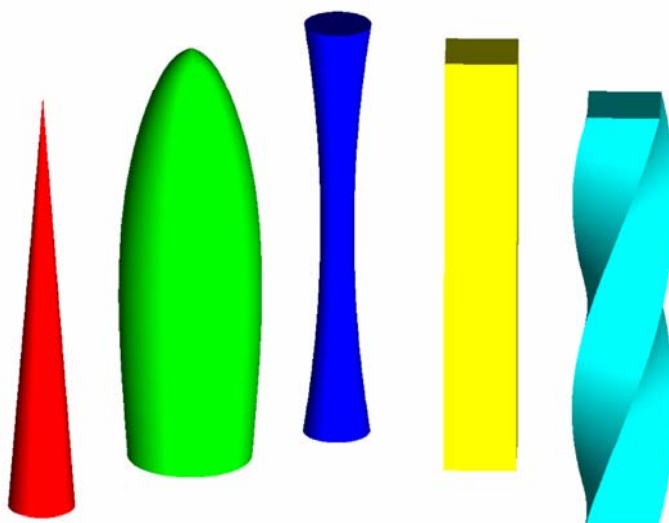


Fig. 0: Cono, Rotor, Hiperboloide, Prisma rectangular, Prisma torsionado

Cada uno de los modelos comparados presenta la misma esbeltez:

$$\lambda = \frac{\text{altura}}{\text{base}} = \frac{600m}{100m} = 6$$

En la tabla 9.1 se muestran las siguientes áreas de referencia S_{ref} (“reference area” y “shadow area”) de los volúmenes. Este concepto designa la superficie originada al seccionar la torre por el centro geométrico de la figura, perpendicular al ángulo de incidencia del viento (en cuerpos “bluff bodies”, considerados todos los edificios) (30)

Geometría	S_{ref} (m²)	AR $[h^2 / S_{ref}]$
Cono	30.000	12000.000
Rotor	58.012	6205.612
Hiperboloide	40.189	8957.674
Prisma rectangular	60.000	6000.000
Prisma torsionado	76.503	4705.697

Tabla 1: Datos geométricos

Destaca el prisma torsionado como el volumen con más área de referencia y el cono como el menor:

Para asegurar que la comparación entre los modelos sea estrictamente aerodinámica, es decir, obtener la efectividad de la forma geométrica en sí misma a viento, se utilizan los coeficientes aerodinámicos.

Estos coeficientes proceden de las ecuaciones de Bernoulli. Las cuales fueron expuestas por Daniel Bernoulli en su obra Hidrodinámica en (1738). Partió del principio que la región exterior de un cuerpo sometido a un fluido ideal no presenta viscosidad, ni rozamiento. Siendo p , la presión estática del fluido, U la velocidad de éste y ρ_a su densidad, estableció la siguiente igualdad:

$$p + \frac{1}{2} \rho_a U^2 = a$$

Igualando la expresión a a , un valor constante.

De esta manera formuló el conocido principio de Bernoulli: “En un fluido ideal (sin viscosidad, ni rozamiento) en régimen de circulación la energía que posee el fluido permanece constante a lo largo de todo su recorrido”. Esta energía es la cinética y la del propio fluido.

El primer sumando refleja la energía del fluido contenida debido a la presión estática que posee. El segundo sumando hace referencia a la energía cinética del flujo, debida a la velocidad, presión dinámica. Si el fluido está quieto, el segundo sumando se anula (ya que la dinámica del fluido es 0), reduciendo la expresión a:

$$p = a$$

Presión estática constante. El rascacielos no se moverá, a pesar de estar envuelto por la presión interna del aire, el cual produce presiones iguales en todas las caras del

volumen, contrarrestándose entre sí, sin generar movimiento. De ahí el nombre de estático.

Del concepto dinámico del fluido surgieron los coeficientes aerodinámicos. Los cuales relacionan la fuerza de interacción del fluido, su energía cinética con el área de referencia o área frontal. Esta área como se ha explicado anteriormente no es necesariamente el área sobre la cual actúa la fuerza, sino que corresponde a la sección central.

$$C_f = \frac{F}{\frac{1}{2} \rho_a U^2 S_{ref}}$$

C_f = coeficiente aerodinámico

ρ_a = densidad del fluido

U = velocidad del fluido

S_{ref} = área de referencia

Este coeficiente asegura una razón entre la fuerza y la dimensión de la forma geométrica. De manera que a mayor volumen, mayor área de referencia y por tanto mayores fuerzas actuarán sobre su amplia superficie. Sin embargo, el coeficiente aerodinámico será el mismo que un volumen de igual geometría pero menores dimensiones. En la superficie menor incidirán menos fuerzas, pero a su vez, la sección frontal también será menor.

Matemáticamente el coeficiente aerodinámico es la función que computa las variables F(fuerza) y U (velocidad) de un fluido para una determinada forma.

Según si la fuerza a analizar es paralela a la dirección de incidencia del viento, considerada el eje x, o perpendicular a ella, eje z, se determinará la correspondiente sección de referencia. Ésta se obtendrá de los ejes x o z, y será perpendicular a la dirección del viento a estudiar.

$$C_x = \frac{F}{\frac{1}{2} \rho_a U^2 S_z} \qquad C_z = \frac{F}{\frac{1}{2} \rho_a U^2 S_x}$$

Otro concepto a tener en cuenta que permitirá la comparación entre los diferentes modelos es el número de Reynold.

Este número adimensional caracteriza el tipo de fluido: laminar o turbulento.

Para un número de Reynold bajo ($Re < 5 \cdot 10^5$) indica que el fluido depende en gran medida de las fuerzas viscosas. Por lo tanto indica que el tipo de fluido es laminar, es decir, a partir del punto de estancamiento "stagnation point"(31), el fluido se separará con relativa rapidez, dejando libre un amplio volumen detrás del cuerpo llamado estela.

Por el contrario un número elevado Reynold ($Re > 5 \cdot 10^5$) indica que el fluido tiene gran energía, es turbulento. El fluido después del punto de estancamiento rodeará el cuerpo, manteniéndose próximo a la superficie. El punto de separación aparecerá más

tarde que para un fluido laminar y su estela será más reducida que la que presenta un fluido laminar.

$$\left(\text{Re} = \frac{\rho U L}{\mu} \right) = \frac{\text{Fuerzas convectivas}}{\text{Fuerzas viscosas}}$$

Re = número de Reynold

ρ = densidad del fluido

L = distancia entre las caras de barlovento y sotavento

μ = coeficiente de viscosidad

Para un determinado fluido, la densidad ρ y el coeficiente de viscosidad μ son constantes. Con lo cual, el número de Reynold depende de la velocidad del fluido y la longitud o distancia entre las caras de barlovento y sotavento del cuerpo expuesto. De ahí el típico problema de escala que presentan las maquetas de los túneles de viento. Si un edificio se reproduce a una escala relativamente pequeña, la profundidad del cuerpo L será reducida y dará un número de Reynold bajo. Esto puede ocasionar una lectura errónea del fluido, ya que un número de Reynold bajo induce a creer en un fluido tipo laminar, sin turbulencias. Cuando en la realidad, la L del cuerpo es suficientemente grande para originar un número Reynold alto, mostrando la existencia de un fluido turbulento. En ese caso, será necesario revisar el carácter turbulento del viento y el tipo de presiones que origina éste en la estructura del edificio.

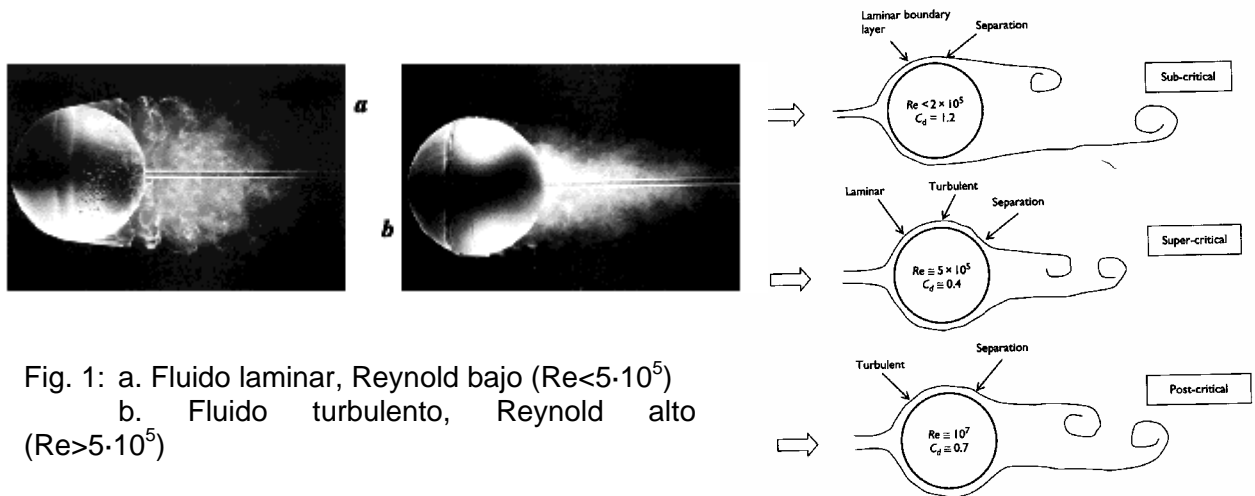


Fig. 1: a. Fluido laminar, Reynold bajo ($Re < 5 \cdot 10^5$)
 b. Fluido turbulento, Reynold alto ($Re > 5 \cdot 10^5$)

Además del número de Reynold, el comportamiento de un fluido viene caracterizado por la intensidad de las turbulencias: T_u

Un nivel bajo de turbulencias tiene el mismo comportamiento que un fluido laminar. Si el aire no presenta disturbios, el fluido es más estructurado y se caracteriza por una lectura ordenada. En las partes altas de los rascacielos, el viento suele ser de carácter laminar, ya que no suele haber encontrado ningún obstáculo anteriormente.

Si la intensidad de las turbulencias es más alta, el fluido se presenta desordenado. Tiene el mismo comportamiento que los fluidos turbulentos que señala el número de Reynold elevado. La intensidad alta de turbulencias aparece en las partes bajas de los rascacielos, donde las edificaciones vecinas devienen obstáculos afectando a la estructura inicial del viento.

9.2 Casos

Para el análisis de las cinco torres de estudio, se han propuesto los siguientes dos casos:

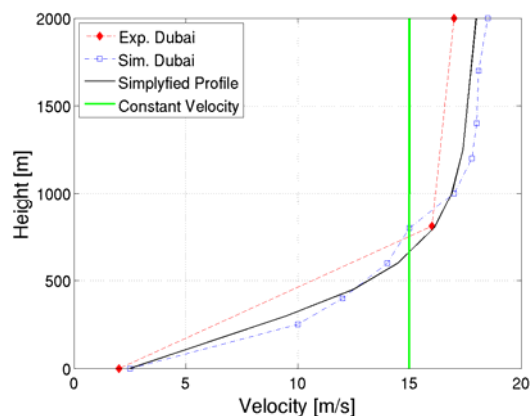
Número de caso	1	2
T_u	0.1%	1%
U (m/s)	U constante 15	U constante 15

Tabla 2: casos realizados en las cinco geometrías

La intensidad de las turbulencias T_u para el caso 1 corresponde a un nivel bajo: 0.1%. Y es quizás el caso que más se aproxima a la realidad, ya que los rascacielos por su altura, se encuentra en estratos de aire no distorsionados. El caso 2 ha sido llevado a cabo con una intensidad T_u más elevada, 1%.

La intensidad de las turbulencias se mide en tanto por ciento. Es un valor tomado de la experiencia. A modo de ejemplo, las turbinas, compresores y máquinas de intercambio de calor originan intensidades muy altas de turbulencias, consideradas entre el 5-20%. Los valores entre 1-5% corresponde a intensidades medias de ocasionadas por los fluidos que pasan a velocidades bajas a través de tuberías o conductos de ventilación. La intensidad es relativamente baja para los casos en los que las turbulencias aparecen por la incidencia de un fluido sobre un cuerpo. Es el caso de las turbulencias en el aire formadas alrededor de los coches, aviones o edificios. La intensidad medida está por debajo del 1%.

La velocidad del viento considerada U ha sido de 15m/s. Este valor corresponde a la velocidad más alta que puede alcanzar el viento en un edificio de 600 metros de altura en las latitudes de Oriente Medio (32).



Gráfica1: Modelo de velocidad variable según altura para la ciudad de Dubai

Se ha escogido esta parte del planeta como objeto de estudio, ya que la mayoría de los rascacielos previstos para los próximos 10 años se realizarán en esta zona, según la investigación de Philip Oldfield (33). Sin embargo, se ha querido analizar una de las torres, el cono, con la velocidad del viento considerada para el norte de España, según la normativa vigente CTE-2006, DB-SE, de 29m/s. Por lo tanto, además de los dos casos anteriores, se ha considerado un tercer caso exclusivamente para la geometría cono:

Número de caso	3
T_u	0.1%
U (m/s)	U constante 29

Tabla 3 Caso realizado únicamente en la geometría cono

A causa de la utilización de un software propio de la rama de aeronáutica, y del límite de tiempo impuesto para llevar a cabo esta tesina no ha sido posible evaluar las torres según la velocidad variable del viento respecto la altura, esto es, el “wind profile”. Por eso, la velocidad U del fluido considerada es constante (15 o 29m/s según el caso) en toda la altura. Esta es una gran simplificación de la fuerza del viento que modela el viento sin efectos viscosos a nivel del suelo.

