

Diseño estructural de rascacielos

Soluciones de Robertson

En este artículo, escrito para Revista Ingenieros con motivo de su próxima visita a Chile, el ingeniero estructural de los edificios más altos del mundo, cuenta algunos aspectos del proyecto del Centro Financiero Mundial de Shanghai, de 490 metros, actualmente en construcción.



Proyecto Shanghai World Financial Center

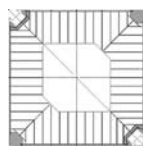
Por : **Leslie E. Robertson**

Traducción: **Ing. Alberto Maccioni**

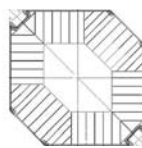
Las fundaciones de la estructura de este gran edificio de uso mixto (hotel en los pisos superiores y oficinas en los inferiores) ya se encuentran construidas. La altura total del edificio se ha aumentado de 460 metros a algo más de 490 metros, y la dimensión en planta ha crecido proporcionalmente en la altura, desde los 55.8 metros originales a 58.0, pero la apariencia exterior global del edificio permanece casi inalterada.

La decisión de aumentar la dimensión en planta es producto del aumento en la altura de aproximadamente un 7%, lo que significa un incremento en el momento volcante debido a las fuerzas de diseño de viento en aproximadamente un 25%. La decisión de colocar las pilas de fundación a un espaciamiento mínimo, se había adoptado previamente al aumento de la altura del edificio. Debido a la mayor superficie total, se evaluó el costo de reforzar las pilas de cimentación, y dado que resultó demasiado alto, se optó por reducir el peso total de la estructura. A pesar del hecho que el edificio es más alto, y que tendrá casi un 15% más de superficie, el nuevo sistema estructural adoptado reduce el peso del edificio en más de un 10%, al disminuir el peso de la estructura de acero y el volumen de hormigón en forma significativa.

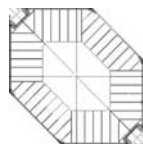
La forma de las plantas de la estructura varían pisos a piso:



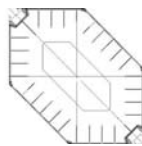
Piso de Oficina 08



Piso de Oficina 65



Piso de Oficina 77



Piso de Hotel 84

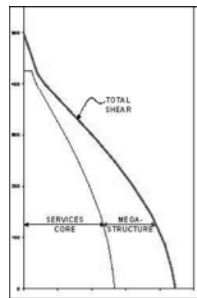
Para resistir las grandes fuerzas de viento, así como las fuerzas sísmicas que son más reducidas, se ha dispuesto de tres sistemas estructurales paralelos:

1. La mega estructura formada por la estructura de acero que incluye las columnas resistentes perimetrales y diagonales de marcos arriostrados.
2. El núcleo de hormigón armado ubicado en la zona de servicios del edificio.
3. El sistema de unión del núcleo central y la estructura de acero formada por los enrejados de ligazón (outrigger trusses).



El concepto de la estructura responde a la esencia de la arquitectura del edificio, y al mismo tiempo el nuevo sistema propuesto provee de una mayor velocidad constructiva que contrarresta la lentitud de ejecución de las fundaciones formadas por pilotes.

Buscando mejorar la calidad espacial de las oficinas, el nuevo sistema estructural disminuye el número de columnas perimetrales de cuatro a tres en cada una de las caras ortogonales, y una menos en cada cara curva. De esta forma los ocupantes tendrán una extraordinaria sensación de transparencia y vista de la ciudad de Shangai y sus alrededores. Ajustando la rigidez de la mega-estructura perimetral, se puede aumentar o disminuir los cortes y momentos volcantes en la altura que son tomados por el núcleo de hormigón; es decir, el peso del hormigón está controlado por el Ingeniero Estructural. Esta faceta del diseño se utilizó para optimizar el diseño de los enrejados de ligazón (outrigger-trusses) que transmiten los esfuerzos entre el núcleo central y la estructura perimetral, y los espesores de muros del núcleo central. La figura indica la distribución de corte tomado por el núcleo central y la estructura perimetral de acero, que ha sido adoptada en este caso.

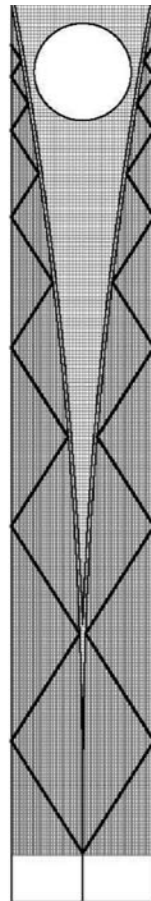


CARGAS EN FUNDACIONES

El hacer crecer los edificios, redundando generalmente en un aumento de las cargas gravitacionales, tanto de las superficies que se encuentran dentro como fuera del núcleo central. Al incrementar la superficie y el volumen interno del edificio, las cargas de viento se ven incrementadas en forma importante. Este aumento de las fuerzas de viento, y el volcane adicional que esto significa, tiene una particular importancia en el diseño del sistema de fundaciones.

