

DISEÑO ESTRUCTURAL:TAIPÈ 101

Ruben Edelstein
Ingeniero Civil
reidelstein@fibertel.com.ar

RESUMEN

El presente trabajo, permite reconocer un adecuado Diseño Estructural, por medio del examen del Edificio Taipè 101, ubicado en Taiwan, construcción que hasta el año 2004 ostentó la condición del más alto del planeta, con 101 pisos y 508 metros de altura.-Consiste en una investigación analítica a los fines de mostrar en detalle su Diseño Estructural, con el objetivo de explicar sus ideas básicas, tal como se indica:

- a.-Su volumetría, incluido recomendaciones del estudio de túnel de viento; criterio de organización de sus Planos Resistentes (P.R.),detallando sus “Supercolumnas”, integradas por sistema mixto de cajas de acero y relleno de hormigón armado, y vigas de momento de inercia variable, con el objeto de rotulación alejada de las uniones, y aumentar su ductilidad.-
- b.- Sistema de Fundación, mixto de platea y pilotes, como consecuencia de la reducida capacidad portante de los suelos afectados por la construcción.-
- c.- Mitigación de acciones eólicas y sísmicas empleando Amortiguadores de Masa Sintonizados (A.M.S.),a los efectos de mejorar su respuesta dinámica.-Para ello se examinan parámetros tales como masa y frecuencia del A.M.S., y los criterios que permiten elegir las relaciones de éstos, con la masa y frecuencia de la estructura principal, es decir, entre sus respectivas masas y frecuencias, que aseguren disminuir las de formaciones, precisamente como consecuencia del amortiguamiento alcanza do y establecer recomendaciones de diseño.-

ABSTRACT

This work, allow us to recognize a properly Structural Design, by examining Taipei 101 Building, located at Taiwan, the one, was the tallest world construction up to 2004,with 101 stories and 508 metres high.-This paper work, is an analitical research in order to show its Structural Design Details, with the main target by explainning its basic ideas, and as a result, the following aspects about Taipei 101 are analized:

- a.-Its shape, as a consequence from Wind Tunnel Test; its Resistants Plans structural organization, explainning composite “Super- columns” details, made by steel boxes filled with reinforced concrete, and tapered flange’s beam in order to improve their ductility, by locating beam yield zones far away from welded joints.-*
- b.-Cast in place concrete piles and concrete mat as foundation mixed system due to the low soil bearing capacity.-*
- c.-Mitigation of motion caused by winds and earthquakes using Tuned Mass Dampers (T.M.D.),in order to improve the structure dynamic response.-In order to get this target, parameters like mass and fundamental frequency are examined.-The way to find out the criterion in order to choose the mass and frequency optimal ratios between these mass and frequence values from T.M.D., and those from structure respectively, so that result becomes, in considerable reduction in the response of the structure due to the damping values reached, and Design recommendations are given.*

1.-Introducción:

El presente trabajo, permite reconocer las cualidades de un adecuado Diseño Estructural, por medio del análisis del edificio Taipé 101, ubicado en Taiwan, construcción que hasta el año 2004 ostentó la condición del más alto del planeta, con 101 pisos y 508 metros de altura.-

Es por ello que en este trabajo, de Taipé 101, se analizará en los siguientes aspectos:

- a.-Su volumetría incluído recomendaciones del estudio de túnel de viento, y criterio de organización de sus Planos Resistentes Verticales (P.R.V.).-
- b.-Sistema de Fundación, mixto de platea y pilotes.-
- c.-Mitigación de acciones eólicas y sísmicas por medio Amortiguadores de Masa Sintonizados (A.M.S.),a los efectos de mejorar su respuesta dinámica.-

2.-Volumetría:

En la Figura 1 se observa la geometría de Taipé 101, caracterizado por un volúmen tronco piramidal hasta el piso 26.-A continuación se genera por 8 repeticiones de sectores de 8 pisos, pues el número 8 tiene una connotación en la cultura china.-

A partir del piso 92 hasta el piso 101, su volumetría se reduce.-

Es decir su morfología responde al criterio de reducir su masa vibrante en altura.-



Figura 1.Torre Taipé 101 concluido.

En la Figura 2 se tiene la planta tipo de los pisos 26 al 90, en la cual se advierte el tratamiento especial de las esquinas, consistente en la sustitución de las esquinas del cuadrado original, de 53 m de lado, por un “sistema escalonado”, que afecta 5,16m a ambos lados, y en cada esquina, a los efectos de minimizar los vórtices detectados en el túnel de viento, en la forma original, tal como se indica en Figura 3.-

Los estudios en túnel de viento, han demostrado que este detalle permite una reducción del momento flector en la base, en un 25%.-