9.3 Métodos informáticos

9.3.1 Software utilizado

El software de CFD utilizado ha sido EDGE. 4.1.0 (34). Este programa ha sido desarrollado por el centro de investigación Agencia de Defensa Sueca, “Totalförsvarets forskningsinstitut” (FOI). Se ha usado un esquema de tiempo determinado con intervalos de 0,05 segundos con el fin de obtener una solución convergente, que nos muestre la tendencia del comportamiento del fluido. Las turbulencias se modelizan con el modelo k- ω acoplado a la expresión algebraica del modelo de tensión de Reynold: W&J EARS+Hellsten k-omega (35). Las simulaciones se han llevado a cabo usando fluidos turbulentos, debido a los números de Reynold comprendidos entre 10-103 millones.

Este programa trabaja con modelos de turbulencias muy avanzados. Para velocidades superiores a Mach0.3 (0.3 veces la velocidad del fluido partido por la velocidad del sonido) el fluido se comprime. Sin embargo, el programa presenta limitaciones con bajos rangos de velocidades de fluido, ya que fue diseñado especialmente para la aeronáutica, y no para la aerodinámica de los edificios.

El software EDGE constituye el pre-procesador y el solucionador. Para el pos-procesador se recurre al PARAVIEW.

Los cálculos de CFD han sido realizados en los ordenadores de la Universidad “Kungliga Tekniska högskolan” de Estocolmo. Desde Sant Cugat del Vallés se envió a Estocolmo un archivo con todos los casos a analizar y variables definidas. Este archivo se denominó matriz de importación. Una vez en Estocolmo, el “script mkcfd”, leyó la matriz de importación e inició el pre-procesador del EDGE. El solucionador o “solver” resolvió las ecuaciones establecidas por el pre-procesador, obteniéndose resultados a ser interpretados por el pos-procesador. Conectados los ordenadores españoles con la red sueca se descargaron los archivos del pos-procesador. De esta manera se ha tenido acceso al resultado de los análisis de CFD.

9.3.2 Malla numérica

Para el modulado computacional de fluidos se ha generado una malla volumétrica usando la herramienta comercial ICEM CFD (36). Estas mallas están formadas por elementos tetraédricos y prismáticos, estos últimos cerca de la piel del edificio para resolver con detalle la interacción entre cuerpo-fluido. En las regiones donde se preveían grandes presiones (próximas a los ángulos o esquinas de las geometrías), se redefinieron los elementos de la malla, discretizándolos todavía más, para obtener resultados más precisos.

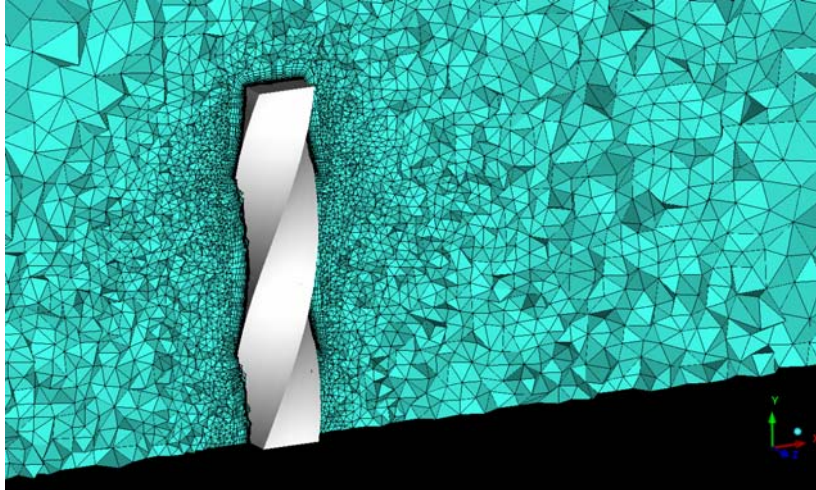


Fig. 2: Sección del volumen de malla del prisma torsionado

La tabla 4 muestra el número de elementos que constituye cada una de las mallas para el análisis de los cinco rascacielos:

Geometría de la torre	Número de elementos mallados
Cono	2.8 Millones
Rotor	2.6 Millones
Hiperboloide	3.6 Millones
Prisma rectangular	5.6 Millones
Prisma torsionado	4.7 Millones

Tabla 4. Número de elementos mallados del fluido alrededor de cada geometría

En general, los volúmenes con mayor número de ángulos presentan mayor discretización de la malla. Excepto, el prisma torsionado. El cual, tuvo que reducirse el número de elementos, ya que sobrepasaba los límites adecuados para el correcto funcionamiento del programa, incrementando considerablemente el tiempo de cálculo.

Por lo tanto, se advierte que los resultados obtenidos para el prisma torsionado no presentan la misma veracidad que el resto de los análisis. Se ha usado menor resolución de la malla, esto es, “course mesh”

9.3.3 Condiciones de límite

Como se ha mencionado anteriormente, la velocidad del viento es constante, despreciando las fuerzas de carácter viscoso que se dan cerca de la superficie del suelo.

Aunque se realiza la simplificación de la fuerza del viento cerca de la superficie del suelo, no se simplifica la velocidad del fluido en la cara de la piel del edificio. Se considera que la velocidad en el punto de contacto con la cara del rascacielos es 0, y ésta va creciendo a medida que se aleja de la superficie.

El programa considera un fluido ubicado en una semiesfera de radio 2000Km. El edificio de análisis es levantado en el eje de coordenadas 0,0,0 que se sitúa en el centro de dicha semiesfera. De manera que se evalúa el comportamiento del viento a una distancia máxima de 2000km respecto el rascacielos, algo imposible de analizar en un túnel de viento.

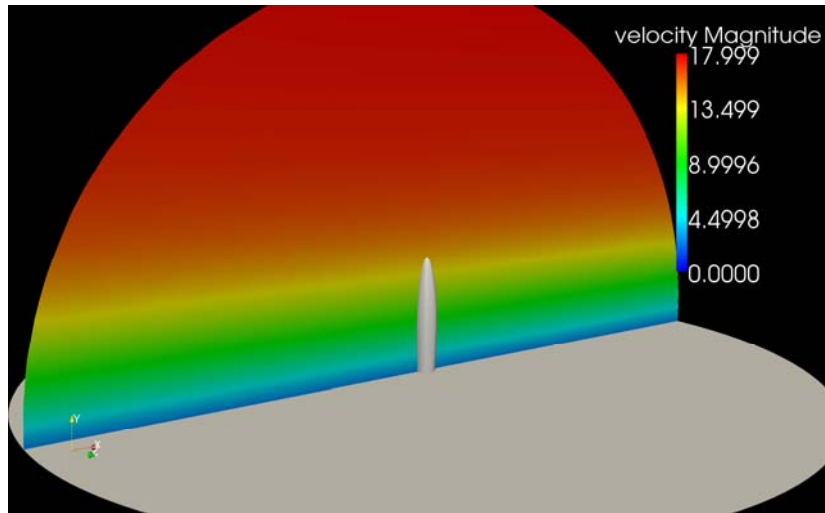


Fig. 3: Sección del campo de afectación del fluido que muestra la velocidad variable en altura para el edificio Rotor. No se han realizado cálculos con velocidad variable.

9.4 Resultados

9.4.1 CONO

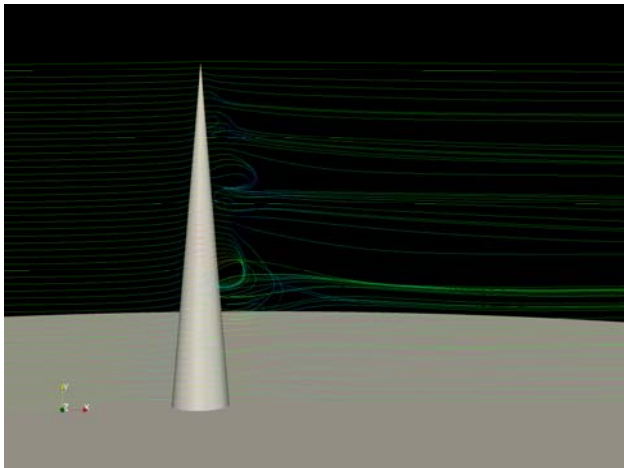


Fig. 4. Trazas de las corrientes

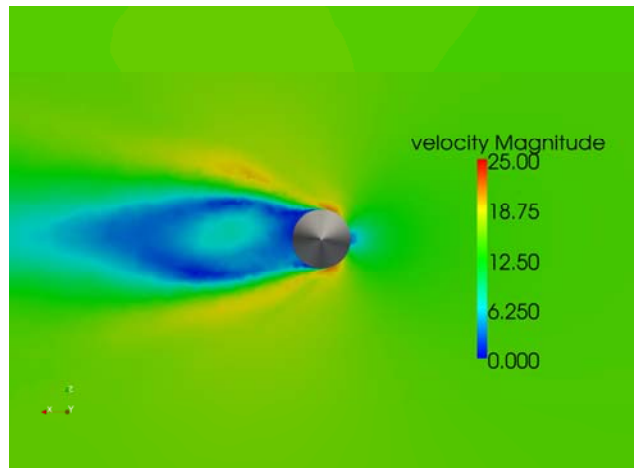


Fig. 5. Velocidad del fluido. Vista en planta

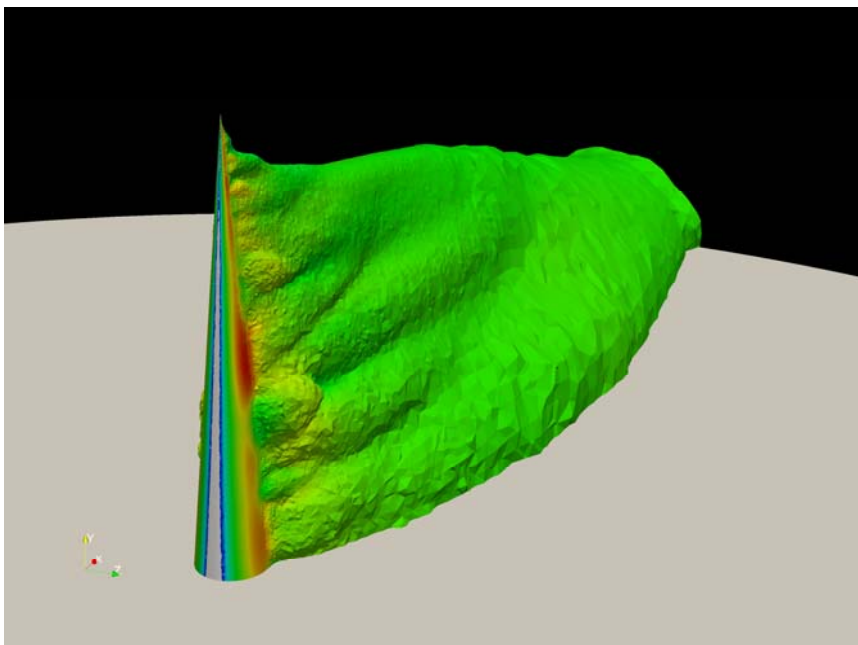


Fig.6
Representación del volumen de la estela "wake", muestra la energía cinética de las turbulencias

Al realizar el CFD de la torre en forma de cono, destaca los vórtices que se generan en las 3 dimensiones del espacio (Fig.4). Del flujo incidente en un plano, éste deriva en varios vórtices a lo largo de toda la altura, es decir, la geometría propicia un efecto en 3 dimensiones.

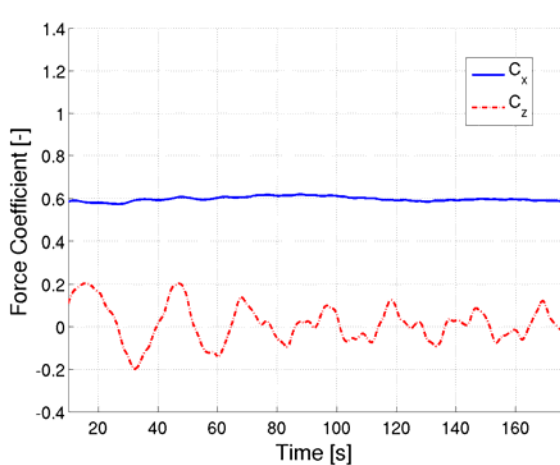
De la (Fig.5) se extraen las siguientes conclusiones:

- En el centro de la estela se manifiesta una zona de color azul celeste con velocidad 6.25m/s respecto al resto de estela de velocidad nula. Esto muestra la existencia de vórtices en puntos diferentes de altura. Visibles desde la vista en planta.
- Es difícil catalogar el carácter del fluido, ya que el punto de separación se encuentra entre los puntos de separación característicos de un fluido turbulento y de un fluido laminar. Dada esta situación crítica, es difícil predecir el comportamiento del fluido.
- Los vórtices generados a lado y lado del cono son asimétricos. Problema de la aparición del fenómeno de excitación transversal “vortex shedding”.