En este caso adoptamos el concepto de mega-estructura; es decir, utilizar pocos elementos estructurales (columnas y diagonales) pero de gran dimensión, lo cual reduce el peso de la estructura de acero perimetral, y por otro lado, traspasar a través de los enrejados de ligazón un mayor porcentaje del corte y volcane debido a viento que es tomado por el núcleo central hacia la estructura perimetral, lo que disminuye el peso del hormigón del núcleo.

Esta reducción de peso tanto de la estructura perimetral como en el núcleo central de servicio hace posible un diseño estructural del sistema mucho más eficiente y económico respondiendo a la imposición de las pilas de fundación existentes.



INGENIERIA DE VIENTO

No es poco común que los gradientes de velocidades de viento a considerar de acuerdo a las normas locales, sean demasiado conservadoras. Estas velocidades, con sus consiguientes cargas y presiones sobre las estructuras, son utilizadas en proyectos en que no se realiza un estudio detallado de ingeniería de viento. Para el caso del Centro Financiero Mundial de Shanghai, se realizó un análisis climático de viento muy completo de la zona en que se emplaza la ciudad, y un estudio de modelos en túneles de viento como se describe a continuación.

Además, se realizó un completo análisis que estudia la interrelación entre las velocidades de viento consideradas, y un sistema de amortiguamiento adicional que puede ser necesario de instalar en el edificio.

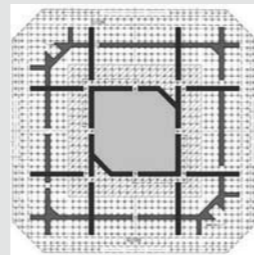
El estudio de Ingeniería de Viento establecido consta de cuatro etapas, encontrándose en la actualidad concluida la primera de éstas; el análisis de equilibrio de fuerzas. Las etapas definidas son las siguientes:

1. Ensayo de equilibrio de fuerzas para las cargas estructurales (resistencia estructural) y respuesta dinámica (confort humano).
2. Ensayo de presiones en la fachada para desarrollar el estado de presiones constantes para diseño, y al mismo tiempo las presiones dinámicas. (Diseño de la fachada del edificio).
3. Ensayo medioambiental, debido a los efectos del viento en las calles y patios vecinos al lugar.
4. Ensayo Aeroelástico de las cargas en la estructura y respuesta dinámica, en que se incluye el efecto del amortiguamiento aerodinámico del edificio.

El ensayo Aeroelástico final usará un modelo de múltiples grados de libertad para el modelo.

Debido a la importancia de la fachada propuesta por arquitectura, y la imposibilidad de hacer grandes modificaciones en ésta, algunos de los ensayos en el túnel de viento del laboratorio se realizaron en forma independiente en dos laboratorios distintos, a modo de obtener la mayor precisión de resultados. Además, debido a la existencia de un hotel en los pisos superiores del edificio, las pruebas de laboratorio pueden indicar la necesidad de instalar amortiguadores adicionales a modo de controlar la serviciabilidad en dichos niveles.

En algunos puntos, la carga en el núcleo de servicio excede la capacidad última de las pilas inmediatamente debajo de éstas. Adicionalmente, la mega estructura concentra las cargas en las fundaciones justamente debajo de las cuatro esquinas del edificio; sin embargo, haciendo uso de un menor peso de la estructura perimetral, y distribuyendo las cargas gravitacionales y de viento de cierta forma, es posible obtener un sistema estructural para el edificio aumentado en dimensiones sin afectar el sistema de pilotes existentes. El sistema de pilotes existente se muestra en esta figura.



En este proyecto en particular, hay un factor de tremenda significación: la preservación de la gracia, la dignidad y la belleza del diseño arquitectónico, tal cual fuera concebido por el arquitecto Sr. William Pedersen, de Kohn, Pedersen, Fox Associates, P.C.

OPTIMIZACIÓN

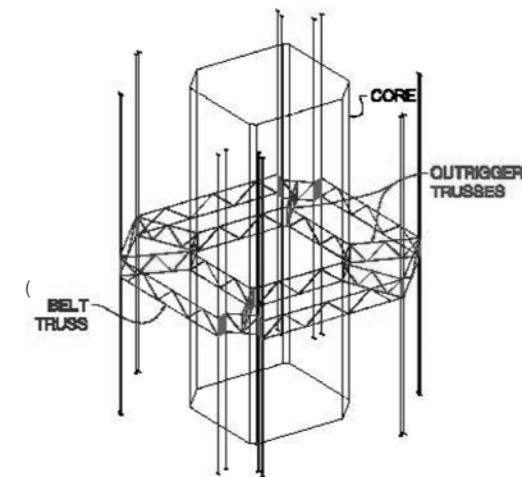
El sistema resistente a cargas laterales es lo más importante en la selección y pre-dimensionamiento del sistema estructural apropiado para cualquier edificio alto. En este proyecto, que se suponía correspondería al edificio más alto del mundo, se ejemplifica especialmente este punto. Como ya se mencionó, el sistema resistente a fuerzas laterales consiste en tres elementos interactuantes entre sí:

- El núcleo de servicio de hormigón armado.
- La Mega estructura perimetral consistente en grandes diagonales y columnas de acero; y
- El acoplamiento de las dos anteriores, mediante los enrejados de ligazón o outrigger trusses.