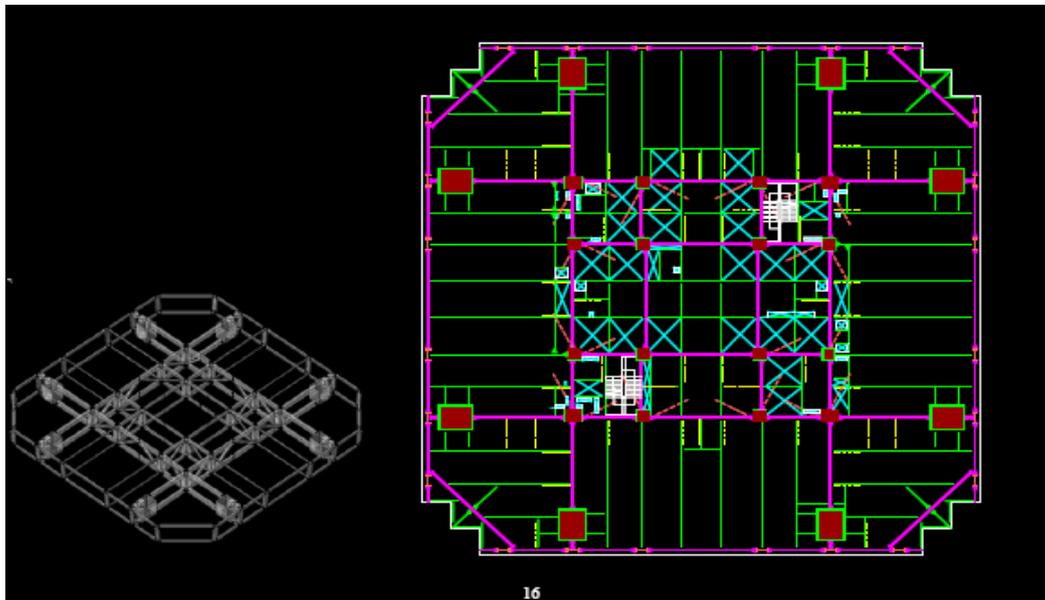


Figura 2. Planta estructura tipo pisos 26 al 90.



Figura 3. Detalle de escalonado de esquina, para atenuar vórtice.

3.-Organización de Planos Resistentes:

La estructura de los entrepisos, es de tipo mixta, formada por un deck metálico, completado con hormigonado en el lugar.-

En la Figura 2, se advierte la disposición de 2 P.R.V. principales en cada dirección, y de 2 P.R.V. secundarios, en cada dirección.-

A los efectos de generar estos P.R.V., se requieren 8 “Supercolumnas” en el perímetro de la fachada y 16 columnas que integran el núcleo central de circulación vertical.

Estos P.R.V. son de acero, y las “Supercolumnas”, hasta el piso 62 están integradas

por secciones cajón, de acero rellenas con hormigón y armaduras convencionales.-

En la Figura 4 se indica en su parte izquierda, la elevación de uno de los P.R.V. principales, que se integra con dos "Supercolumnas" de fachadas paralelas, y cuatro columnas alineadas que integran el núcleo central.-

Estas 4 columnas se vinculan entre sí, con sistema de diagonales en todos los pisos, y a su vez con 2 "Supercolumnas" mediante vigas reticuladas, de uno o dos pisos de altura, que se disponen, cada 8 pisos.-

En la parte central superior de la Figura 4 se detalla una viga reticulada dispuesta cada ocho pisos y según el perímetro de la planta, a los fines de actuar como estructura de transición de los P.R. de fachada, de tipo inclinado, a los fines de recibir sus cargas gravitacionales.-

En la misma parte central de la Figura 4, parte inferior, se indica la planta tipo del sector en forma de tronco de pirámide, donde el partido es cuadrado y presenta además de las "Supercolumnas" perimetrales de Figura 2, columnas de esquina.-

En el sector troncopiramidal, las "Supercolumnas" son inclinadas, acorde a dicha volumetría.-

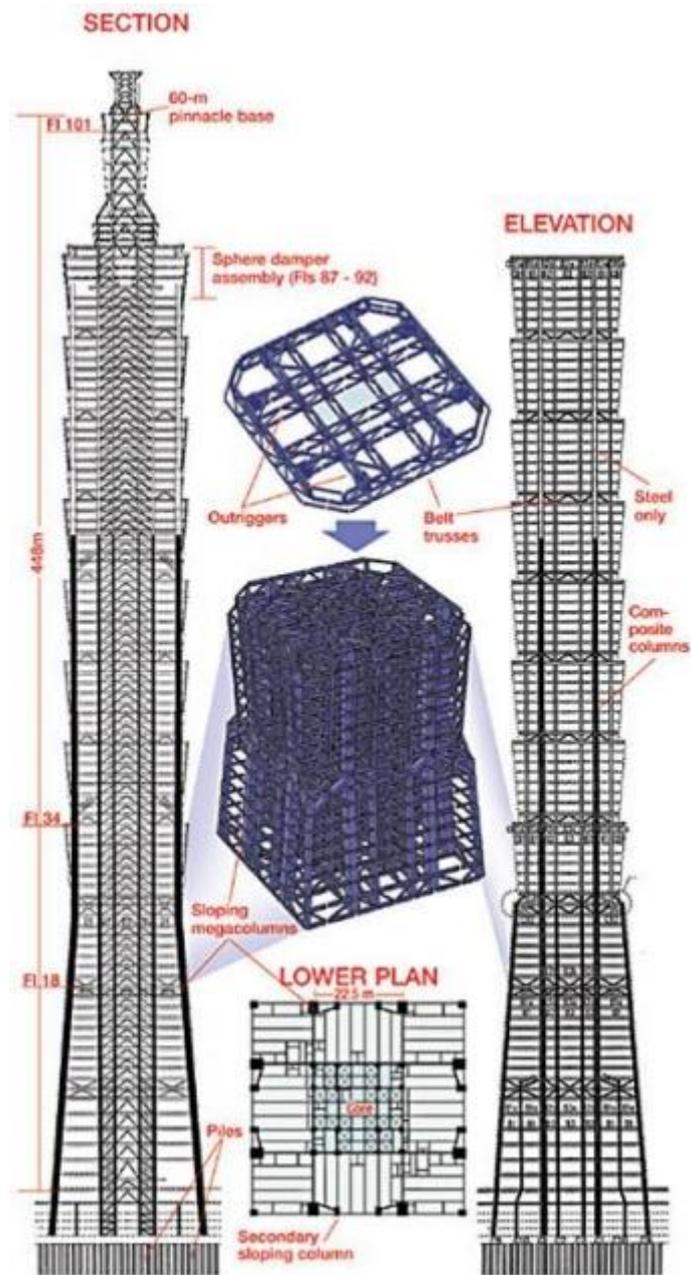


Figura 4. Corte, planta sector tronco piramidal y elevación

3.a.-Supercolumnas:

Atento a la magnitud de las cargas que deben resistir las “Supercolumnas”, se integran con secciones cajón, con una dimensión máxima de 2,40m x 3,10m, formadas por planchas de acero de 80 mm de espesor, con rigidizadores de alma en su interior para evitar el pandeo localizado, tal como se indica en Figura 5.-

Estas secciones cajón son de tipo mixto, es decir acero y relleno con hormigón hasta el piso 62, a partir del cual no se adiciona el hormigón, produciendo una reducción de la capacidad portante acorde a la disminución de solicitaciones.-

En el diseño se ha tomado en consideración la influencia de la retracción, en especial la influencia de la sección mixta, acero hormigón, hasta el piso 62.-



Figura 5."Supercolumna" en proceso de ejecución

3.b.-Vigas de conexión de momento de inercia variable:

Las vigas de conexión en correspondencia de todos los pisos, precisamente las que vinculan las "Supercolumnas" con las columnas del núcleo central, tal como se indica en sector izquierdo de la Figura 4 y las que se ubican en el vano central definido por las columnas que integran el núcleo central, son secciones doble te, cuyas alas presentan entalladuras "suaves", tal como lo indica la Figura N° 6, precisamente para alejar la formación de rótulas plásticas de las secciones críticas de unión entre vigas y columnas.-

Es bien conocido la ventaja de alejar dichas rótulas plásticas, dentro de ciertos límites, mediante el recurso de producir estas entalladuras.-



Figura 6.Viga con entalladura en sus alas

En la Figura 7 se tiene en detalle esta misma viga con mayores precisiones de las reducciones de ancho de sus alas y se destaca la sección cajón de columnas.-

