

modelo matemático para estructura tubular de edificio antisísmico

AGUSTIN MAZZEO y ARNIM DE FRIES, Ingenieros Civiles

sinopsis El modelo matemático objeto del artículo fue desarrollado al estudiar la solución estructural para un edificio con estructura principal de acero, proyectado para las condiciones sísmicas de la ciudad de Caracas. De las varias alternativas analizadas, se concluyó que la que mejor permitía cumplir con las exigencias del proyecto consistía en utilizar como solución, para resistir los efectos horizontales, el sistema estructural conocido como tubo exterior flexible. El análisis de las características espaciales del tubo perimetral mediante el uso de una imagen plana de la estructura, constituye el modelo matemático que se describe en el artículo.

594 - 1

Descripción del edificio

La planta típica y un corte esquemático del edificio, destinado a comercios, oficinas y estacionamientos, se muestran en las figuras 1 y 2.

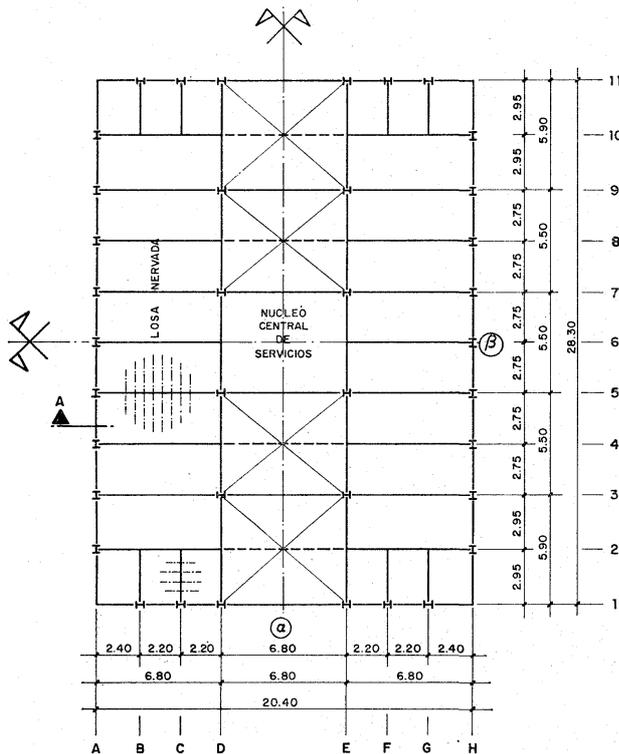


Fig. 1. Planta estructural.

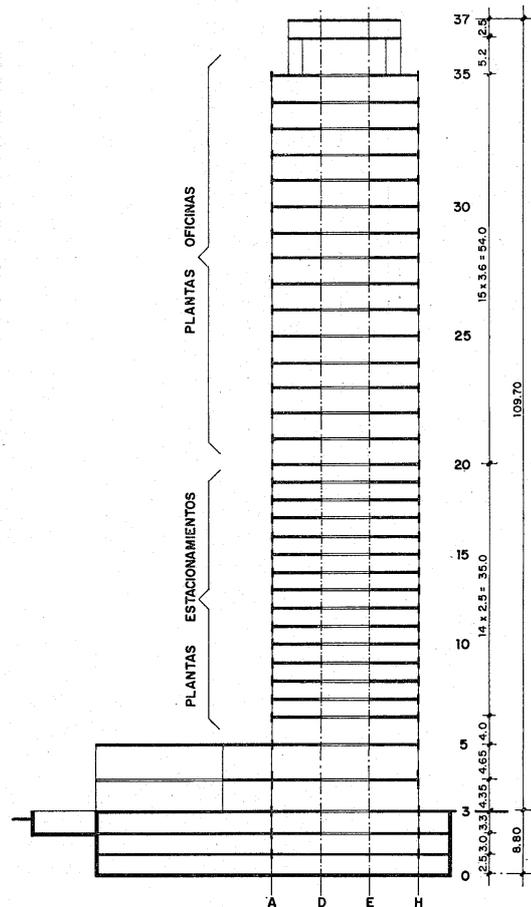


Fig. 2. Corte esquemático -A-.

53

En la planta se indica el piso de los niveles de oficina, y los recuadros con diagonales muestran la situación de las plataformas-ascensores de vehículos, en las plantas inferiores de estacionamientos.

Las diversas alturas de los entrepisos varían hasta el nivel 6, son constantes en 2,50 m en las plantas de estacionamientos y aumentan a 3,60 m en las plantas de oficinas, dando al edificio una altura total de 118,50 m. La estructura está empotrada en la cimentación teniendo 37 niveles flexibles, y está debidamente separada de los cuerpos bajos adyacentes por juntas estructurales. Las columnas A-4, A-8, H-4 y H-8 de las fachadas no llegan a la cimentación por interrumpirse en el nivel 4.

La elección de la solución

La solución estructural estaba principalmente condicionada por las directrices especiales que para edificios altos se establecen en la Norma provisional para Construcciones Antisísmicas (MOP-1967) (1). Dichas directrices se pueden resumir en los siguientes puntos:

Al sobrepasar una determinada altura (60 m) o un número de niveles (20) se deberá investigar la conducta dinámica de la estructura.