Cada uno de estos elementos es capaz de tomar un porcentaje de los momentos volcantes inducidos por las cargas de viento. Los Ingenieros Estructurales tienen la habilidad de ajustar la distribución de corte y momento entre los tres sistemas. Reconociendo que existen dos materiales básicos (hormigón armado y acero estructural), adicionando consideraciones de velocidad constructiva, y reconociendo que las buenas soluciones de detalles estructurales son probablemente más importantes que los volúmenes de materiales, la optimización de esta estructura es en realidad parte análisis y resultados y parte experiencia. La determinación de la distribución óptima de esfuerzos entre los tres sistemas estructurales, no se encuentran sujeta a un análisis preciso, ganando mucho terreno la experiencia y el buen criterio del diseñador.

EL NÚCLEO DE SERVICIO Y LOS ENREJADOS DE LIGAZÓN

El núcleo central de hormigón armado no solamente transmite las cargas gravitacionales tributarias, sino también una porción de los cortes y momentos volcantes producto de las fuerzas de viento. Los momentos volcantes en el núcleo central pueden ser reducidos mediante el acoplamiento con las columnas de la mega estructura a través de los enrejados de ligazón. Ajustando la rigidez de estos enrejados, se puede controlar el porcentaje de traspaso de volcane hacia el exterior. Este sistema, mostrado aquí, reduce sustancialmente la componente de deformaciones por flexión del edificio. Al mismo tiempo, el sistema adoptado es el factor fundamental en el alivianamiento de las cargas sobre los pilotes críticos ubicados debajo del núcleo de servicio.



LA MEGA ESTRUCTURA

La estructura de acero se mostrará tenuemente detrás de las ventanas del edificio. Esta mega estructura estará fundada en un sobrecimiento de hormigón revestido en piedra, dando la apariencia de resistencia y permanencia. Este aspecto estético es sumamente importante para los dueños del proyecto debido a la imagen que se quiere proyectar, junto a la magnífica elegancia y esbeltez del edificio.

LAS DIAGONALES

Atendiendo el detallamiento de ingeniería, las diagonales de la mega estructura estarán formadas por cajones soldados de acero estructural. Estos serán posteriormente llenados con concreto. Este llenado proveerá una mayor rigidez, y un mayor amortiguamiento estructural durante el comportamiento no lineal de la estructura. Adicionalmente, en las zonas superiores del edificio en que los cajones presentan espesores menores, el concreto interior estabiliza las planchas de las secciones cajón de las diagonales contra el pandeo local. Sólo las placas laterales de los cajones de acero de las diagonales se conectarán a los nudos de los marcos espaciales. De este modo, se evita la complejidad de utilizar conexiones tridimensionales. Se debe entender claramente que el sistema estructural de la mayoría de los edificios altos quedan controlados generalmente por aspectos de serviciabilidad estructural más que por necesidades de resistencia, y en este caso, la reducción de capacidad de las diagonales al ser conectadas parcialmente, no implica una gran reducción de la capacidad global de los marcos.

LAS COLUMNAS

Las columnas de la mega estructura estarán materializadas por una mezcla de acero estructural y hormigón armado. En las conexiones de las mega-diagonales a las columnas de acero, estas deben tener una dimensión capaz de transferir completamente la componente de esfuerzo axial de las diagonales hacia la columna compuesta. Por sobre y debajo de la conexión, el tamaño de la columna de acero se reduce. Fuera de la sección en que la columna transfiere la carga al concreto circundante, la columna de acero necesita ser suficientemente resistente para soportar las cargas constructivas en los niveles superiores sin la colaboración del hormigón.

En los pisos inferiores del edificio, las columnas compuestas son muy pesadas, mostrando en planta una dimensión de 4,5 por 4,5 metros. En este caso, se requiere de acero de refuerzo en el interior de las columnas debido al gran volumen de hormigón.

Leslie Robertson ha diseñado, entre otros edificios, las Torres Gemelas de Nueva York y el Burj Dubai, de 800 metros (el más alto del mundo). Expondrá en Chile el próximo 16 de noviembre, a las 17 horas en el Hotel Sheraton, invitado por la oficina de Basculán y Maccioni. Informaciones: (56 2) 658 2170.