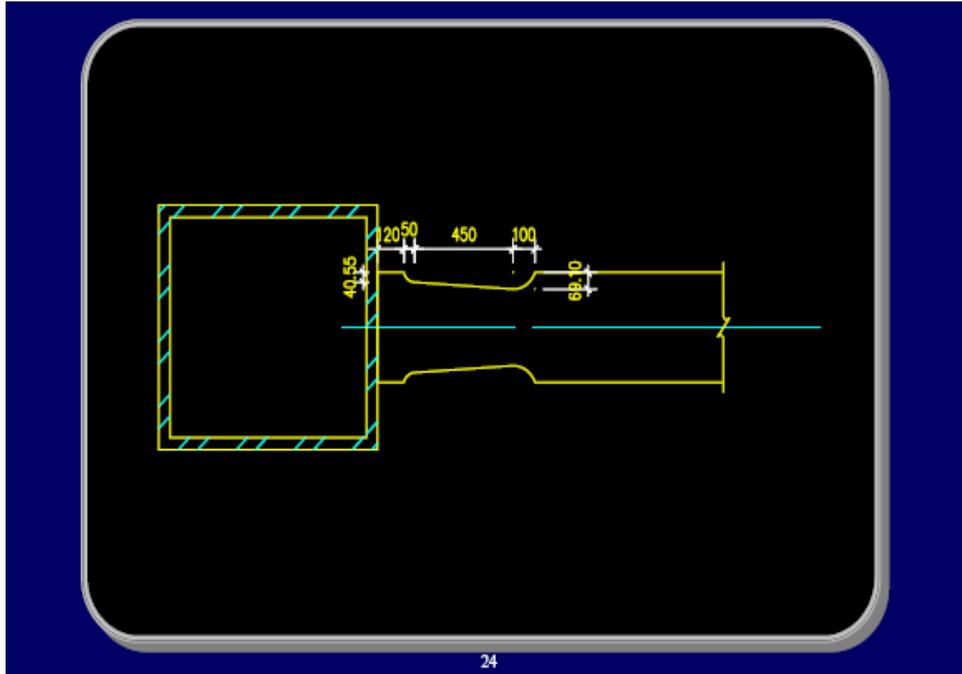


Figura 7. Detalle en planta de reducciones de alas de viga

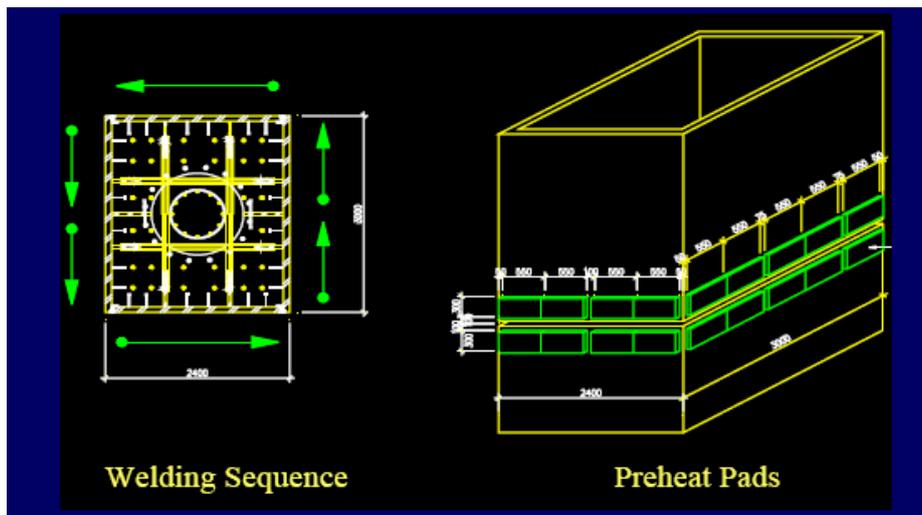


Figura 8. Supercolumnas, secuencia de soldado y sectores de precalentamiento

Como consecuencia del proceso constructivo por sectores de estas “Supercolumnas”, en la Figura 8 se indica la secuencia de soldado y en elevación las placas para el precalentamiento.-

En la Figura 9 se observa el izado de una de estas columnas cajón y en la Figura 10 se tiene una columna en su posición final y su vinculación con las vigas reticuladas.

Resulta de interés, en la Figura N° 10, destacar el detalle de los rigidizadores de alma del cordón de viga reticulada, precisamente en la ubicación adecuada, es decir para recibir la influencia de la sollicitación de las diagonales, y así evitar el pandeo del alma del cordón premencionado.-



Figura 9. Operaciones de izado de supercolumna



Figura 10. Ensamblaje de vigas reticuladas y ubicación de rigidizadores de alma

3.c.-Sistema de Fundación:

Acorde a los Estudios de Suelos y a la magnitud de las cargas a transferir, se optó por un Sistema Mixto de Fundación, es decir una platea de hormigón armado, de espesor variable tal como se indica en Figura 11 y un conjunto de pilotes de manera de alcanzar la cota adecuada de fundación, pues se debían atravesar mantos de escasa capacidad portante, primero de arcilla y depósitos aluvionales, hasta penetrar y alcanzar el manto de arenisca o roca de arena con una cota máxima de: -80,00 m, tal como se indica en la Figura 12, a los fines de lograr una buena longitud de entrega de los pilotes en el estrato de arenisca.-

La resistencia de punta de los pilotes fue despreciada y la fricción lateral fue reducida en 20%, a los efectos de evitar asentamientos perjudiciales.-