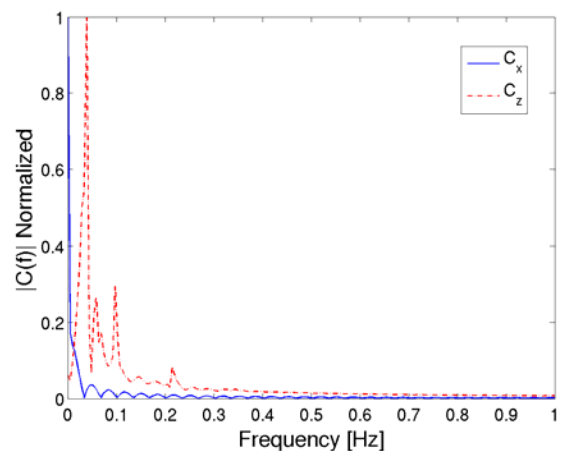
Para el caso 1, en el que la U es 15m/s y la T_u es 0.1%, se obtienen los siguientes resultados:

Cono	F_x (N)	F_z (N)	M_x (Nm)	M_z (Nm)	C_x (-)	C_z (-)	f (Hz)
Valor Medio	4.394e+06	-5109	-6.67e+06	-9.04e+08	0.5978	-0.00069	-
Máxima amplitud	1.875e+05	1.486e+06	2.176e+08	4.547e+07	0.02551	0.2022	0.039

Tabla 5: Fuerzas y momentos en el cono para el caso 1



Gráfica 2: Coeficientes de fuerza según el tiempo. Para $T_u=0.1\%$ y $U=15\text{m/s}$



Gráfica 3: Espectro de frecuencias de los coeficientes de fuerza para $T_u=0.1\%$ y $U=15\text{m/s}$

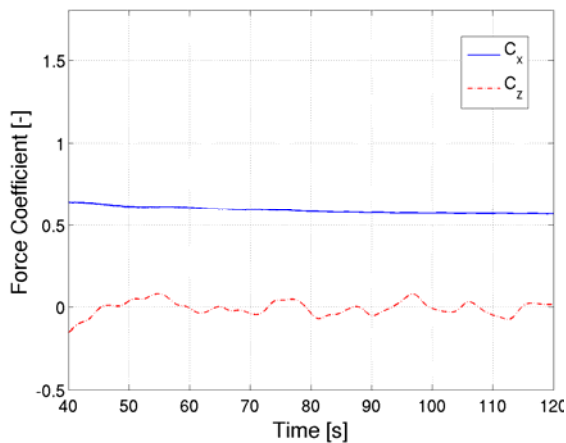
Para bajas turbulencias, caso 1, el coeficiente C_z presenta muchas variaciones en el tiempo. Esto es debido que nos encontramos con un área de estela mayor y por tanto, mayores fuerzas de presión internas, F_z . Esto puede acarrear el fenómeno ya mencionado “vortex shedding”, el cual es muy perjudicial para la estructura del edificio.

Como la intensidad de las turbulencias es baja, el punto de separación del fluido se encuentra antes que para otros casos de turbulencias mayores, con lo cual, se generan dos vórtices importantes a cada lado del cuerpo, de velocidad alta, como puede verse en la (fig.5). Estos vórtices se caracterizan por una frecuencia baja y un periodo alto, de gran amplitud.

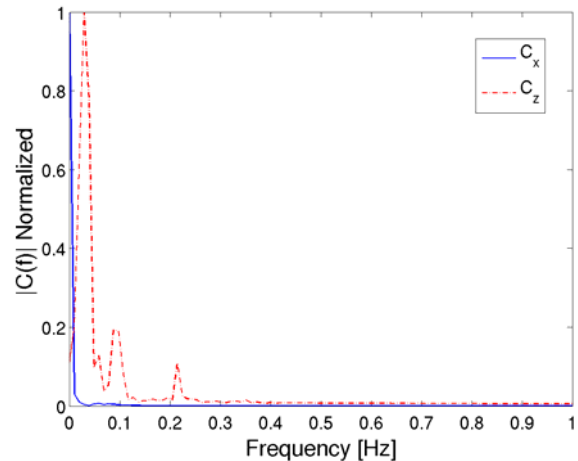
Para el caso 2, en el que la U es 15m/s y la T_u es 1%, se obtienen los siguientes resultados:

Cono	F_x (N)	F_z (N)	M_x (Nm)	M_z (Nm)	C_x (-)	C_z (-)	$F(H_z)$
Valor Medio	4.261e+06	1.202e+04	-5.9e+06	-8.884e+08	0.5798	0.001635	-
Máxima amplitud	2.758e+05	6.572e+05	1.848e+08	2.502e+07	0.03752	0.08941	0.029

Tabla 6: Fuerzas y momentos en el cono para el caso 2



Gráfica 4: Coeficientes de fuerza según el tiempo. Para $T_u=1.0\%$ y $U=15\text{m/s}$



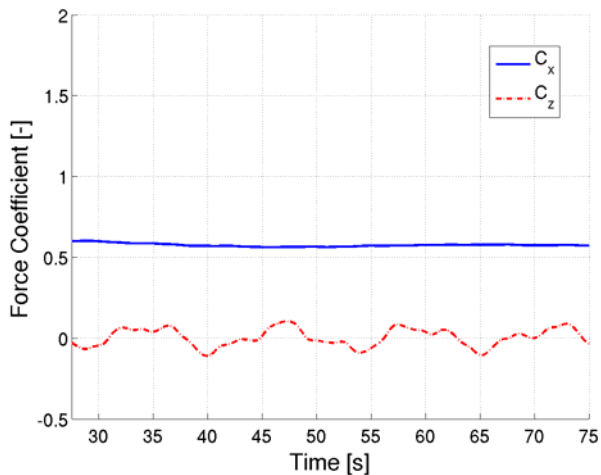
Gráfica 5: Espectro de frecuencias de los coeficientes de fuerza para $T_u=1.0\%$ y $U=15\text{m/s}$

Al considerarse la intensidad de las turbulencias relativamente alta, el punto de separación del fluido se retrasa, apareciendo en la zona trasera del cuerpo, Esto conlleva una zona de estela más reducida y por tanto, fuerzas de presión F_x menores en la gráfica 4 que en la gráfica 2, adquiriendo más importancia las fuerzas viscosas F_z . La amplitud es más baja y la frecuencia más alta en el caso 2 que en el caso 1, tal y como muestran las gráficas 4 y 5 comparadas con las gráficas 2y 3.

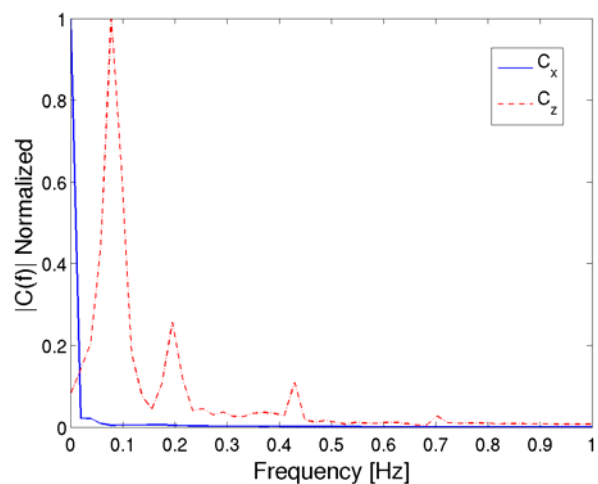
Para el caso 3, en el que la U es 29m/s, variable con la altura, y la T_u es 0.1%, se obtienen los siguientes resultados:

Cono	F_x (N)	F_z (N)	M_x (Nm)	M_z (Nm)	C_x (-)	C_z (-)	$F(H_z)$
Valor Medio	8.909e+06	3.973e+04	5.438e+06	-1.83e+09	0.5765	0.002571	-
Máxima amplitud	3.833e+05	1.735e+06	3.616e+08	7.067e+07	0.02481	0.1122	0.078

Tabla 7: Fuerzas y momentos en el cono para el caso 3



Gráfica 6: Coeficientes de fuerza según el tiempo. Para $T_u=0.1\%$ y $U=29\text{m/s}$



Gráfica 7: Coeficientes de fuerza según el tiempo. Para $T_u=0.1\%$ y $U=29\text{m/s}$

Al colocar la velocidad típica del norte de España, de los resultados se obtuvo una disminución de la amplitud del coeficiente C_z respecto al análisis con velocidad constante de 15m/s . Por tanto, menos amplitud, menos peligro del “vortex shedding” y mayor frecuencia. Ésta última debe ser revisada en relación a la frecuencia propia del edificio con el fin de evitar la frecuencia de resonancia.

Hay que señalar que fueron más costosos los cálculos llevados para conseguir la velocidad variable de 29m/s , con lo cual, el tiempo de análisis y que muestra la gráfica 6 fue hasta los 75 segundos, a diferencia, de los 160 segundos analizados para el caso 1, gráfica 2.

Al comparar las acciones inducidas por un viento de velocidad 15m/s constante, gráfica 3, y uno de velocidad variable 29m/s , gráfica 7; destaca un incremento de frecuencia en el viento de 29m/s .

Si comparamos estos datos de frecuencias obtenidos con la frecuencia propia de un edificio podremos evaluar el rango de posibilidades que existe para alcanzar la frecuencia de resonancia del sistema.

A grosso modo se ha realizado un cálculo simplificado de la frecuencia propia de un edificio de similares dimensiones a las tipologías de análisis. Los cálculos dinámicos del edificio se han realizado como un sistema de un grado de libertad.

Considerando un edificio de base circular de radio exterior 50m y grosor de las paredes de 0.5m . Se ha calculado el momento de inercia correspondiente para una sección anular, de tubo circular hueco.

$$I_x = I_y = \frac{\pi(R_e^4 - R_i^4)}{4} = 12088.99 \text{ m}^4$$

Para el cálculo del punto de resistencia de la figura se obtienen los valores medios F_x y M_z de la tabla 5. Al dividirlos entre sí resulta el brazo mecánico “d” y punto de aplicación de la integración de todas las fuerzas elementales.

$$d = \frac{M_z}{F_x} = \frac{-9.04e+08}{4.394e+06} = 205.73m$$

Se simplifica el edificio a una ménsula de hormigón HA-45, de 600metros de longitud con una sección cuyo momento de inercia es $12088,99m^4$ y con una fuerza media de $F_x= 4.394e+06$ N, aplicada en el punto de resistencia de la figura, que corresponde a la altura de 205.73metros, aproximadamente 1/3 parte de la altura total del edificio. Con estos datos se calcula el desplazamiento total, aproximadamente de 13cm.

Para conocer la rigidez global “K” de la estructura, siendo δ el desplazamiento en metros y F_x la fuerza en Newtons

$$K = \frac{F_x}{\delta} = \frac{4.394e+06}{0.13} = 33800000N / m$$

Una vez conocida la rigidez, podemos despejar las siguientes ecuaciones que nos dan el periodo “T” y la frecuencia “f” propia del edificio. Como masa total del edificio “M” se ha estimado 830000 toneladas:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{M}{K}} = 2\pi\sqrt{\frac{830000000}{33800000}} = 31.13s$$

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{311.35} = 0.0321Hz$$

La máxima amplitud de la frecuencia del fluido, según la tabla 5 es de 0.039Hz Y el valor obtenido por la frecuencia propia de un edificio de dimensiones similares es de 0.0321Hz. Esto indica que es muy posible que se produzca la frecuencia de resonancia, perjudicial para la integridad del edificio. Con lo cual, habrá que estudiar en profundidad el sistema estructural del edificio y buscar soluciones de diseño, relativas a la distribución de la masa, que amortigüen este efecto.