Una vez determinadas las fuerzas que origina el análisis dinámico, ellas podrán ajustarse afectándolas de un factor escalar tal que la fuerza de corte total en ningún piso resulte inferior a valores prefijados por la Norma. Es decir, el diseño se realiza con fuerzas horizontales cuya magnitud mínima se fija en la Norma y cuya distribución en la altura del edificio corresponde a la respuesta dinámica de la estructura ante una excitación particular.

Al someter el edificio a la acción de las fuerzas determinadas en los apartados a) y b), las deformaciones laterales horizontales de un piso respecto a otro no deberán superar el 0,002 de la altura entre los dos.

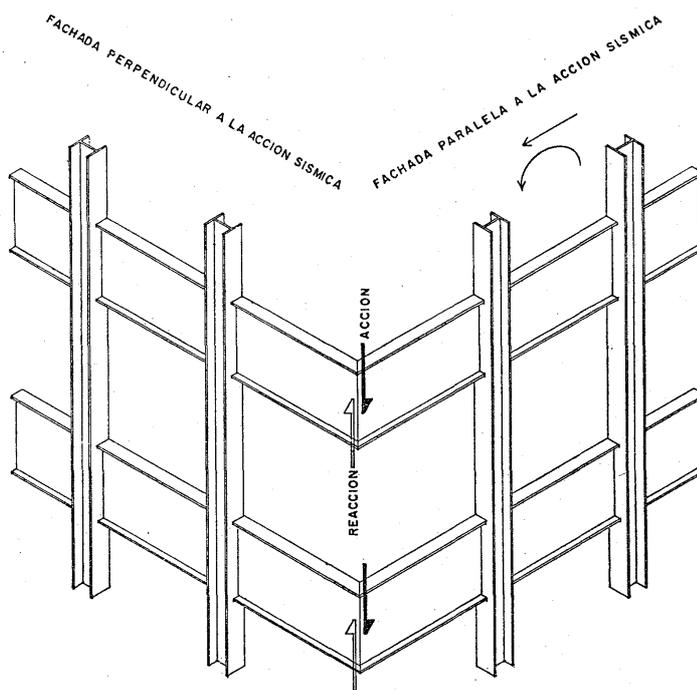


Fig. 3. Efecto tubular en la esquina: Al actuar el sismo, en cada una de las esquinas del edificio, las vigas perimetrales transmiten a la correspondiente viga perpendicular fuerzas de corte verticales. Esa interacción hace trabajar a las cuatro fachadas conjuntamente, convirtiendo la simple acción de pórtico de cada cara del edificio en un conjunto tridimensional más efectivo.

Conviene, por lo tanto, disponer una estructuración de limitada deformabilidad lateral, pero de conducta esencialmente flexible, a fin de disminuir la respuesta dinámica de la estructura.

(1) Norma provisional para construcciones antisísmicas. Ministerio de Obras Públicas, 1967, Caracas, Venezuela.

Estructura tubular del perímetro

Las exigencias anteriores se logran colocando las columnas en el perímetro del edificio muy cerca una de la otra, unidas en cada piso por una viga perimetral de gran rigidez.

Se forma así en cada fachada del edificio, un pórtico que por sus luces cortas es de poca deformabilidad lateral, pero que mantiene una conducta dinámica esencialmente flexible. Además, deliberadamente se suprimieron las columnas en las esquinas, para inducir la interacción entre las cuatro fachadas del edificio, interacción que se manifiesta cuando al actuar efectos horizontales se transmiten fuerzas cortantes verticales de una fachada a la perpendicular, tal como está esquematizado en la figura 3. A la transmisión de fuerzas o interacción

en la esquina se le denominará efecto tubular y, a la estructuración resistente constituida por las 4 fachadas, tubo perimetral.

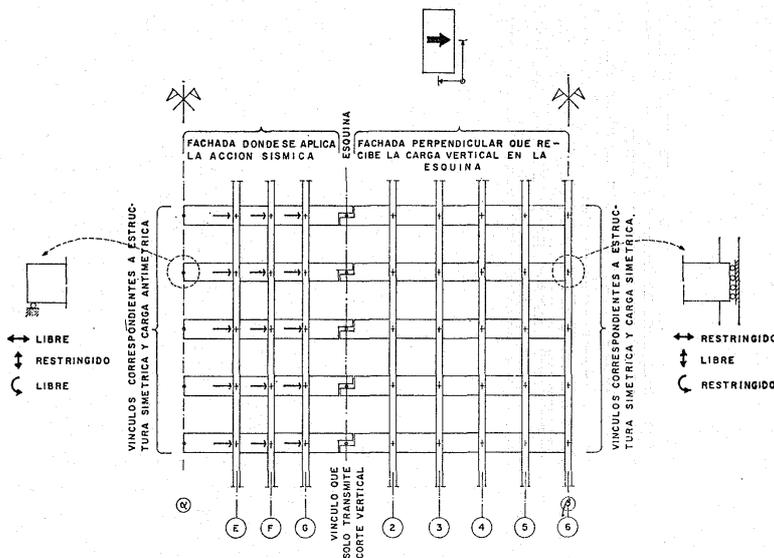


Fig. 4. Modelo matemático del tubo perimetral (sentido transversal).