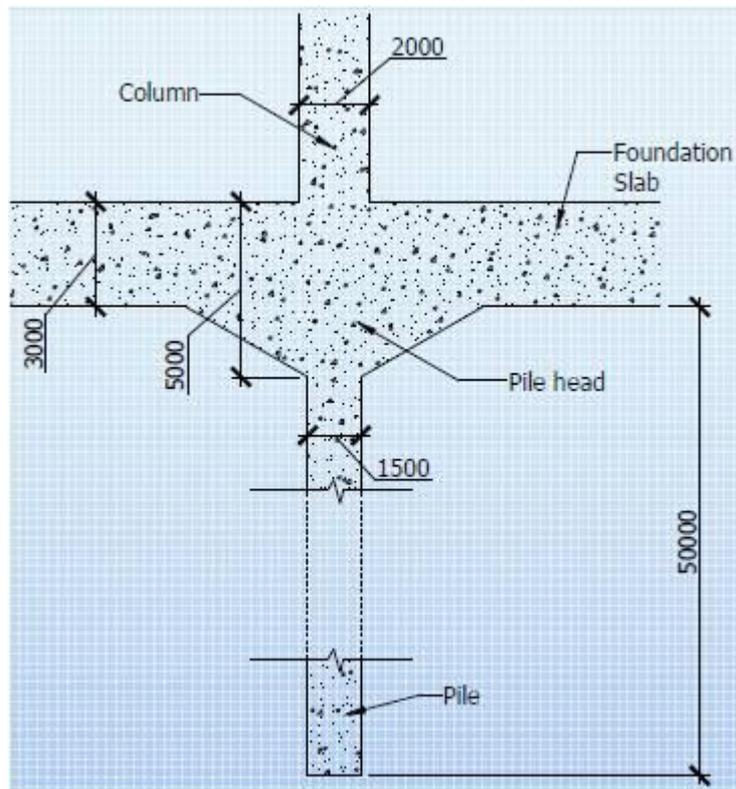


Figura 11. Detalle platea de fundación de espesor variable y pilote

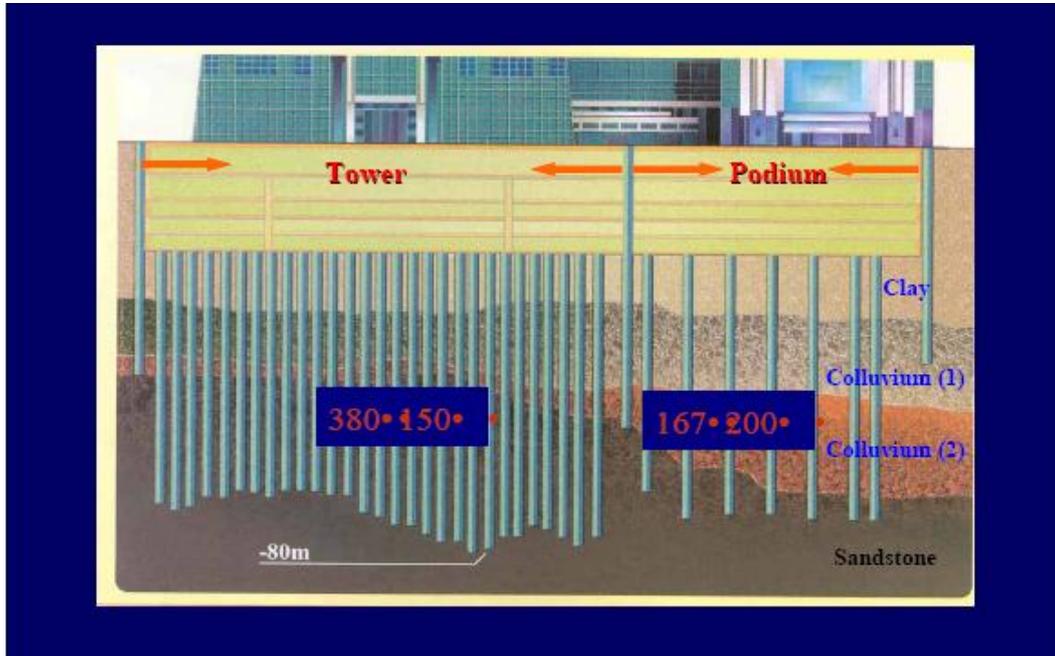


Figura 12. Mantos de suelo afectados por el sistema platea pilotes

En la Figura 13 se detalla armaduras de cilindros de fundación y conducciones pérdidas a los fines de limpieza y hormigonado.-



Figura 13. Detalle armaduras de pilotes y conductos perdidos de limpieza

En la Figura 14 se detalla el Ensayo de Carga Estático de pilote.-



Figura 14. Ensayo de Carga Estático de pilote

4.-Mitigación de Acciones Eólicas y Sísmicas:

4.a.-Introducción al concepto de Amortiguadores de Masa Sintonizados.:

Cuando un edificio es excitado con una acción externa variable que actúa con una frecuencia característica cercana a una de sus frecuencias naturales, la respuesta de la construcción, es decir, la amplitud de las vibraciones resultantes, crecerá de forma exponencial pudiendo llegar al colapso.-

Este fenómeno, conocido como resonancia, será tanto más peligroso y notorio, cuanto menor sea el amortiguamiento que posea el sistema.-

Por otra parte toda construcción presenta, en función de su masa, rigidez y amortiguamiento, un comportamiento dinámico característico que puede definirse por sus parámetros modales: modos, frecuencias naturales de vibración y amortiguamientos modales.-

En los edificios de muchos pisos y en especial, las torres, se tiende a reducir su masa para atenuar los efectos sísmicos y si son esbeltas, y si tienen un amortiguamiento natural muy pequeño, y en consecuencia, las hace más sensibles a las oscilaciones generadas por el viento y los sismos.-

Una de las soluciones alternativas para los problemas de seguridad estructural e incomodidad ante las vibraciones en edificios altos, es la utilización del recurso de control pasivo de vibraciones, en particular los amortiguadores de masa sintonizados de ahora en adelante : A.M.S.-

En la Figura 15 se tienen dos diagramas, donde se representan la dependencia entre desplazamientos relativos y frecuencias relativas, correspondiendo el de la izquierda a la estructura sin A.M.S. y el de la derecha la estructura con A.M.S..-

El de la izquierda pone en evidencia el notorio crecimiento de los desplazamientos relativos, en correspondencia de la resonancia, y el de la derecha la notoria disminución de los desplazamientos relativos, como consecuencia de la incorporación del A.M.S.-

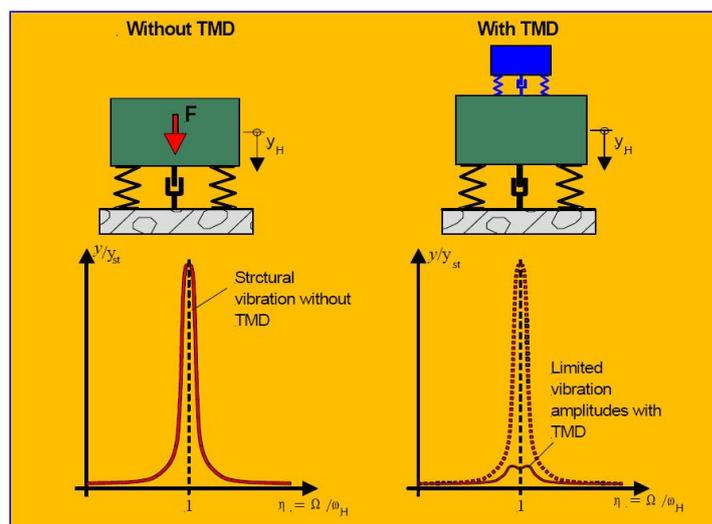


Figura N° 15. Diagramas de resonancia sin y con A.M.S.