9.4.2 ROTOR

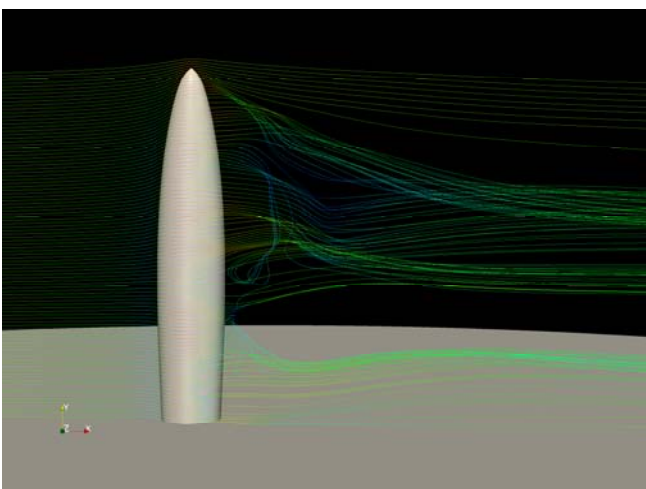


Fig.7: Trazas de las corrientes

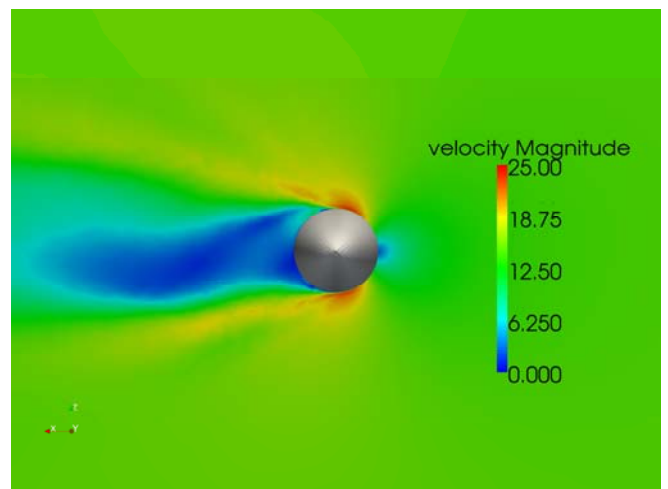


Fig.8: Velocidad del fluido. Vista en planta

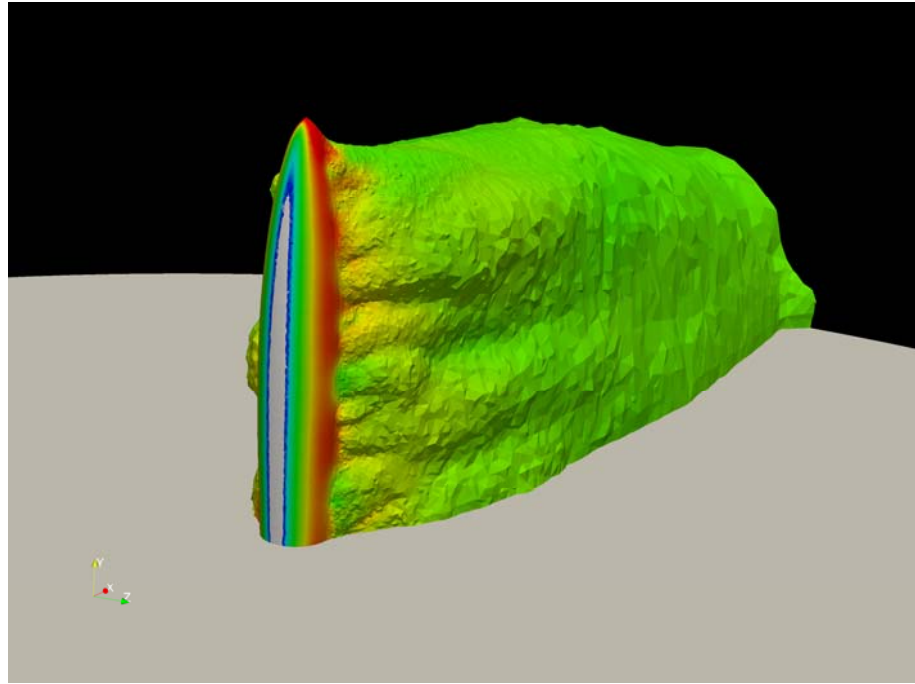


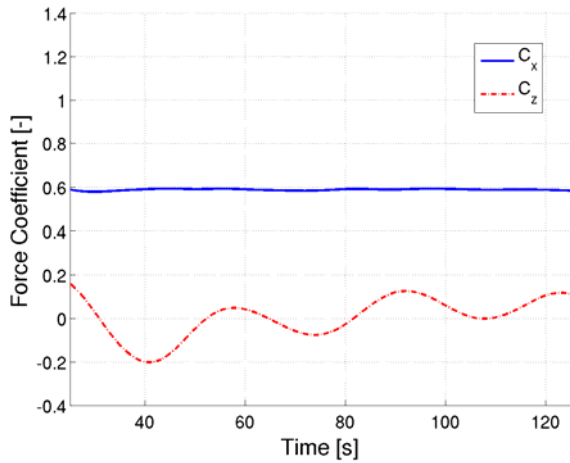
Fig. 9. Representación del volumen de la estela “wake”, muestra la energía cinética de las turbulencias

Tal y como se muestra en la Fig.7, aparecen más vórtices en la parte trasera del edificio. Sin embargo, los datos de la gráfica 8 y de la Tabla 8 muestran una amplitud del coeficiente C_z menor que para el caso del cono. Lo que da a pensar que a pesar del número elevado de vórtices que se generan en la fachada de barlovento, estos no tienen la suficiente energía para inducir el movimiento “vortex shedding”. Seguramente estos vórtices pasan a diferente tiempo y diferente espacio, contrarrestándose entre sí.

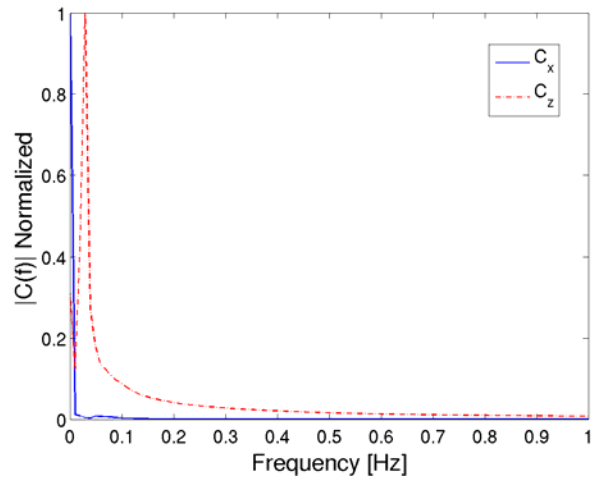
Para el caso 1, en el que la U es 15m/s y la T_u es 0.1%, se obtienen los siguientes resultados:

Rotor	F_x (N)	F_z (N)	M_x (Nm)	M_z (Nm)	C_x (-)	C_z (-)	$F(H_z)$
Valor Medio	8.36e+06	4.403e+05	-1.715e+08	-2.391e+09	0.5882	0.03098	-
Máxima amplitud	7.79e+04	1.534e+06	7.724e+08	5.775e+07	0.005481	0.1079	0.029

Tabla 8: Fuerzas y momentos en el rotor para el caso 1



Gráfica 8: Coeficientes de fuerza según el tiempo. Para $T_u=0.1\%$ y $U=15\text{m/s}$

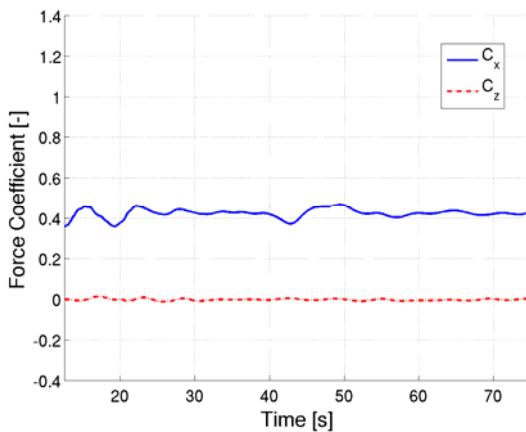


Gráfica 9: Espectro de frecuencias de los coeficientes de fuerza. Para $T_u=0.1\%$ y $U=15\text{m/s}$

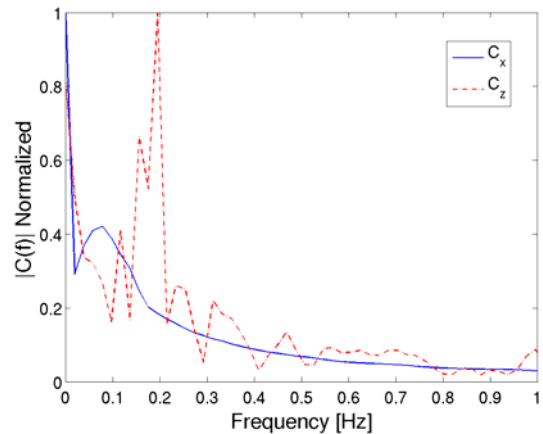
Para el caso 2, en el que la U es 15m/s y la T_u es 1% , se obtienen los siguientes resultados:

Rotor	F_x (N)	F_z (N)	M_x (Nm)	M_z (Nm)	C_x (-)	C_z (-)	$F(H_z)$
Valor Medio	$6.03\text{e}+06$	$-5.736\text{e}+04$	$-1.214\text{e}+07$	$-1.641\text{e}+09$	0.4242	-0.00403	-
Máxima amplitud	$7.613\text{e}+05$	$1.296\text{e}+05$	$8.307\text{e}+07$	$2.041\text{e}+08$	0.05356	0.009122	0.2

Tabla 9: Fuerzas y momentos en el rotor para el caso 2



Gráfica 10: Coeficientes de fuerza según el tiempo. Para $T_u=1.0\%$ y $U=15\text{m/s}$



Gráfica 11: Espectro de frecuencias de los coeficientes de fuerza. Para $T_u=1.0\%$ y $U=15\text{m/s}$

Según muestra el gráfico 10, el coeficiente C_x experimenta destacables fluctuaciones. Visibles en la Fig.8 en la cual se puede percibir el movimiento ondulatorio de la estela, vinculada a la magnitud que adquiere el coeficiente C_x .

9.4.3 HIPERBOLOIDE

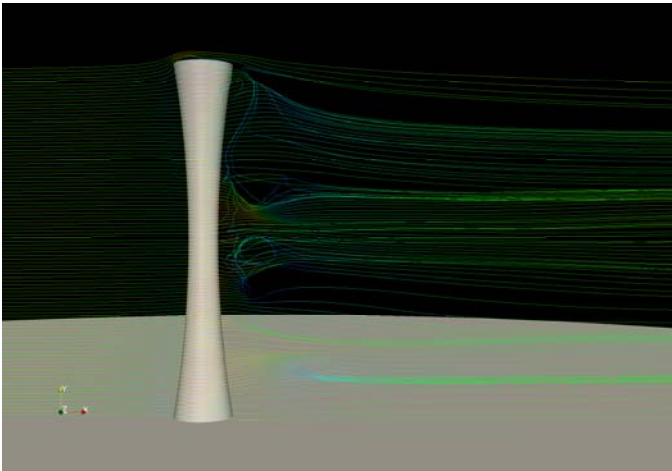


Fig.10: Trazas de las corrientes

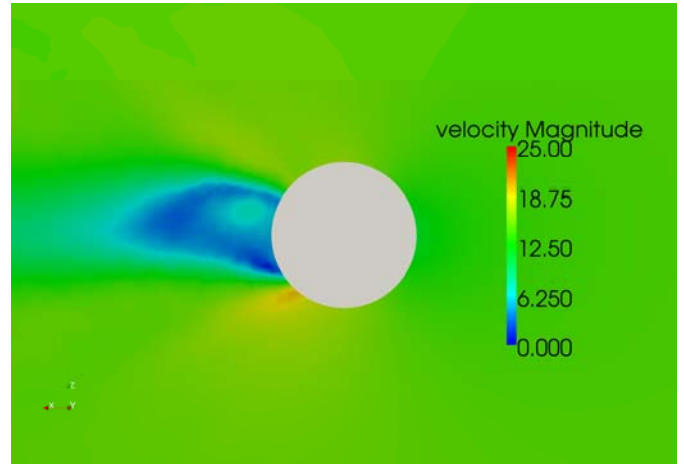


Fig.11: Velocidad del fluido. Vista en planta

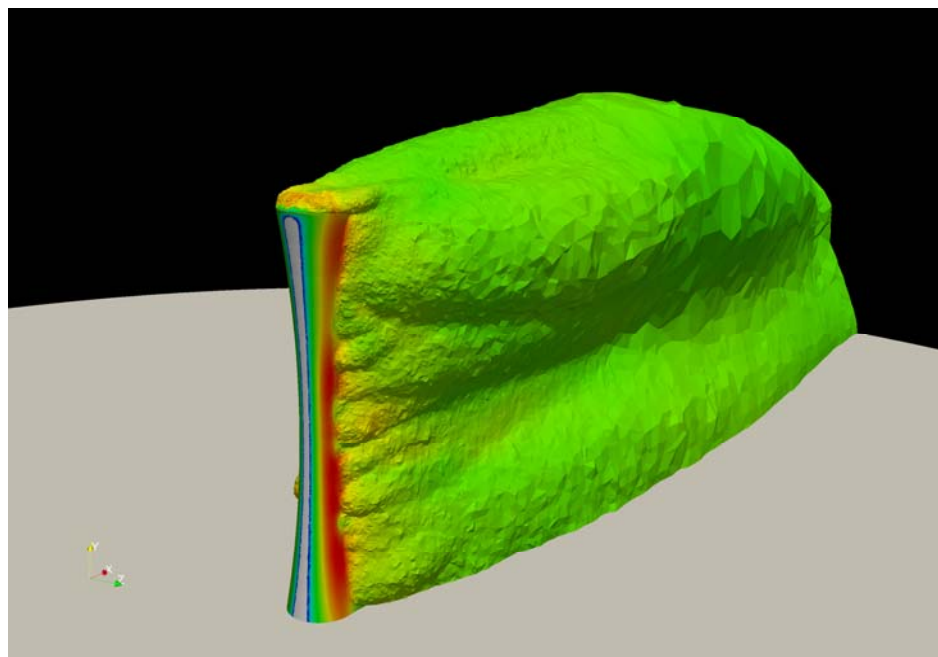
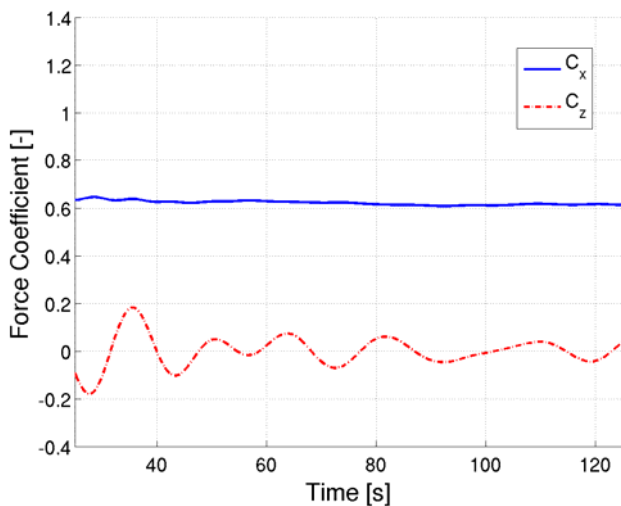


Fig. 12. Representación del volumen de la estela "wake", muestra la energía cinética de las turbulencias

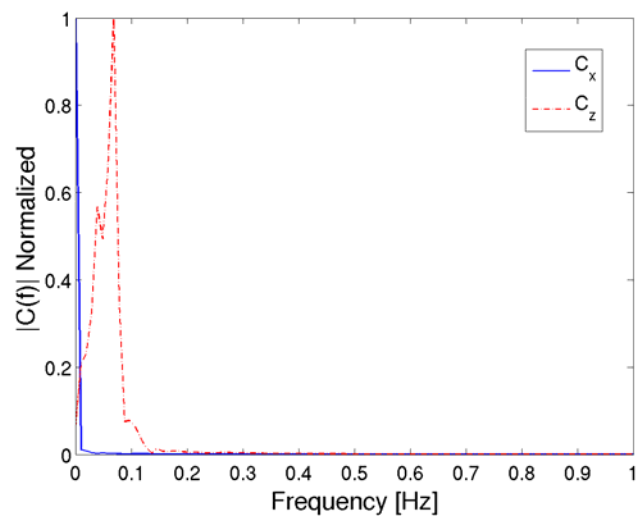
Para el caso 1, en el que la U es 15m/s y la T_u es 0.1%, se obtienen los siguientes resultados:

Hiperboloide	F_x (N)	F_z (N)	M_x (Nm)	M_z (Nm)	C_x (-)	C_z (-)	$F(H_z)$
Valor Medio	6.083e+06	2.52e+04	2.23e+07	-1.911e+09	0.6178	0.002559	—
Máxima amplitud	1.351e+05	7.225e+05	2.135e+08	5.035e+07	0.01372	0.07338	0.068

Tabla 10: Fuerzas y momentos en el hiperboloide para el caso 1



Gráfica 12: Coeficientes de fuerza según el tiempo. Para $T_u=0.1\%$ y $U=15\text{m/s}$



Gráfica 13: Espectro de frecuencias de los coeficientes de fuerza. Para $T_u=0.1\%$ y $U=15\text{m/s}$

Esta geometría no es del todo eficiente en la parte superior del cuerpo, por el aumento de resistencia que opone al viento a causa del incremento de área de su geometría. En la Fig. 12 queda reflejado el gran volumen de aire de estela movilizadado en la parte superior.