El conjunto perimetral de conducta flexible es capaz de resistir la totalidad de los efectos sísmicos, además de servir de apoyo a las vigas de los entrepisos. La modalidad de llevar los efectos sísmicos a la fachada resulta muy económica porque es posible usar vigas altas, teniéndose por otra parte la máxima resistencia que es capaz de dar el edificio al absorber las sollicitaciones en la periferia de la planta.

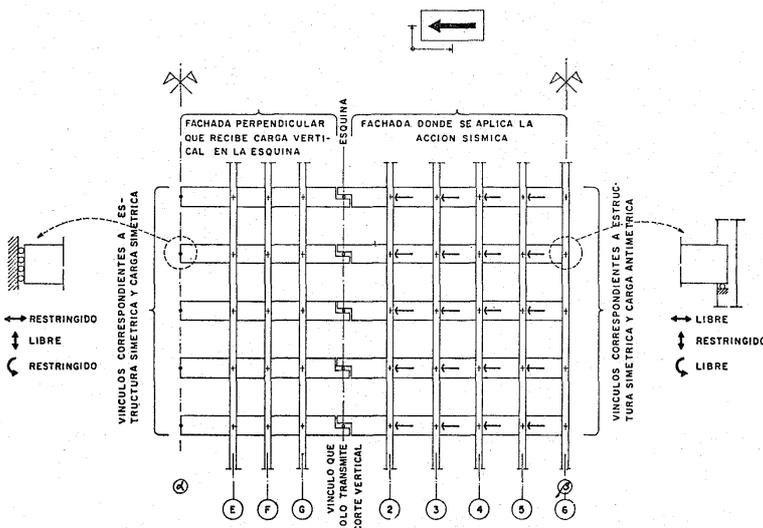


Fig. 5. Modelo matemático del tubo perimetral (sentido longitudinal).

Modelo matemático de la estructura tubular

Los modelos matemáticos para el análisis estructural del edificio, en cada sentido, se muestran en las figuras 4 y 5.

La acción del tubo perimetral es considerada de la siguiente forma:

Cada pórtico de la fachada del edificio, paralelas a la acción sísmica que se considere, actúa sobre el pórtico de la fachada perpendicular, a través de la fuer-

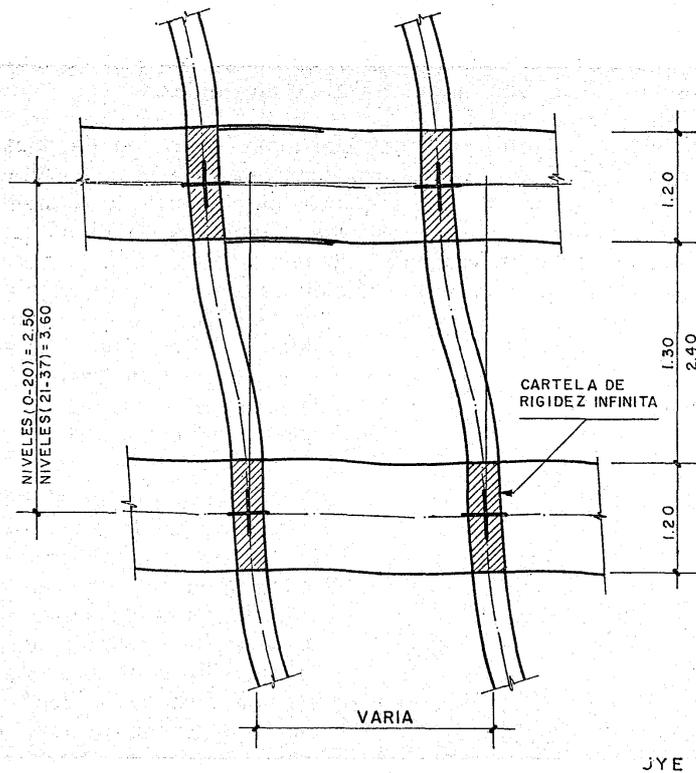


Fig. 6. La dimensión de la viga perimetral disminuye la longitud deformable de las columnas. Se reduce así la deformabilidad de la estructura manteniendo sus características dúctiles.

za de corte vertical que transmiten en cada piso las vigas altas del perímetro en las esquinas del edificio. Para lograr esa interacción se han suprimido deliberadamente las columnas de las esquinas, pues su presencia concentraría en ellas la transmisión explicada, anulándose con ello la acción tubular. Por esa razón, en el modelo matemático, se han colocado en correspondencia con las esquinas vínculos que sólo son capaces de transmitir fuerzas de corte vertical, garantizándose así que las fuerzas horizontales serán sólo aplicadas en cada dirección a los pórticos colocados en el plano en el cual se efectúa la acción, y no a los situados en el plano perpendicular; pues el vínculo del modelo matemático no transmite deformaciones laterales ni fuerzas de corte horizontales a la dirección perpendicular. Por lo tanto, los

efectos horizontales aplicados a la estructura son siempre **resistidos** por el conjunto tubular formado por el perímetro del edificio.