En el edificio Taipè 101, se han empleado dos sistemas de Amortiguadores de Masa Sintonizados, uno para el cuerpo principal, y el otro para el sector del pináculo.-

El A.M.S. del principal consiste en una esfera de 650 ton.(1ton=9810N) y 6,00 m. de diámetro y que aporta su masa, y hallándose suspendida desde el piso 92, afectando hasta el piso 88, mediante 4 tensores, de 4 cables cada uno y un sistema de 8 pistones hidráulicos, tal como se indica en el corte de Figura 16.-

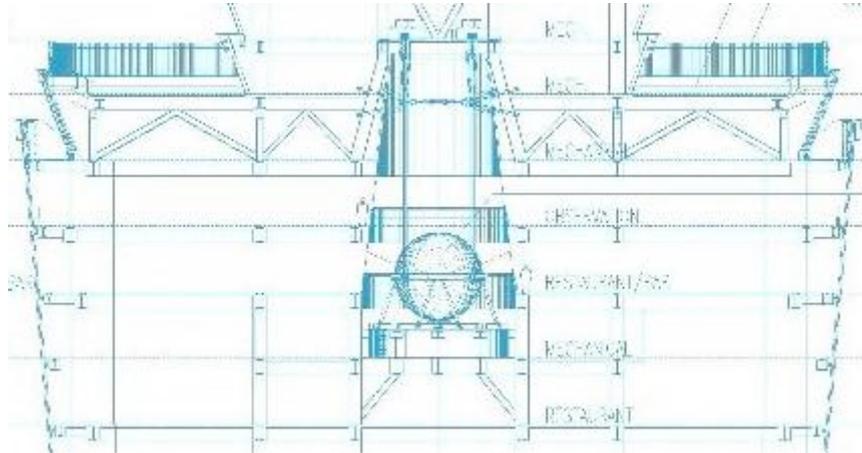


Figura 16.Esfera suspendida y corte parcial entre pisos 88 a 92

En la Figura 17 se tiene la esfera en etapa de construcción, la cual se integra con chapas de 12,5 cm de espesor, soldadas entre sí y a un sistema de anillos cumpliendo la función de hamaca, al cual se vinculan los 4 tensores.-

En la Figura 18, se tiene la esfera concluída y se observa el sistema de 8 pistones que interactúa a nivel del anillo horizontal, contribuyendo a disipar energía.-



Figura 17.Esfera integrante del A.M.S. en etapa de ejecución

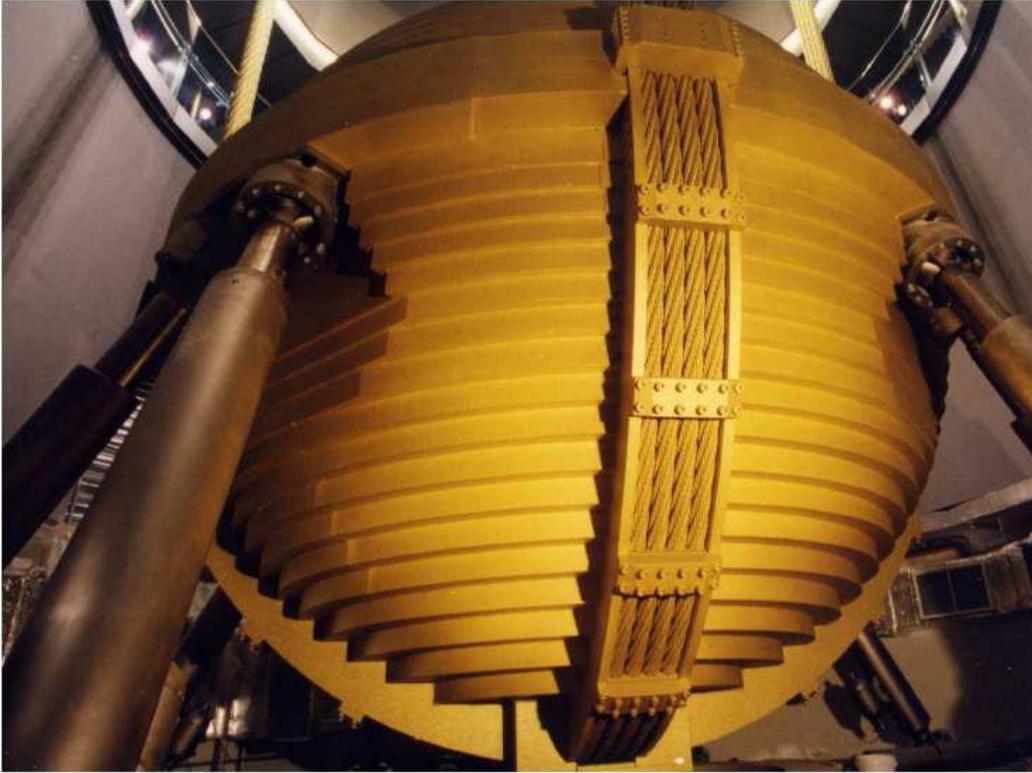


Figura 18. Sistema A.M.S. terminado

En la Figura 19 se tiene el esquema completo de este A.M.S.-

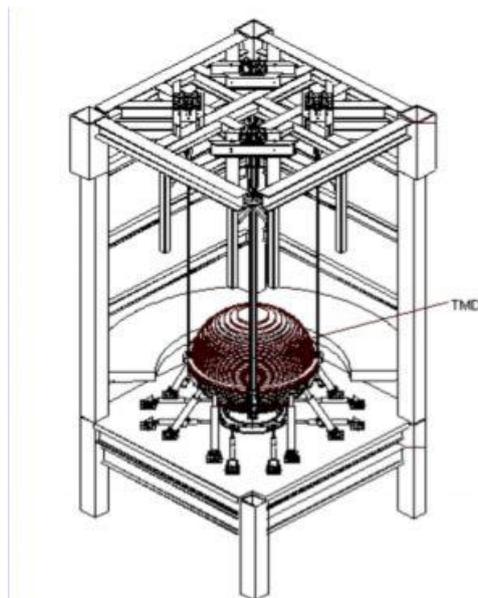


Figura 19. Esquema completo del A.M.S. principal

Por lo que antecede, un A.M.S. es un sistema constituido conceptualmente por una masa, una rigidez y una amortiguación que se incorporan en la parte superior de la estructura principal, con el objetivo de reducir la respuesta dinámica de la estructura a una determinada frecuencia o en el estrecho entorno de la misma.-