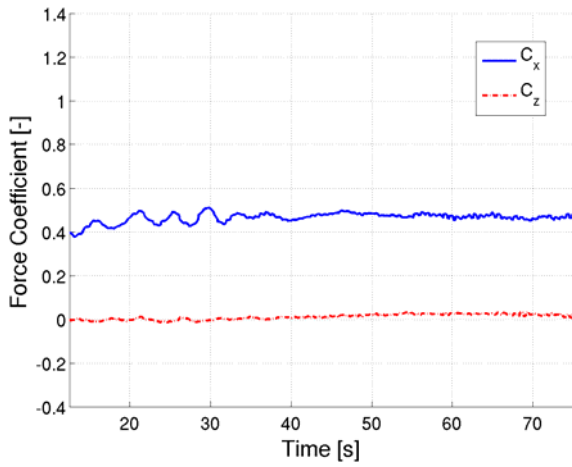
Con esta geometría el brazo mecánico del momento flector es más grande que las figuras del cono y el rotor. Por tanto el punto de aplicación del sumatorio de fuerzas se sitúa en una zona más elevada que el cono o el rotor.

El coeficiente C_x es parecido los obtenidos en las formas geométricas del cono y el rotor.

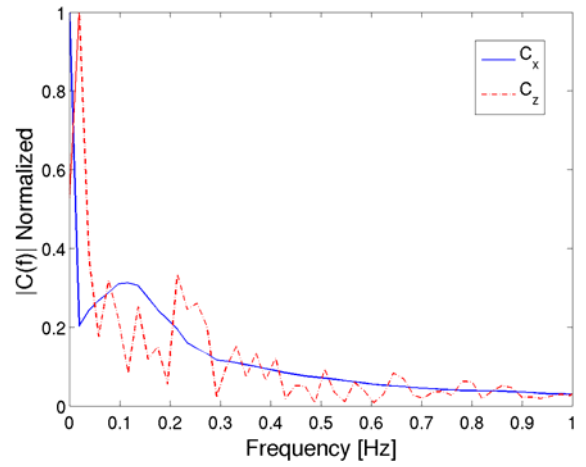
Para el caso 2, en el que la U es 15m/s y la T_u es 1% , se obtienen los siguientes resultados:

Hiperboloide	F_x (N)	F_z (N)	M_x (Nm)	M_z (Nm)	C_x (-)	C_z (-)	f (Hz)
Valor Medio	4.639e+06	1.421e+05	2.913e+07	-1.45e+09	0.4711	0.01443	-
Máxima amplitud	4.71e+05	2.714e+05	9.329e+07	1.246e+08	0.04784	0.02756	0.02

Tabla 11: Fuerzas y momentos en el hiperboloide para el caso 2



Gráfica 14: Coeficientes de fuerza según el tiempo. Para $T_u=1.0\%$ y $U=15\text{m/s}$



Gráfica 15: Espectro de frecuencias de los coeficientes de fuerza. Para $T_u=1.0\%$ y $U=15\text{m/s}$

9.4.4 PRISMA RECTANGULAR

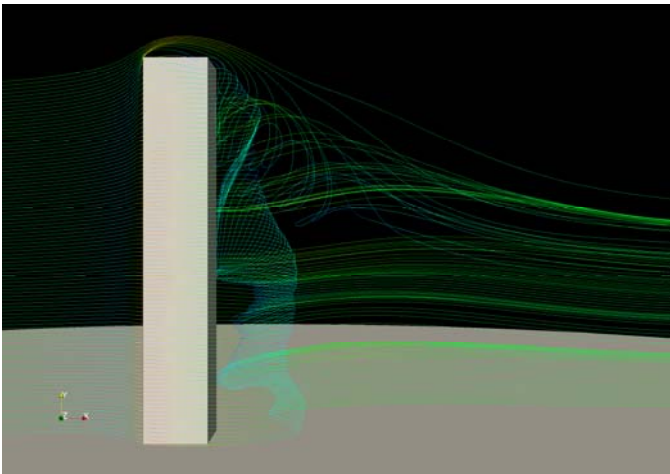


Fig.12: Trazas de las corrientes

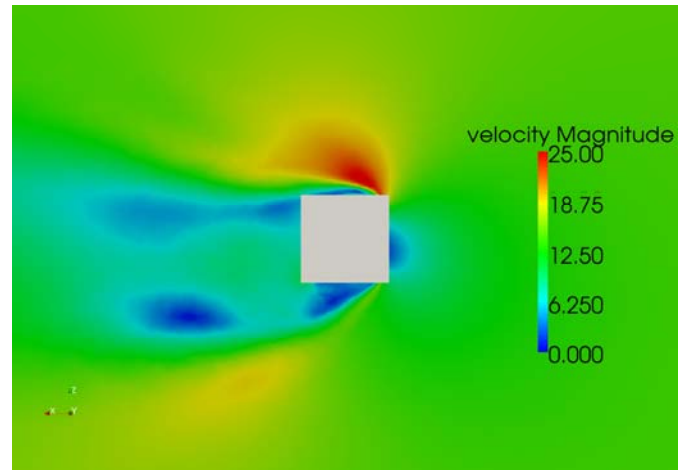


Fig.13: Velocidad del fluido. Vista en planta

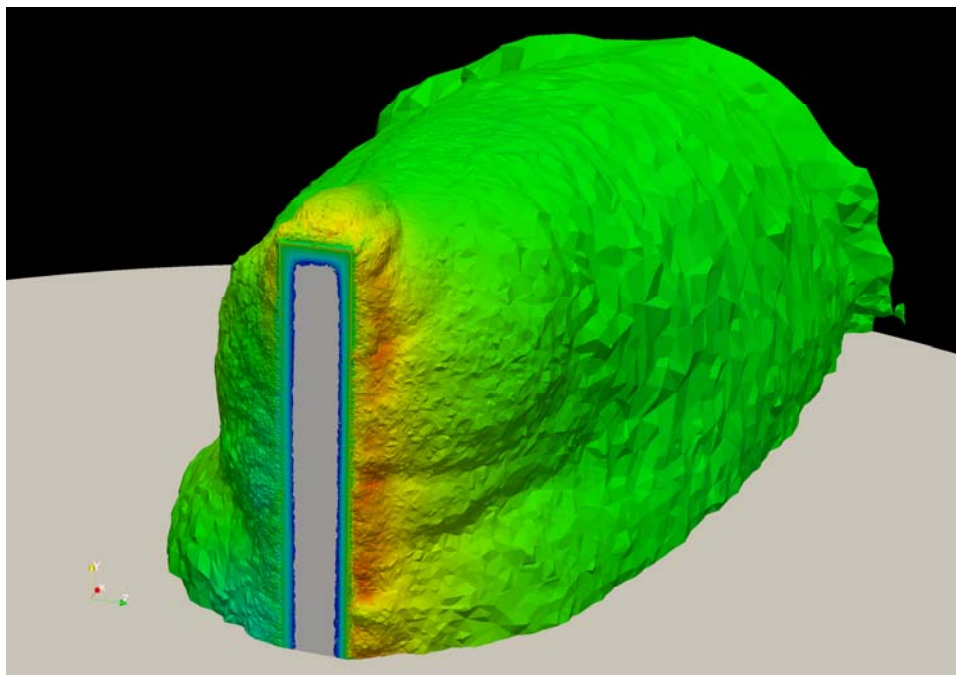
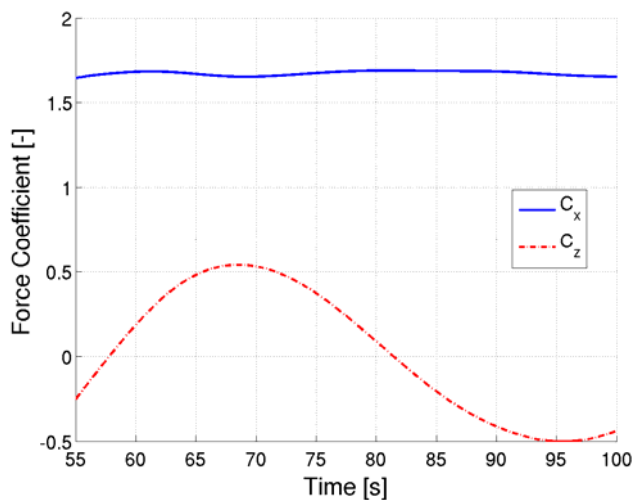


Fig. 14: Representación del volumen de la estela "wake", muestra la energía cinética de las turbulencias

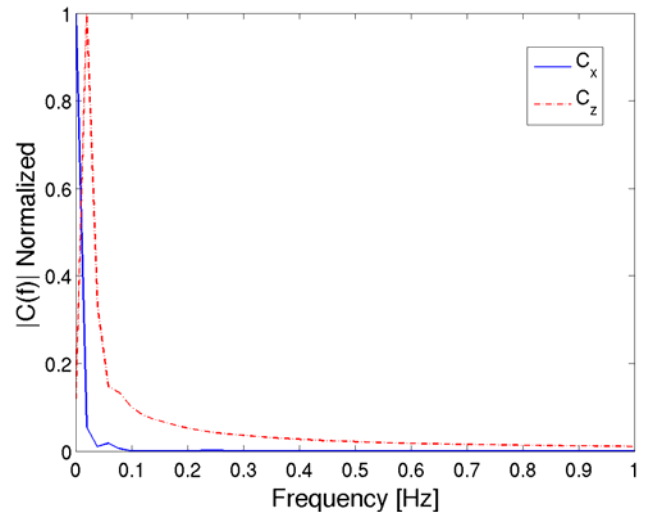
Para el caso 1, en el que la U es 15m/s y la T_u es 0.1%, se obtienen los siguientes resultados:

Prisma rectangular	F_x (N)	F_z (N)	M_x (Nm)	M_z (Nm)	C_x (-)	C_z (-)	$F(H_z)$
Valor Medio	2.378e+07	3.279e+05	5.31e+08	-7.16e+09	1.673	0.02307	-
Máxima amplitud	3.861e+05	7.465e+06	2.687e+09	1.925e+08	0.02717	0.5252	0.02

Tabla 12: Fuerzas y momentos en el prisma rectangular para el caso 1



Gráfica 16: Coeficientes de fuerza según el tiempo. Para $T_u=0.1\%$ y $U=15\text{m/s}$



Gráfica 17: Espectro de frecuencias de los coeficientes de fuerza. Para $T_u=0.1\%$ $U=15\text{m/s}$

En la Fig. 12, se muestra el efecto 3D de las fuerzas incidentes sobre el volumen. Del flujo incidente en un plano, éste deriva en varios vórtices a lo largo de toda la altura, es decir, la geometría propicia un efecto en 3 dimensiones.

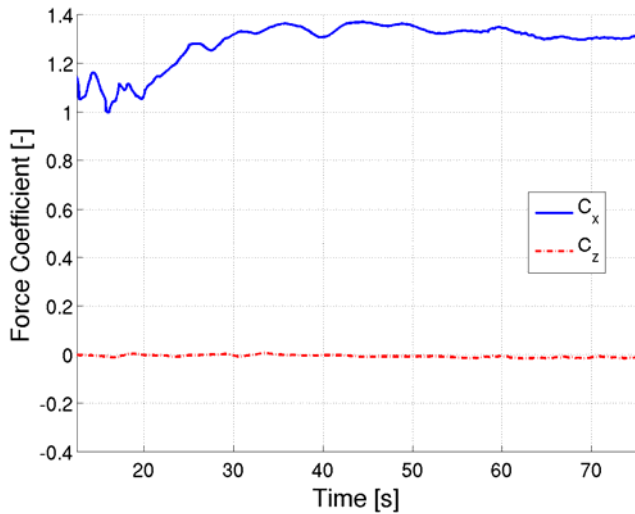
De la Fig. 14, destaca la enorme estela que se genera detrás del edificio. Esto indica la gran resistencia que opone esta figura al viento y por tanto, el orden tan elevado de magnitud de fuerzas a que se somete.