Debido a las simetrías de cada sentido, es posible analizar la cuarta parte de la estructura tubular, como un pórtico plano desarrollado, es decir, se obtienen las propiedades espaciales del conjunto tubular mediante el análisis de una imagen plana de la estructura. Dichos pórticos corresponden a los modelos matemáticos usados y se han indicado en las figuras con las vinculaciones correspondientes a la esquina, y a cada dirección.

Las fachadas que reciben la acción son pórticos simétricos con cargas antimétricas en los nodos, y las fachadas perpendiculares a la acción son pórticos simétricos con cargas simétricas en las esquinas. En el modelo se considera la influencia de la dimensión de la viga perimetral de cada piso, dando a los extremos de cada columna cartelas de rigidez infinita en la zona común a ellas y a la viga perimetral (fig. 6). Esto significa que el nodo indeformable en vez de ser puntual (teórico), tiene dimensiones discretas y el modelo es más representativo de la realidad ya que el análisis considera las verdaderas dimensiones deformables de los miembros. De esa manera se reduce la deformabilidad lateral de la estructura manteniendo sus características flexibles, condiciones que constituyen uno de los objetivos del diseño antisísmico.

El modelo fue usado para analizar la conducta dinámica de la estructura, y para el análisis bajo las solicitaciones de diseño.

En adelante, se denominará modelo tubular o acción tubular, para diferenciarlo de la acción de pórtico plano que no transmite corte vertical en las esquinas.

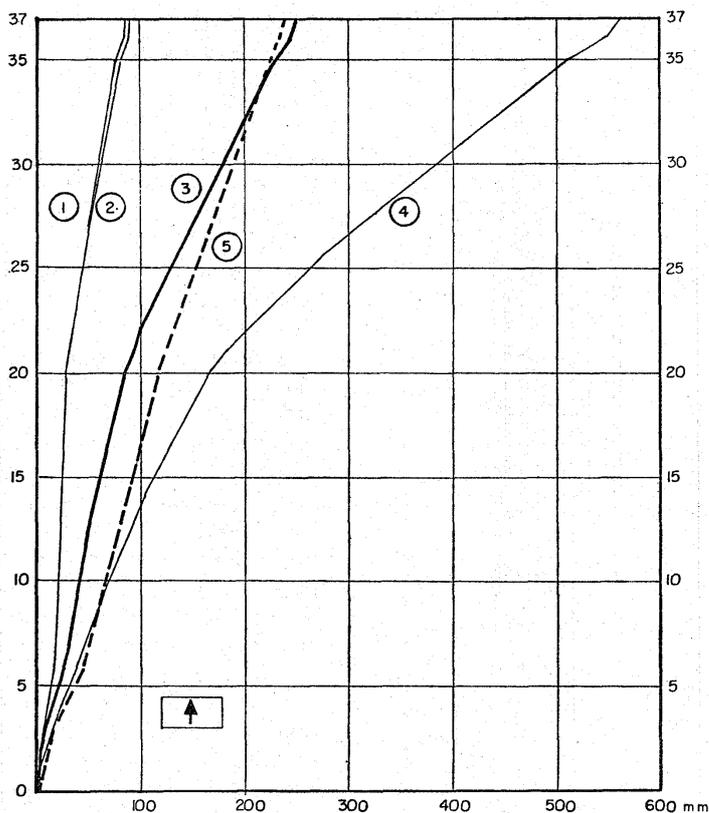


Fig. 7. Deformaciones laterales (sentido transversal).

- ① Con transmisión de corte y sin deformación axial de columnas.
- ② Sin transmisión de corte y sin deformación axial de columnas.
- ③ Con transmisión de corte y con deformación axial de columnas.
- ④ Sin transmisión de corte y con deformación axial de columnas.
- ⑤ 2% permisible (normas MOP 1967).

Esta alternativa elimina la interacción entre la estructura interior y el tubo perimetral, y la disposición de las columnas internas puede variar de acuerdo a los requisitos arquitectónicos, sin que necesariamente esa variación guarde relación con la disposición perimetral, propiedad que puede ser necesaria en muchos casos. Por otra parte, queda eliminado el problema del reparto de las cargas horizontales entre las diversas líneas de resistencia del edificio, pues sólo existe el perímetro resistente.

Análisis comparativos

A fin de valorar la importancia relativa de las deformaciones axiales de las columnas, y de comprobar la transmisión de corte vertical en las esquinas del edificio, los modelos matemáticos fueron analizados bajo las siguientes condiciones:

Con transmisión de corte en las esquinas (efecto tubular) y considerando, o no, las deformaciones axiales de las columnas.