De esta forma, el A.M.S. se “sintoniza” a una frecuencia natural de la estructura principal, de tal manera que cuando esa frecuencia es excitada, es básicamente él quien resuena, introduciendo amortiguamiento al sistema y disipando la energía, de manera que la vibración de la estructura principal a dicha frecuencia de sintonización se minimiza de forma muy importante.-

En la Figura 20 se tiene un esquema del A.M.S. secundario, es decir el sistema que se ubica en el sector del pináculo.-

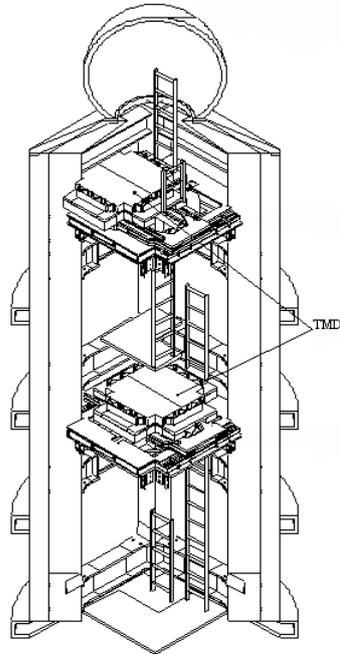


Figura 20. Esquema completo del A.M.S. secundario

En esta Figura 20 se observa la ubicación de 2 masas deslizantes, con posibilidades de movimiento en dos direcciones perpendiculares, de 5 ton. (1ton=9810N) cada una, y que tiene por objeto mitigar las vibraciones originadas por el viento, con la formación de vórtices, y en especial, toda vez que el pináculo, implica un cambio brusco de la volumetría.-

4.b.- Métodos para estimar los parámetros del A.M.S.:

Este trabajo explicita, como seleccionar los parámetros óptimos, los que son formulados en función de la relación de: frecuencias, masas, y amortiguamientos, todos ellos, entre los respectivos valores del A.M.S. y la estructura principal.-

En consecuencia se definen las siguientes relaciones, clásicas de la Dinámica Estructural:

$$f = \omega_t / \omega_o \quad (1)$$

$$\mu = m/M \quad (2)$$

$$\xi = c/2m \omega_t \quad (3)$$

En estas expresiones, se tienen los siguientes significados:

f: Relación de sintonizado.-

ω_t : Frecuencia fundamental de vibración del A.M.S.-

ω_o : Frecuencia fundamental de vibración de la estructura.-

μ : Relación de masas.-

m: Masa del A.M.S.-

M: Masa generalizada de la estructura para un determinado modo de vibración computada a partir de factor modal de participación unitario.-

ξ : Relación de amortiguamiento del A.M.S.-

c: Factor de amortiguamiento del A.M.S.-

Den Hartog fue uno de los primeros en investigar el uso de los A.M.S., proponiendo para las estructuras no amortiguadas, los siguientes parámetros:

$$f=1/(1+ \mu) \quad (4)$$

$$\xi=\{3 \mu/[8(1+ \mu)]\}^{0.5} \quad (5)$$

Este criterio de Den Hartog no resultó eficaz para mitigar las acciones sísmicas y recién los estudios de R. Villaverde, constituyeron un avance, aunque no definitivo.-

Villaverde (1985) encontró que el A.M.S. debe estar en resonancia con la estructura principal, para lo cual es necesario que según la (1), el valor de $f=1$, era el adecuado y que la relación de amortiguamiento ξ debía ser una combinación del amortiguamiento de la estructura β , de la relación de masas μ y de la amplitud de la forma modal a nivel del A.M.S., que se designa Φ , y tal como se indica a continuación:

$$\xi= \beta + \Phi(\mu)^{0.5} \quad (6)$$

Finalmente es F.Sadek y otros, donde encontraron que el mejor desempeño de los A.M.S. ocurre cuando los dos primeros modos de vibración del conjunto estructura y amortiguador tienen aproximadamente las mismas razones de amortiguamiento extremo no satisfecho por la metodología de Villaverde.-

Para lograrlo Sadek establece la siguiente condición:

$$\xi_{e+A.M.S.} > (\xi + \beta)/2 \quad (7)$$

Es decir que la relación de amortiguamiento para el conjunto de la estructura principal y el A.M.S. debía ser mayor que el promedio de las razones de amortiguamiento de la estructura y el A.M.S..-

F.Sadek y otros, proponen para una estructura amortiguada y de un grado de libertad, las siguientes fórmulas, a los fines de la elección de los parámetros adecuados

para el sistema A.M.S.:

$$f = [1/(1 + \mu)] \cdot \{1 - \beta[\mu / (1 + \mu)]^{0,5}\} \quad (8)$$

$$\xi = \beta / (1 + \mu) + [\mu / (1 + \mu)]^{0,5} \quad (9)$$

Las fórmulas precedentes, demuestran que los parámetros del A.M.S. tales como f y ξ se pueden obtener en función de la relación de masas y del amortiguamiento de la estructura.-