De la gráfica 16 se lee una amplitud muy elevada con una frecuencia muy pequeña, gráfica 17. Una amplitud tan grande origina movimientos no deseados como el "vortex shedding".

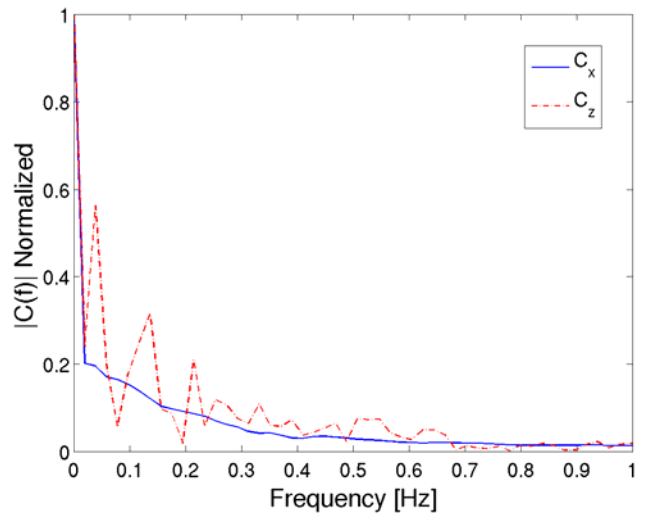
Para el caso 2, en el que la U es 15m/s y la T_u es 1%, se obtienen los siguientes resultados:

Prisma rectangular	F_x (N)	F_z (N)	M_x (Nm)	M_z (Nm)	C_x (-)	C_z (-)	$F(H_z)$
Valor Medio	1.946e+07	-1.32e+05	-5.56e+07	-5.95e+09	1.324	-0.0090	-
Máxima amplitud	1.072e+06	2.08e+05	7.297e+07	2.155e+08	0.07294	0.01415	0

Tabla 13: Fuerzas y momentos en el prisma rectangular para el caso 2



Gráfica 18: Coeficientes de fuerza según el tiempo. Para $T_u=1.0\%$ y $U=15\text{m/s}$



Gráfica 19: Espectro de frecuencias de los coeficientes de fuerza. Para $T_u=1.0\%$ $U=15\text{m/s}$

9.4.5 PRISMA TORSIONADO

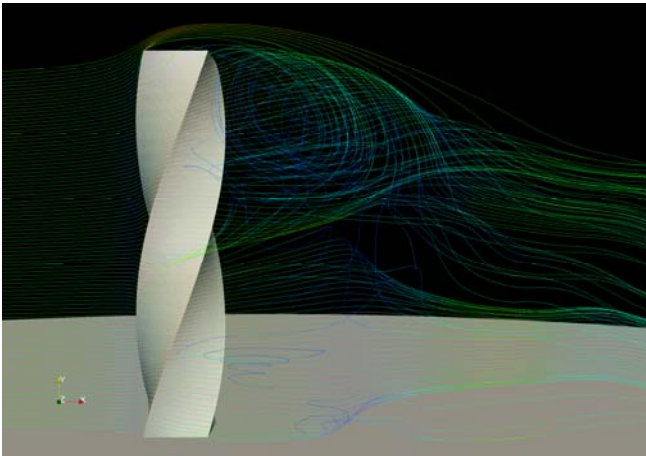


Fig. 15. Trazas de la corriente

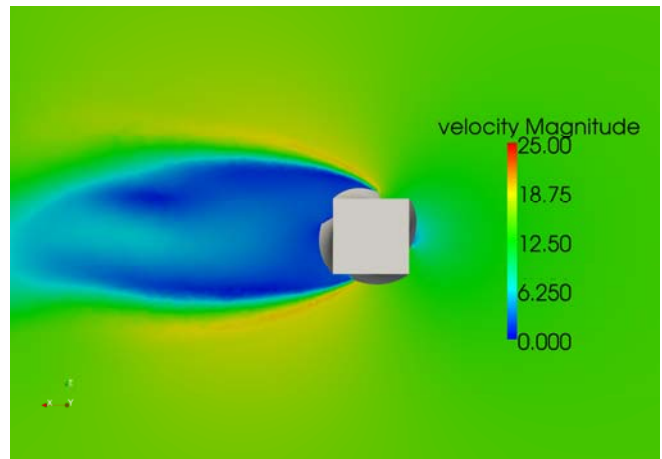


Fig.16: Velocidad del fluido. Vista en planta

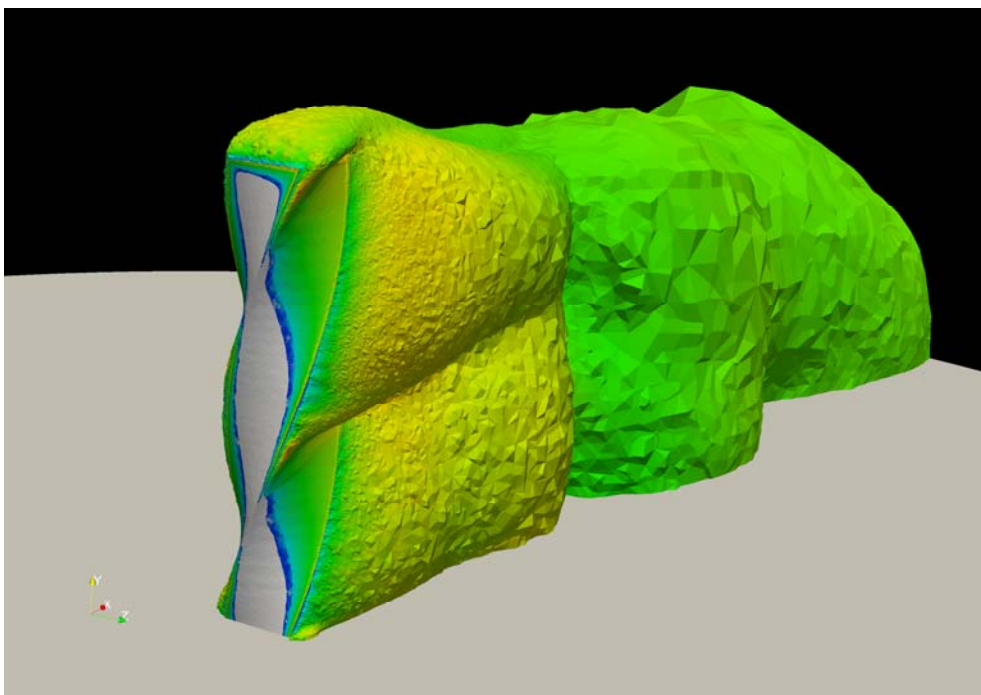
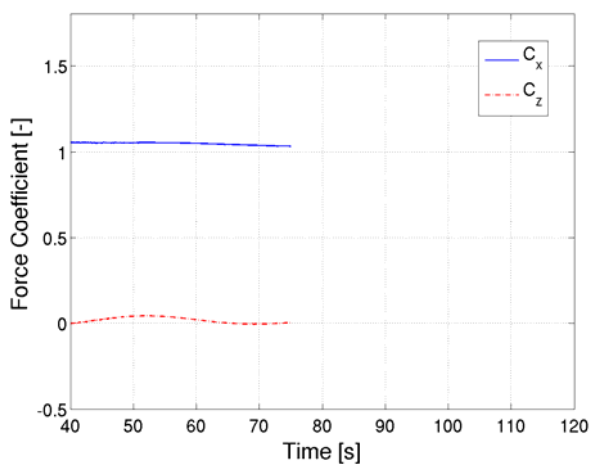


Fig. 17:
Representación del volumen de la estela "wake", muestra la energía cinética de las turbulencias

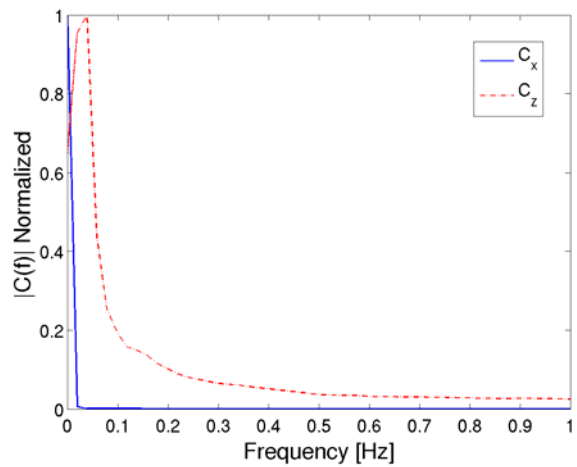
Debido a errores técnicos, sólo se ha podido realizar análisis para el caso 1, en el que la U es 15m/s y la T_u es 0.1%, se obtienen los siguientes resultados:

Prisma torsionado	F_x (N)	F_z (N)	M_x (Nm)	M_z (Nm)	C_x (-)	C_z (-)	$F(H_z)$
Valor Medio	1.978e+07	2.698e+05	3.356e+08	-5.99e+09	1.055	0.01439	-
Máxima amplitud	5.226e+05	8.111e+05	1.672e+08	2.251e+08	0.02788	0.04328	0.039

Tabla 14: Fuerzas y momentos en el prisma torsionado para el caso 1



Gráfica 20: Coeficientes de fuerza según el tiempo. Para $T_u=0.1\%$ y $U=15\text{m/s}$



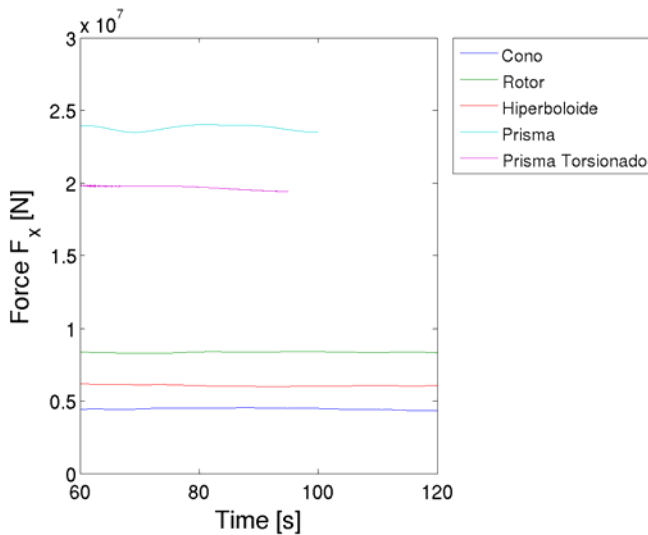
Gráfica 21: Espectro de frecuencias de los coeficientes de fuerza. Para $T_u=0.1\%$ $U=15\text{m/s}$

Entre los dos prismas y al comparar las tablas 14 y 12, se observa una mejora en la geometría del prisma torsionado respecto al prisma rectangular. La fuerza F_x es menor y la máxima amplitud de F_z también es menor en el prisma torsionado. El fenómeno del “vortex shedding” no es tan peligroso como sucede en el prisma rectangular.

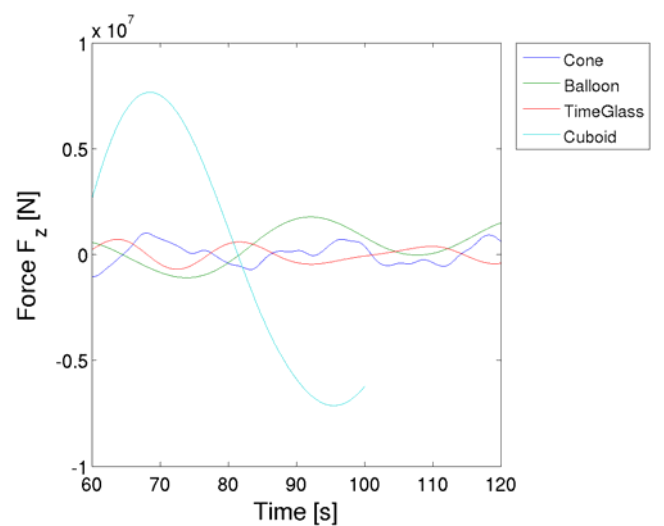
Destaca la magnitud de la estela, la cual se divide en dos grandes vórtices, tal como muestra la Fig.17. Esto reduce la resistencia del fluido, la cual no es tan elevada como la estela que proporciona el prisma rectangular.

9.5 COMPARACIÓN

A continuación se comparan los valores obtenidos para las fuerzas F_x y F_z entre las diferentes geometrías para $U=15\text{m/s}$ y $T_u=0.1\%$, correspondiente al caso 1.