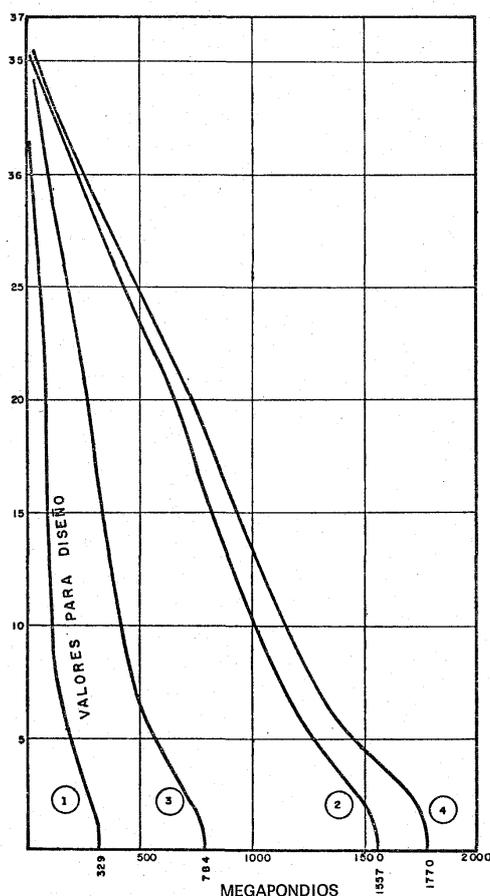
Sin transmisión de corte en las esquinas (pórtico plano), y considerando, o no, las deformaciones axiales de las columnas.

Todos los análisis fueron realizados con ayuda del computador electrónico. Dichos análisis permitieron comparar las deformaciones laterales totales, el efecto en las cargas axiales de las columnas y comprobar el efecto tubular.

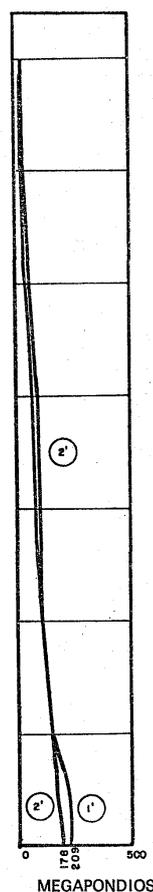
Estructura interior y reparto de cargas horizontales

La disposición de las columnas en el interior del edificio tiene modulación doble que en el perímetro, y están unidas entre sí por vigas en cada sentido. Se han dispuesto además vigas secundarias en correspondencia con las columnas del perímetro para disminuir la luz de las losas de los entrepisos.

La colaboración de la estructura interior en la resistencia de los efectos sísmicos es de menor importancia, por su rigidez inferior, en comparación con el tubo perimetral; de ahí que se ha preferido prescindir totalmente de esa pequeña resistencia llevando la totalidad de los efectos sísmicos al perímetro, solución que se logra articulando las conexiones de las vigas internas a todas las columnas. (Sólo se transmiten las fuerzas cortantes de las cargas verticales).



Reacciones en columnas 1 - G y 11 - G.



Efectos transmitidos a columnas 2 - H y 10 - H.

Fig. 8. Carga axial en columnas (sentido transversal).

- ① Pórtico con transmisión de corte y deformación axial de columnas.
- ② Pórtico con transmisión de corte y sin deformación axial de columnas.
- ③ Pórtico sin transmisión de corte y deformación axial de columnas.
- ④ Pórtico sin transmisión de corte y sin deformación axial de columnas.

pondientes a la acción de pórtico plano, es decir, que la eficiencia del modelo tubular, consecuencia de la interacción en las esquinas, se manifiesta al considerar las deformaciones axiales de los miembros, lo cual es el caso real cuando actúan fuerzas horizontales en un edificio.

Físicamente, esto significa que, a mayores acciones horizontales, mayor será la deformación axial de la columna extrema del pórtico que recibe acción, y mayor será la transmisión de corte vertical en la esquina, pues el anillo perimetral de cada piso tenderá, cada vez más, a contrarrestar la deformación axial de las columnas apoyándose en las columnas menos deformadas de la fachada perpendicular que recibe su acción.

Es interesante comparar el control de deformaciones laterales que ejerce el modelo tubular en relación a la acción de pórtico plano. En la misma figura 7, la curva 5 señala los valores permisibles para las deformaciones laterales indicadas en la Norma MOP-1967 (1) (2 ‰). La acción de pórtico plano, curva 4, no satisface la Norma por encima del piso 6, excediendo sus valores en los pisos superiores al 4 ‰, doble del permisible. En cambio, la acción tubular, sólo la excede ligeramente a partir del piso 20, y esto sin superar nunca el 2,4 ‰.