Estas fórmulas también demuestran que a mayor amortiguamiento β de la estructura, y para mayores valores de μ , resulta menor valor de "f", es decir menor valor de sintonizado, y que a mayores valores de β , para valores constantes de μ , es decir iguales valores de relación de masas, resultan mayores valores de ξ .-

En la Tabla 1 se indican valores de f y ξ , en función de los valores de μ y β seleccionados, confirmando el sentido de las variaciones anticipadas.-

Las ventajas del empleo de A.M.S. se advierte fácilmente, pues si la relación de masas es $\mu = 0,15$ y $\beta = 0,05$, resulta $\xi = 0,4042$, es decir un amortiguamiento significativo.-

μ	$\beta = 0,00$		$\beta = 0,02$		$\beta = 0,05$	
	f	ξ	f	ξ	f	ξ
0,000	1,0000	0,0000	1,0000	0,0200	1,0000	0,0500
0,025	0,9756	0,1562	0,9726	0,1757	0,9680	0,2048
0,050	0,9524	0,2182	0,9482	0,2372	0,9420	0,2656
0,100	0,9091	0,3015	0,9036	0,3196	0,8954	0,3466
0,125	0,8889	0,3333	0,8830	0,3511	0,8741	0,3774
0,150	0,8696	0,3612	0,8633	0,3785	0,8538	0,4042

Tabla 1. Valores de μ , β , f y ξ

Para estructuras amortiguadas con mas de un grado de libertad, se obtienen los parámetros adecuados para el sistema A.M.S., de acuerdo a las siguientes fórmulas:

$$f = [1/(1 + \mu \Phi)] \cdot \{1 - \beta[\mu \Phi / (1 + \mu \Phi)]^{0,5}\} \quad (10)$$

$$\xi = \Phi \{ \beta / (1 + \mu) + [\mu / (1 + \mu)]^{0,5} \} \quad (11)$$

Es oportuno aclarar que cuando se refiere a estructura con un grado de libertad, en realidad son 2 grados, y análogamente para la estructura de "n" grados de libertad, en realidad son n+1 grados de libertad.-

En definitiva, todo este estudio tiene por objetivo reducir las deformaciones, como consecuencia del aumento del amortiguamiento.-

5.-Conclusiones de Diseño Estructural:

En el edificio Taipè 101 se verifican las siguientes conclusiones de Diseño Estructural:

a: Las ventajas de la simetría de la planta, lo cual minimiza los problemas torsionales, ya sea debido a acciones eólicas o sísmicas.-

b: La ventaja del uso de las "supercolumnas", en razón de la magnitud de las solicitaciones.-

c: El empleo de vigas de momento de inercia variable, de manera de alejar la formación de rótulas plásticas, de las secciones de unión viga-columna, logrando de ese modo evitar la ubicación de las rótulas plásticas en coincidencia con las uniones y aumentando la ductilidad de la estructura.-

d: Atento a la reducida capacidad portante de los estratos superficiales del suelo y la magnitud de las cargas, se hace necesario el uso de sistema mixto de fundación, integrado por platea y pilotes, práctica frecuente en edificios importantes tales como las Torres de Kuala Lumpur, Commerzbank de Frankfurt y otros.-

e.-Como resultado de la localización del edificio, y en prevención de la acción de sismos y vientos de importancia, la construcción posee un doble sistema de A.M.S., el primero para proteger el sector más importante, hasta el piso 92, con el A.M.S. con formado por un gran péndulo y amortiguadores, y el sistema secundario destinado al sector pináculo, integrado por dos masas deslizantes.-

f.- La inclusión de sistemas de A.M.S. implica la selección de los parámetros μ y f , que permiten lograr la reducción de las deformaciones, en base al aumento del amortiguamiento del conjunto estructura y A.M.S.-

Las ventajas del empleo de A.M.S. se advierte si la relación de masas $\mu=0,15$ y $\beta=0,05$ resulta un valor de ξ del orden del 40%, es decir un amortiguamiento significativo.-

g.-La conveniencia de introducir el estudio de la estructura de edificios de relevancia en la Enseñanza de la Ciencia de las Estructuras, toda vez que permite la difusión y aprendizaje de soluciones no frecuentes.-

Bibliografía:

1.-Wind Issues in the Design of Tall Buildings by Peter A.Irwin.-

2.-Structural Design of Composite Super-Columns for the Taipei 101 Tower by Shan-Song Shieh;Ching Chang-Chang and Jiun-Hong Jong.-

3.-Structural Design of Taipei 101 Tower by Ching Chang Chang.-

4.-A Method of Estimating the Parameters of Tuned Mass Dampers for Seismic Applications by Fahim Sadek,Bijan Mohraz,Andrew W.Taylor and Riley M.Chung.-

Ing.Civil Ruben Edelstein

Ex-Profesor Titular de Estructuras II de F.A.U.D. y Ex-Profesor Adjunto de Construcciones de Hormigón Armado de la F.C.E.F y N. ambas de la U.N.C..- Profesor Visitante en el Depto. Ingeniería Civil de la University of Southern California (L.A.,U.S.A.).

Autor de 4 libros sobre Diseño y Cálculo Estructural, y de cerca de 40 trabajos publicados en Congresos de Estructuras.-Director de varios Proyectos de Investigación en U.N.C..-Su actividad profesional se desarrolla en el Diseño y Cálculo Estructural.