Gráfica 22: Comparación F_x entre las geometrías

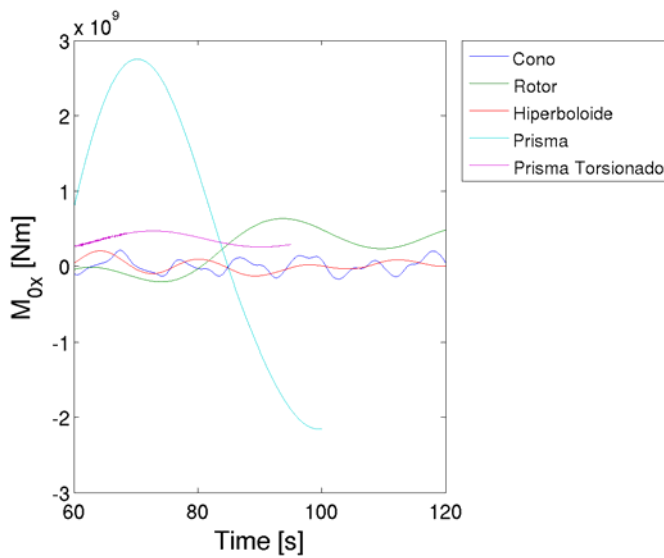


Gráfica 23: Comparación F_z entre las geometrías

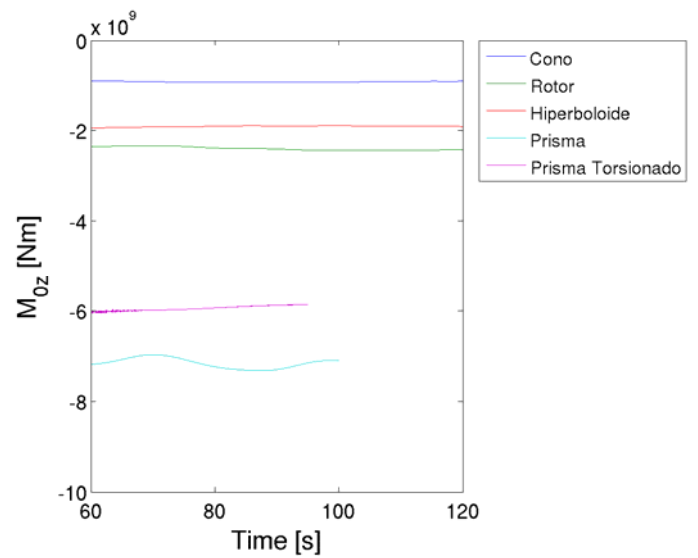
De la gráfica 22, se extraen las siguientes conclusiones:

La figura geométrica con menor fuerza longitudinal F_x a resistir es el Cono. Siguiendo el Hiperboloide, el Rotor y por último, con diferencia, el Prisma rectangular y el Prisma torsionado.

En cuanto a las fuerzas F_z , gráfica 23, muestran que el Prisma y el Rotor son los que experimentan fuerzas F_z con mayores periodos, susceptibles de originar el fenómeno "vortex shedding". El hiperboloide y el cono presentan resultados similares, aunque se deduce un espectro de frecuencias más claro para el Hiperboloide que para el Cono. El espectro de frecuencias del Cono es un poco más amplio.



Gráfica 24: Comparación M_{oz} entre las geometrías



Gráfica 25: Comparación M_{ox} entre las geometrías

La figura geométrica con mayor momento volcador M_{oz} es en valor absoluto, el Prisma rectangular. Seguido por el Prisma torsionado, el Rotor, el Hiperboloide y el Cono. Gráfica 24.

Los momentos M_{ox} originados por la fuerza F_z son muy parecidos en el Cono y en el Hiperboloide. Los cuales divergen bastante del Rotor y de los Prismas.

Para el caso 1, en el que la U es 15m/s y la T_u es 0.1%, se obtiene la siguiente tabla de resultados a comparar.

Caso/Valor medio	$F_x(N)$	$F_z(N)$	$M_x(Nm)$	$M_z(Nm)$	$C_x (-)$	$C_z (-)$
Cono	4.394e+06	-5109	-6.679e+06	-9.048e+08	0.5978	-0.000695
Rotor	8.36e+06	4.403e+05	1.715e+08	-2.391e+09	0.5882	0.03098
Hiperboloide	6.083e+06	2.52e+04	2.23e+07	-1.912e+09	0.6178	0.002559
Pisma rectangular	2.378e+07	3.279e+05	5.31e+08	-7.163e+09	1.673	0.02307
Prisma torsionado	-	-	-	-	-	-

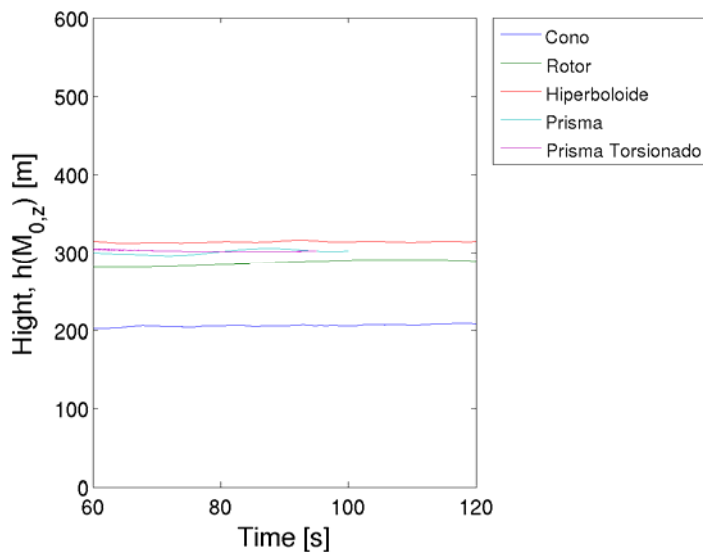
Tabla 15: Fuerzas y momentos de todas las figuras para el caso 1

Para el caso 2, en el que la U es 15m/s y la T_u es 1.0%, se obtiene la siguiente tabla de resultados a comparar.

Caso/Valor medio	$F_x(N)$	$F_z(N)$	$M_x(Nm)$	$M_z(Nm)$	$C_x (-)$	$C_z (-)$
Cono	3.629e+06	9.342e+04	1.668e+07	-7.408e+08	0.4937	0.01271
Rotor	6.03e+06	-5.736e+04	-1.214e+07	-1.641e+09	0.4242	-0.004036
Hiperboloide	4.639e+06	1.421e+05	2.913e+07	-1.457e+09	0.4711	0.01443
Prisma rectangular	1.946e+07	-1.325e+05	-5.564e+07	-5.958e+09	1.324	-0.009015
Prisma torsionado	2.504e+07	-1.093e+06	-6.892e+08	-7.393e+09	1.336	-0.05829

Tabla 16: Fuerzas y momentos de todas las figuras para el caso 2

Al comparar las alturas de los centros de resistencia, gráfica 26, se percibe un incremento sorprendente para la figura geométrica del Hiperboloide que llega a superar al Rotor y a los Prismas. A pesar que el Hiperboloide sufre menos fuerza a viento, ésta se concentra sobretodo en la parte alta, generando un brazo de momento mayor que el del Prisma. Aunque el Prisma es sometido por su geometría a mayores fuerzas que el Hiperboloide, éstas se distribuyen a lo largo de toda la altura, por eso el brazo mecánico final obtenido es inferior al del Hiperboloide.



Gráfica 26: Comparación entre las alturas de los puntos de aplicación de la fuerza media

9.6 CONCLUSIONES

De los cinco rascacielos tipo analizados, el Cono es el que presenta mejor forma aerodinámica y los prismas rectangular y torsionado son los volúmenes que peor trabajan.

Con esto, corroboramos los postulados aerodinámicos, presentados por los diversos investigadores en los últimos cincuenta años:

- Mejora aerodinámica al menguar los volúmenes en la parte superior del edificio.
- Tender a formas circulares en la sección.

A lo que añadimos, conclusiones obtenidas de este análisis:

- Figuras generadas por la rotación de un eje como el Cono, Rotor y el Hiperboloide, carecen de ángulos. Por lo tanto, no dependen del ángulo de ataque del viento y presentan mejores respuestas a viento que los cuerpos angulosos.
- Las formas con diámetro aproximadamente constante en toda su altura, como el Hiperboloide y el Rotor ofrecen un espectro de frecuencias muy claro. Esto conlleva a tener en cuenta pocas frecuencias en el fluido, ya que la frecuencia es prácticamente uniforme en toda su altura. Esta frecuencia tipo del fluido será comparada con la frecuencia propia del edificio para conocer si el sistema es susceptible de entrar en resonancia o no.
- Al torsionar la geometría del prisma rectangular presenta una forma más aerodinámica que el prisma ortogonal.
- Los resultados por CFD son muy sensibles a la intensidad de las turbulencias. Es un factor importante a tener en cuenta a la hora de modelizar el viento.
- El hecho de considerar el "wind profile", velocidad variable con el tiempo, podría enfatizar los resultados obtenidos en este análisis de velocidad constante. De manera que el Cono será la tipología que mejor se comporte, ya que tendrá menos volumen expuesto a gran altura donde la velocidad será mayor. Y más volumen inferior, cerca de la superficie del suelo, donde la velocidad es prácticamente nula.

Por lo tanto, se demuestra que las formas cónicas son las óptimas a seguir en la arquitectura en altura. De esta manera se supera el periodo icónico, ya que el símbolo del rascacielos cónico posee el significado funcional aerodinámico.



10. EPÍLOGO

El trabajo desarrollado en el capítulo 9. *Metodología* se ha centrado en la vinculación entre la *Arquitectura* y la *Aerodinámica*. Para ello se han analizado los cinco edificios tipo de geometrías diferentes, de altura: 600metros y esbeltez 6, mediante el CFD para evaluar su efectividad aerodinámica.

El siguiente paso sería relacionar los resultados del fluido obtenidos con los sistemas y recursos estructurales que posee el edificio. Sin embargo, esta interacción con el campo de la *Ingeniería* no ha podido ser desarrollada en el tiempo estipulado, pendiente de realizarse en el futuro bajo el marco de una tesis doctoral.

En la futura tesis doctoral, se investigaría qué sistema estructural es el más adecuado para absorber las fuerzas y momentos que proporciona el viento en un rascacielos de forma cónica de 600 metros de altura.

11. NOTAS

- (1) “La semiótica es una rama de la filosofía desarrollada en los últimos 90 años, considera cualquier y todas las actividades y productos humanos desde el punto de vista de lo no-verbal o comunicación por signo” p.242
SALVADORI M. y HELLER R. (1986) **Estructuras para arquitectos** Kliczkowski Publisher, Nueva Jersey. Ed. consultada 1998
- (2) GANG, J (2008) **Wanted: Tall Buildings Less Iconic, More Specific**. CTBUH 8th World Congress 2008.
- (3) HOWLER, E (2003) **Skyscraper**. Universe Publishing, New York.
- (4) BINDER, G (2008) **The “International” Skyscraper: Observations** CTBUH Journal 2008, Issue 1
- (5) ILGIN, H.E y GÜNEL M.H (2007) **The role of Aerodynamic Modifications in the form of tall buildings against wind excitation** CTBUH Journal 2007/2
- (6) Mc HALE, J. (1966) **R. Buckminster Fuller**, George Braziller, Nueva York. Ed Hermes.
- (7) ALI, M y ARMSTRONG, P (1995) **Architecture of Tall Buildings**, CTBUH, McGraw-Hill Book Company, Nueva York.
- (8) KAREEM, A. KIJEWski, T Y TAMURA, Y (1999) **Mitigation of Motion of Tall Buildings with Recent Applications, Wind and Structures**.
- (9) BAKER, W. (2004) **The World’s Tallest Building-Burj Dubai, U.A.E**, CTBUH, Seoul, Korea.
- (10) COCHRAN, L. **State of the Art Review of Wind Tunnels and Physical Modelling to Obtain Structural Loads and Cladding Pressures** Architectural Science Review, Volume 49, pp7-16
- (11) IRWIN, P.A (2006) **Developing Wind Engineering Techniques to Optimize Design and Reduce Risk**, 7th UK Conference on Wind Engineering, Wind Engineering Society, ICE
- (12) HIRT CW, RAMSHAW JD, STEIN LR, **Numerical simulation of three-dimensional flow past bluff bodies**. Comput Methods Appl Mech Eng 1978;14(1):93-124.
- (13) HANSON T, SMITH F, SUMMERS D, WILSON CB. **Computer Simulation of wind flow around buildings**. Comput Aided, Des 1982; 14(1):27-31
- (14) HANSON T, SUMMERS D, WILSON CB. **A three-dimensional simulation of wind flow around buildings**. Inst J Numer Methods Fluids 1986;21(2): 97-111
- (15) SWADDIWUDHIPONG S, KHAN MS. **Dynamic response of wind-excited building using CFD**. J sound Vib 2002; 253(4): 735-54
- (16) CHO, K.P (1998) **Passive Viscoelastic Damping Systems for Buildings**, PhD Dissertation, Department of Civil Engineering, Colorado State University, Colorado.
- (17) TARANATH, B. (1998) **Steel, Concrete and Composite Design of Tall Buildings**, Mc Graw-Hill Book Company, New York
- (18) GU, M and QUAN, Y (2004) **Across-Wind Loads of Typical Tall Buildings**, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, v:92
- (19) “Un modo principal de vibración es una oscilación libre concreta del sistema con la que las masas oscilan con movimiento armónico, todas con el mismo período propio y en fase entre sí, es decir, alcanzan todas en el mismo instante los valores máximos de desplazamiento o la posición de reposo” p.151
ARCOS TRANCHO H. y PORCU MC. (2003) **Movimientos Sísmicos y Estructuras Murarias** CCS, Consorcio de Compensación de Seguros, Madrid
- (20) HANSEN, R.J **Human response to wind-induced motion of buildings**. Journal of the Structural Division, July 1973.
- (21) EISELE J. y KLOFT E. **High-Rise Manual, Typology and Design, Construction and Technology** Birkhäuser, Basel 2002
- (22) IRWIN, PA BAKER WF **The Wind Engineering of the Burj Dubai Tower**

(23) “El número de Reynolds es un número adimensional utilizado en mecánica de fluidos para caracterizar el movimiento de un fluido. Indica la relación entre los términos convectivos y los términos viscosos de las ecuaciones de Navier-Stokes que gobiernan el movimiento de los fluidos. También predice el carácter turbulento o laminar del fluido, mediante la reducción de este número. El parámetro de los números de Reynolds es considerado sobre todo en los cuerpos con superficies curvas, ya que en los cuerpos con ángulos la separación entre las fuerzas convectivas y viscosas ocurre en las esquinas en un amplio rango de los números Reynolds. A Reynolds suficientemente elevados el comportamiento del flujo no experimenta grandes diferencias entre una escala grande o pequeña de una maqueta sometida a un túnel de viento.” (Ver capítulo 9, apartado 9.1 Metodología)

$$\left(\text{Re} = \frac{\rho U L}{\mu} \right)$$

Re = número de Reynold

ρ = densidad del fluido

L = distancia entre las caras de barlovento y sotavento

μ = coeficiente de viscosidad

HOLMES JD, **Wind loading of Structures** p77 Taylor & Francis, Oxon 2001

(24) MOIX LL. “**Los iconos arquitectónicos nos llevan a una suma cero**” Entrevista a Peter Hall. Art. LA VANGUARDIA p.38, 15 junio 2009

(25) Relación de aspecto (aspect ratio): relación entre la altura y la anchura de un cuerpo: AR=h²/S_{ref}. Siendo: h=altura y S_{ref}=area frontal.