Efecto en las deformaciones laterales del edificio

En la figura 7 se representan las deformaciones laterales totales según las hipótesis siguientes: Las curvas 1 y 3 corresponden a las deformaciones del modelo tubular cuando se consideran, o no, las deformaciones axiales de los miembros. Las curvas 2 y 4 corresponden a las deformaciones laterales del pórtico plano cuando se consideran, o no, las deformaciones axiales de los miembros. Se observa que prácticamente no existe diferencia entre las curvas 1 y 2, lo que significa que no considera las deformaciones axiales al analizar cada modelo no ocasiona grandes diferencias en lo que a deformaciones laterales se refiere. Cuando se consideran las deformaciones axiales de los miembros, curvas 3 y 4, es evidente que las deformaciones laterales totales del edificio aumentan, pero los valores de la curva 3, correspondientes al modelo tubular, se mantienen aproximadamente en la mitad de los valores de la curva 4, corres-

Este control de deformaciones laterales constituye una de las notables economías de la acción tubular, ya que, con la misma cantidad de material que el pórtico plano, permite aproximadamente la mitad de las deformaciones que la solución convencional.

Efecto en la carga axial de columnas

La figura 8 muestra los gráficos de los valores de la carga axial en las columnas 1-G, 11-G, 1-B y 11-B cuando actúan las cargas horizontales en dirección transversal. Las curvas 1 y 2 corresponden al modelo tubular al considerar, o no, la deformación axial de los miembros, y las curvas 3 y 4 corresponden a esas mismas condiciones en el pórtico plano. Las curvas 1' y 2' son los valores de las cargas axiales transmitidas a las columnas 2-H, 10-H, 2-A, 10-A de la fachada perpendicular por la acción tubular. No considerar las deformaciones axiales, aumenta notablemente la fuerza axial en las columnas, tanto en el modelo tubular como en el pórtico plano. La relación de aumento se mantiene en el modelo tubular, curvas 1 y 2, en un valor cercano a 5; en el pórtico plano, curvas 3 y 4, resulta siempre superior a 2. Nuevamente es claro el beneficio del efecto tubular, puesto que los valores para el diseño (por efecto sísmico), dados en la curva 1, son inferiores en un 60 % a los correspondientes del pórtico plano. Por supuesto, parte de la carga se ha transmitido a la fachada, perpendicular, curvas 1' y 2'.

Se concluye que es absolutamente necesario la consideración de los acortamientos axiales en la determinación de las cargas axiales de las columnas. No considerarlo introduce errores de gran magnitud y trae problemas en las cimentaciones cuando las cargas axiales son de tracción.

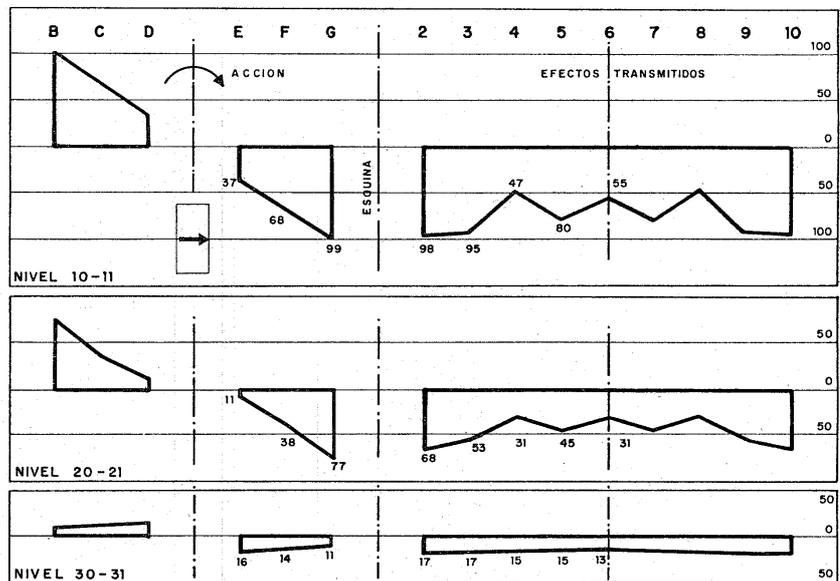


Fig. 9. Efecto tubular (acción en sentido transversal).

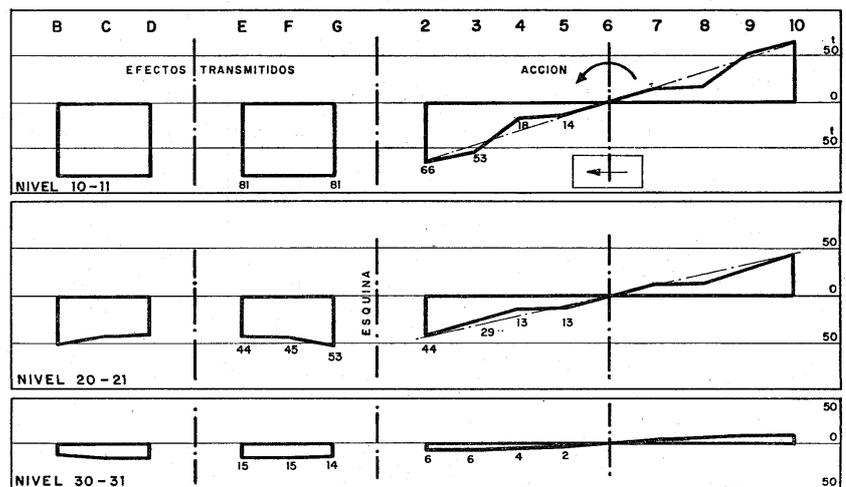


Fig. 10. Efecto tubular (acción en sentido longitudinal).

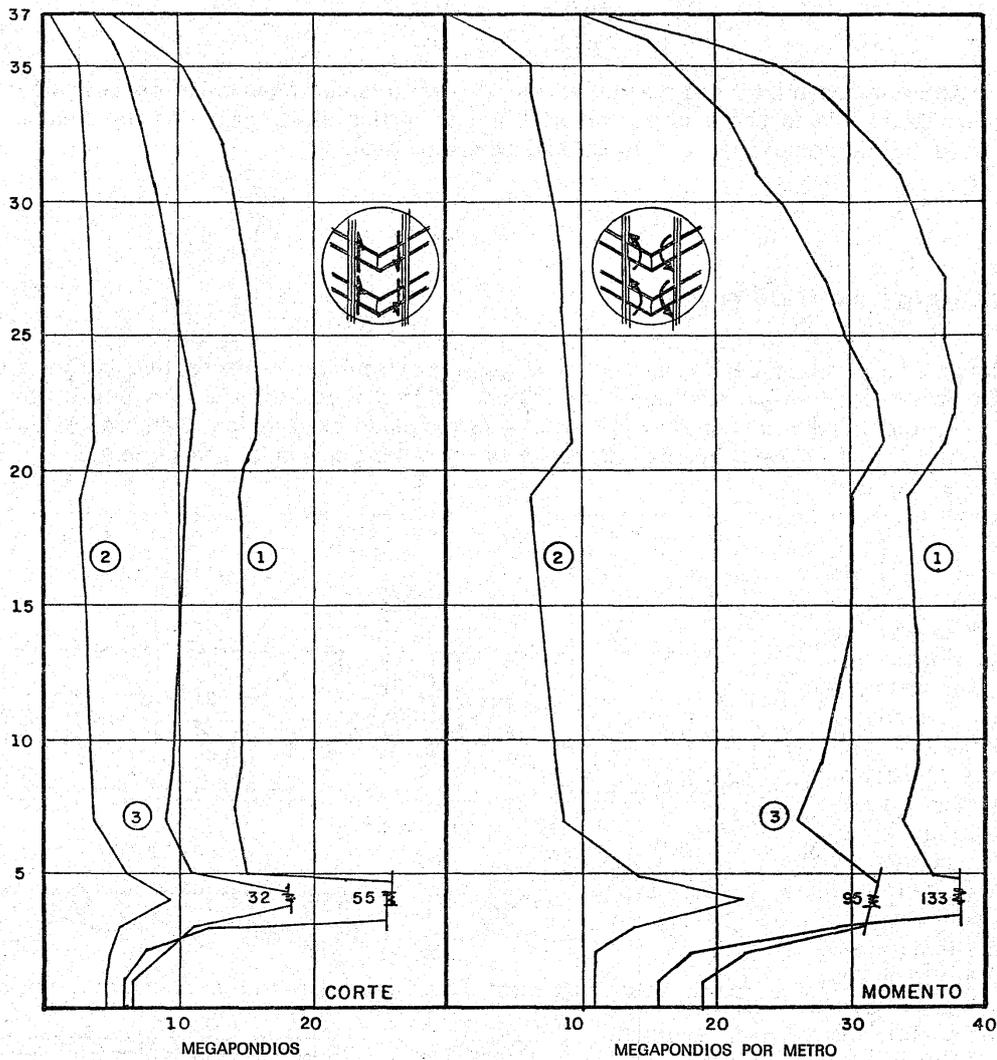


Fig. 11. Solicitaciones de interacción en la esquina.

Sentido transversal (modelo tubular)

① Pórtico con transmisión de corte y deformación axial.

② Pórtico con transmisión de corte y sin deformación axial.

Sentido longitudinal (modelo tubular)

③ Pórtico con transmisión de corte y deformación axial.

Comprobación de la acción tubular

Los valores de la interacción de las fachadas del edificio, resultado del análisis en cada sentido, del modelo tubular que considera deformaciones axiales, se muestran en las figuras 9 y 10.

Se han dibujado para tres niveles representativos las acciones y los correspondientes efectos transmitidos a la fachada perpendicular. La transmisión del corte vertical se mantiene en toda la altura del edificio, y en algunos niveles los valores transmitidos superan a la acción misma. Los puntos angulares de los gráficos de la fachada longitudinal, ejes 4 y 8, corresponden a las columnas interrumpidas en el nivel 4 de la estructura.

Los valores en cada piso del corte vertical y del momento en la viga que transmite efectos en la esquina, se muestran en la figura 11. Lógicamente, los gráficos corresponden al modelo tubular, ya que el pórtico plano no transmite acciones.

Para la acción en sentido transversal se indican los valores que consideran (curva 1), o no (curva 2), deformaciones axiales los miembros. La curva 3 corresponde a la acción en sentido longitudinal considerando deformaciones axiales.