HOLMES JD, **Wind loading of Structures** p84 Taylor & Francis, Oxon 2001

(26) ALI MM, **Integration of structural form and aesthetics in tall Building Design, Proceedings of Tall Buildings 200 and Beyond**, Council on Tall Buildings & Urban Design, Beedle, L.S and Rice, D.B, New York p. 3-12

(27) VOLLERS K. **Morphological scheme of second-generation non-orthogonal high-rises** CTBUH 8th World Congress 2008.

(28) SCOTT D., FARNSWORTH D, JACKSON M, y CLARK M. **The effects of complex geometry on Tall Buildings** The Structural Design of Tall and Special Buildings. 16, 441-455, 2007

(29) ORTEGA CORNEJO M, LACOMA ALLER LM, HOLMAN DM **Análisis de acciones de viento en edificios singulares. Aplicación al Hotel Vela de Barcelona.** Hormigón y acero 2009; 60, 251, 37-64

(30) Bluff bodies: cuerpos donde la fuerza dominante es la convectiva. Suele corresponder a formas geométricas con ángulos (polígonos) o formas circulares. Frente a viento, todos los edificios se consideran “bluff bodies”. Presenta múltiples ángulos de ataque del viento. Lo contrario de un “bluff body” es un “streamlined body”, éste último se caracteriza por poseer pequeños ángulos de ataque al viento y formas aerodinámicas. Los “streamlined bodies” ofrecen gran resistencia a viento, y en ellos dominan las fuerzas viscosas. Corresponde al diseño de las alas de los aviones, la carcasa de los yates o la forma de los peces.

HOLMES JD, **Wind loading of Structures** p74 Taylor & Francis, Oxon 2001

(31) Punto de la superficie del cuerpo perpendicular a la fuerza del viento. Se caracteriza porque la velocidad del fluido en ese punto es 0.

(32) LEPAGE M, QIU X, SIFTON V **What’s the latest tool in wind engineering** Technotes, Reputation Resources Results, issue 28

(33) OLDFIELD P. **The tallest 20 in 2020** CTBUH Journal 2007.

(34) <http://www.foi.se/edge>

(35) HELLSTEN , A. **On the solid-wall boundary condition for w in the k - type turbulence modes**, Scientific Report, Report No B-50, Series B. Helsinki University of Technology, 1998

(36) <http://www.ansys.com/products/icemcfd.asp>

12. BIBLIOGRAFÍA

- Eliasson, P., "**Edge, a Navier-Stokes Solver for Unstructured Grids**", Proc. To Finite Volumes for Complex Applications III, pp. 527-534, 2002.
- HELLSTEN, A. 1998 **On the solid-wall boundary condition for w in the k - type turbulence modes**, Scientific Report, Report No B-50, Series B. Helsinki University of Technology.
- HOOGENDOORN H, ÁLVAREZ CABAL R. **Las cuatro torres en Madrid. Estudio sobre el comportamiento frente al viento en estado límite de servicio**. Cuadernos INTEMAC nº72-4º Trimestre 08
- SALVADORI M. y HELLER R. (1986) **Estructuras para arquitectos** Kliczkowski Publisher, New Jersey. Ed. consultada 1998
- GANG, J (2008) **Wanted: Tall Buildings Less Iconic, More Specific**. CTBUH 8th World Congress 2008.
- HOWLER, E (2003) **Skyscraper**. Universe Publishing, New York.
- BINDER, G (2008) **The "International" Skyscraper: Observations** CTBUH Journal 2008, Issue 1
- ILGIN, H.E y GÜNEL M.H (2007) **The role of Aerodynamic Modifications in the form of tall buildings against wind excitation** CTBUH Journal 2007/2
- Mc HALE, J. (1966) **R. Buckminster Fuller**, George Braziller, Nueva York. Ed Hermes.
- ALI, M y ARMSTRONG, P (1995) **Architecture of Tall Buildings**, CTBUH, McGraw-Hill Book Company, Nueva York.
- KAREEM, A. KIJEWski, T Y TAMURA, Y (1999) **Mitigation of Motion of Tall Buildings with Recent Applications, Wind and Structures**.
- BAKER, W. (2004) **The World's Tallest Building-Burj Dubai, U.A.E**, CTBUH, Seoul, Korea.
- COCHRAN, L. **State of the Art Review of Wind Tunnels and Physical Modelling to Obtain Structural Loads and Cladding Pressures** Architectural Science Review, Volume 49, pp7-16
- IRWIN, P.A (2006) **Developing Wind Engineering Techniques to Optimize Design and Reduce Risk**, 7th UK Conference on Wind Engineering, Wind Engineering Society, ICE
- HIRT CW, RAMSHAW JD, STEIN LR, **Numerical simulation of three-dimensional flow past bluff bodies**. Comput Methods Appl Mech Eng 1978;14(1):93-124.
- (13) HANSON T, SMITH F, SUMMERS D, WILSON CB. **Computer Simulation of wind flow around buildings**. Comput Aided, Des 1982; 14(1):27-31
- HANSON T, SUMMERS D, WILSON CB. **A three-dimensional simulation of wind flow around buildings**. Inst J Numer Methods Fluids 1986;21(2): 97-111
- SWADDIWUDHIPONG S, KHAN MS. **Dynamic response of wind-excited building using CFD**. J sound Vib 2002; 253(4): 735-54
- CHO, K.P (1998) **Passive Viscoelastic Damping Systems for Buildings**, PhD Dissertation, Department of Civil Engineering, Colorado State University, Colorado.
- (17) TARANATH, B. (1998) **Steel, Concrete and Composite Design of Tall Buildings**, Mc Graw-Hill Book Company, New York
- GU, M and QUAN, Y (2004) **Across-Wind Loads of Typical Tall Buildings**, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, v:92
- ARCOS TRANCHO H. y PORCU MC. (2003) **Movimientos Sísmicos y Estructuras Murarias** CCS, Consorcio de Compensación de Seguros, Madrid
- HANSEN, R.J **Human response to wind-induced motion of buildings**. Journal of the Structural Division, July 1973.
- EISELE J. y KLOFT E. **High-Rise Manual, Typology and Design, Construction and Technology** Birkhäuser, Basel 2002
- IRWIN, PA BAKER WF **The Wind Engineering of the Burj Dubai Tower**
- HOLMES JD, **Wind loading of Structures** p77 Taylor & Francis, Oxon 2001

MOIX LL. **“Los iconos arquitectónicos nos llevan a una suma cero”** Entrevista a Peter Hall. Art. LA VANGUARDIA p.38, 15 junio 2009

Relación de aspecto (aspect ratio): relación entre la altura y la anchura de un cuerpo: $AR=h^2/S_{ref}$. Siendo: h =altura y S_{ref} =area frontal.

ALI MM, **Integration of structural form and aesthetics in tall Building Design, Proceedings of Tall Buildings 200 and Beyond**, Council on Tall Buildings & Urban Design, Beedle, L.S and Rice, D.B, New York p. 3-12

VOLLERS K. **Morphological scheme of second-generation non-orthogonal high-rises** CTBUH 8th World Congress 2008.

SCOTT D., FARNSWORTH D, JACKSON M, y CLARK M. **The effects of complex geometry on Tall Buildings** The Structural Design of Tall and Special Buildings. 16, 441-455, 2007

ORTEGA CORNEJO M, LACOMA ALLER LM, HOLMAN DM **Análisis de acciones de viento en edificios singulares. Aplicación al Hotel Vela de Barcelona**. Hormigón y acero 2009; 60, 251, 37-64

LEPAGE M, QIU X, SIFTON V **What's the latest tool in wind engineering** Technotes, Reputation Resources Results, issue 28

OLDFIELD P. **The tallest 20 in 2020** CTBUH Journal 2007.

ABALOS I, HERREROS J **Técnica y arquitectura en la ciudad contemporánea** Ed Nerea, Madrid, 1992

ARROYO P, CORRES G, GARCÍA ROSALES G, ROMANA M, ROMERO A, SÁNCHEZ R, TEJA O **Números gordos en el proyecto de estructuras**. Cinter Divulgación técnica S.LL, 2001

JAFFE E, BROWN J **Tall buildings** The Museum of Modern Art, New York, 2004

FAIRWEATHER V, THORNTON T, **Expressing Structure, the technology of large-scale buildings** Birkhäuser, Basel 2004

HIRT CW, RAMSHAW JD, STEIN LR, **Numerical simulation of three-dimensional flow past bluff bodies**. Comput Methods Appl Mech Eng 1978;14(1):93-124.

HANSON T, SMITH F, SUMMERS D, WILSON CB. **Computer Simulation of wind flow around buildings**. Comput Aided, Des 1982; 14(1):27-31

MURAKAMI S, MOCHIDA A. **Three-dimensional numerical simulation of turbulent air flow around a cubic model by large eddy simulation**. J Wind Eng Ind Aerodynamics 1987:25: 291-305.

MURAKAMI S, MOCHIDA A, **Three-dimensional numerical simulation of turbulent air flow around buildings by means of the $K-\epsilon$ turbulence model**. Buildings Environ 1989: 24:51-64

MURAKAMI S, MOCHIDA A, HAYASHI Y **Examining the $K-\epsilon$ model by means of a wind tunnel test and large-eddy simulation of turbulence structure around a cube**. J Wind Eng ind Aerodynamics 1990: 35:87-100

MURAKAMI S, **Comparison of various turbulences models applied to bluff body**. J Wind Eng ind Aerodynamics 1993:46-67:21-36

MURAKAMI S, **Current status and future trends in computational wind engineering**. J Wind Eng ind Aerodynamics 1997:67-68:3-34

SELVAM RP **Computation of pressure on Texas Tech building** J Wind Eng ind Aerodynamics 1992;43:1619-27

SELVAM RP **Computation around Texas Tech building using $K-\epsilon$ and kato Launder $K-\epsilon$ turbulence model**. Eng Struct 1996:18 (11:856-60)

SELVAM RP **Finite element modelling of flow around a circular cylinder using LES** J Wind Eng ind Aerodynamics 1997:67-68:129-38

MOCHIDA A, MURAKAMI S, SHOJI M, ISHIDA Y. **Numerical simulation of flowfield around Texas tech building by large eddy simulation** J Wind Eng ind Aerodynamics 1993:46-47:455-60

HE J, SONG CCS. **A numerical study of wind flow around the TTU building and the roof corner vortex**. Wind Eng ind Aerodynamics 1997:67-68:547-58

SENTHOORAN S, LEE T-D. **Parameswaran SA computational model to calculate the flow-induced pressure fluctuations on buildings.** J Wind Eng ind Aerodynamics 2004; 92(13):11 31-45

GADILHE A. JANVIER L. BARNAUT C. **Numerical and experimental modeling of the three-dimensional turbulence wind flow through an urban square.** Wind Eng ind Aerodynamics 1993: 46-47:755-63

STATHOPOULOS T. BASKARAN BA **Computer simulation of wind environmental conditions around buildings.** Eng Struct 1996:18(11):876-85

Análisis de una manzana de edificios en Montreal, Canadá, en el año1996

HUANG S, LI QS, XU S **Numerical evaluation of wind effects on a tall steel building by CFD.** J Construct Steel Res 2007,63. 612-27

STATHOPOULOS T. BASKARAN BA. **Boundary treatment for the computation of three-dimensional wind flow conditions around a building.** J Wind Eng ind Aerodynamics 1990:35:177-200

SONG CCS, HE J. **Computation of wind flow around a tall building and the large-scale vortex structure.** J Wind Eng ind Aerodynamics 1993;46-47:219-28

TOMINAGA Y, MOCHIDA A. MURAKAMI S, SAWAKI S. **Comparison of various revised $K-\epsilon$ models and LES to flow around a high-rise building model with 1:1:2 shape placed within the surface boundary layer.** J Wind Eng ind Aerodynamics 2008:96:389-411

ESMAILI, O **Wind Flow Effects on a 56-Story Tall Building and its Surrounding Environment.** et al. ISSN 0784408106 pp 1-9

Crítica de la construcción de rascacielos en las zonas urbanas por el desconfort ocasionado a los transeúntes al analizar por CFD la incidencia de un edificio de 56 pisos, rodeado por tres rascacielos más de 36 pisos cada uno.

KITSON M, MORAN H **Swiss Re Headquarters Inside & Out** HVAC Industry. London, 2000

SWADDIWUDHIPONG S, KHAN MS. **Dynamic response of wind-excited building using CFD.** J sound Vib 2002; 253(4): 735-54

BURNETT J, MILORAD B, YIK F. **Wind-induced pressure at external surfaces of a high-rise residential building in Hong Kong** Building and environment 2005:40 765-777