Por encima del 5.º piso, donde la estructura se uniformiza, el valor de la fuerza cortante transmitida es casi constante, e igual a 15 Mp en sentido transversal (curva 1) y 10 Mp en sentido longitudinal (curva 3), comprobándose de esta manera la acción tubular de la estructuración. Los momentos son proporcionales al corte en el valor de la dimensión del volado en cada sentido. Se comprueba además, que no considerar las deformaciones axiales disminuye la eficiencia del efecto tubular.

La irregularidad de los gráficos en los niveles inferiores (3, 4 y 5) es un efecto localizado consecuencia de la viga perimetral de gran rigidez donde apoyan las columnas interrumpidas de los ejes 4 y 8.

Conclusiones

La solución tubular descrita puede ser usada para la estructuración antisísmica de edificios de acero de altura intermedia (40 a 60 pisos). En estructuras de mayor altura la separación de las columnas perimetrales debe ser disminuida. La esencia del modelo tubular radica en la ausencia de columnas en las esquinas del edificio, lo cual origina la interacción esquematizada en la figura 3. Para asegurar dicho funcionamiento es condición principal la transmisión de corte vertical de una fachada a la otra por medio de las vigas perimetrales.

Las dimensiones normalmente necesarias para lograr la inercia contra deformaciones laterales generalmente garantiza que, al superar la estructura el rango elástico, las vigas perimetrales responsables de la interacción tubular no fallarán por corte sino que el agotamiento de la sección por flexión será anterior, manteniéndose el efecto tubular aun cuando la estructura invada el rango plástico.

El modelo matemático mostrado en las figuras 4 y 5 ha permitido considerar la acción tubular tridimensional mediante el análisis de una imagen plana de la estructura. La consideración en el modelo de la verdadera longitud deformable de las piezas estructurales, mediante la definición de las cartelas de rigidez infinita usadas en los nodos (fig. 6), es necesaria para considerar las dimensiones de la viga perimetral.

La efectividad del tubo perimetral elimina la necesidad de contar con la resistencia de la estructuración interior del edificio para resistir los efectos horizontales. La modulación interna podrá por lo tanto variar en relación a la disposición perimetral, ajustándose al mejor aprovechamiento de la planta del edificio.

Para que las ventajas de la acción tubular se manifiesten en el análisis de los efectos horizontales, es necesario considerar la influencia de las deformaciones axiales de los miembros al operar con el modelo matemático de la estructura. Como se ve en la figura 11, la solución tubular que considera deformaciones axiales, curva 1, transfiere, a la fachada perpendicular en cada nivel, cinco veces más corte vertical que la solución tubular que no considera deformaciones axiales, curva 2.

résumé

Modèle mathématique pour structure tubulaire d'un édifice antisismique - Caracas (Venezuela)

Agustín Mazzeo et Arnim De Fries, ingénieurs civils

Le modèle mathématique, objet de cet article, a été développé en étudiant la solution structurale d'un édifice à structure principale d'acier, adapté aux conditions sismiques de la capitale vénézuélienne.

Parmi les diverses alternatives analysées, les auteurs ont choisi celle qui permettait le mieux de satisfaire aux exigences du projet. Elle consistait à utiliser, comme solution pour résister aux effets horizontaux, le système structural connu sous le nom de tube extérieur souple.

L'analyse des caractéristiques spatiales du tube périmétral par l'usage d'une image plane de la structure, constitue le modèle mathématique qui est décrit ici.

summary

Mathematical model for a tubular structure of an antisismic building Caracas (Venezuela)

Agustín Mazzeo and Arnim De Fries, civil engineers

This mathematical model was worked out when seeking a structural pattern for a building with a main steel structure, apt for the seismic circumstances of the city of Caracas.

Of the various possibilities that were considered, it was decided the one which best met the conditions of the project involved the use of the so called external flexible tube, to withstand horizontal thrusts.

The analysis of the space properties of the perimetral tube, through the use of a plane image of the structure, constitutes the mathematical model described in this article.

zusammenfassung

Mathematisches Modell für die Röhrenstruktur eines Erdbebensicheres Gebäudes Caracas - Venezuela

Agustín Mazzeo und Arnim De Fries, Bauingenieure

Das mathematische Modell, auf das sich dieser Artikel bezieht, wurde entwickelt, als man nach einer Lösung für ein hauptsächlich aus Stahlstruktur bestehendes Gebäude suchte, das den seismischen Bedingungen der Stadt Caracas Rechnung tragen sollte.

Hierzu wurden verschiedene Alternativmöglichkeiten untersucht, und man kam zu dem Schluss, dass die Erfordernisse des Bauvorhabens im Hinblick auf einen Ausgleich der horizontalen Belastungen am besten erfüllt werden durch ein Struktursystem mit biegsamem Aussenrohr.

Die Analyse der räumlichen Eigenschaften des Aussenrohrs mit Hilfe eines ebenen Strukturbilds stellt das mathematische Modell dar, das in diesem Artikel beschrieben wird.