

LA OPTIMIZACIÓN EN EL PROYECTO ESTRUCTURAL DE EDIFICIOS DE GRAN ALTURA COMO HERRAMIENTA PARA LA SOSTENIBILIDAD

Alfonso Ávila

Carlos R. Sánchez-Carratalá

*Departamento de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras
E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Valencia*

Abstract

The preliminary design stage in the project of a tall building is essential to achieve an optimal and sustainable design of it. Practical tools to facilitate the designer task are required for the integration of the objectives of functionality, aesthetics, economy and sustainability in this type of structures. In tall buildings, the relevance of horizontal actions implies that design is governed by stiffness rather than by strength. In this paper a stiffness-based design methodology, focused on the minimum consumption of structural resources, is proposed as a strategy for optimal and sustainable design. In particular, a parametric study on the main variables affecting the structural performance of braced tube structures against wind loads is carried out. Based on a simplified formulation, an expression for the minimum total weight of structural material to meet the stiffness requirements is obtained. The methodology is applied to buildings of 45 and 65 stories high, including the influence of the slenderness in material usage. Furthermore, design strategies are provided and optimum geometries of the structural system are assessed, which allows a comprehensive approach to its design process.

Keywords: *tall buildings; braced tube; stiffness-based design; structural optimization; sustainability*

Resumen

La etapa de prediseño en el proyecto de un edificio alto es fundamental para conseguir un diseño óptimo y sostenible del mismo. La integración de los objetivos de funcionalidad, estética, economía y sostenibilidad, requiere, para esta tipología de estructuras, herramientas prácticas que faciliten la tarea del proyectista. En los edificios altos, la relevancia de las acciones horizontales implica que la rigidez gobierna el diseño frente a la resistencia. En esta ponencia se propone una metodología de diseño basado en rigidez, orientada al mínimo consumo de recursos estructurales, como estrategia para un diseño óptimo y sostenible. En particular, se realiza un estudio paramétrico de las principales variables que condicionan el comportamiento estructural del sistema de tubo arriostrado frente a las cargas de viento. A partir de una formulación simplificada, se obtiene una expresión del peso total mínimo de material estructural que garantiza los requisitos de rigidez. La metodología se aplica a edificios de 45 y 65 pisos de altura, incluyendo la influencia de la esbeltez en el gasto de material. Asimismo, se proporcionan estrategias de diseño y se evalúan las geometrías más óptimas para el sistema estructural, lo que permite un enfoque integral de su proceso de diseño.

Palabras clave: edificios altos; tubo arriostrado; diseño basado en rigidez; optimización estructural; sostenibilidad

1. Introducción

En la actualidad, las cuestiones sociales y medioambientales forman parte de las preocupaciones fundamentales de las sociedades modernas. Por ello, el objetivo del desarrollo sostenible, entendido como la capacidad de satisfacer las necesidades de las generaciones presentes sin comprometer las posibilidades de las generaciones futuras para atender sus propias necesidades, ha pasado a formar parte de las estrategias políticas en todos los niveles y, por ende, de las decisiones técnicas en el ámbito de la ingeniería de proyectos.

En particular, el proyecto de un edificio alto, caracterizado por una elevada demanda de recursos materiales y energéticos durante su construcción y explotación, no puede obviar el objetivo de sostenibilidad. La búsqueda de la mejor estructura en términos de uso óptimo de los recursos ya no es sólo una cuestión económica, sino también de compromiso social y medioambiental. Este compromiso se convierte, para el proyectista de un edificio alto, en un reto que le obliga a un conocimiento profundo de la respuesta estructural y de los mecanismos resistentes básicos. Tal y como afirmaba el ingeniero estructural e inventor estadounidense Richard B. Fuller (1895-1983), "...sólo hay que pesar un edificio para conocer su sofisticación".

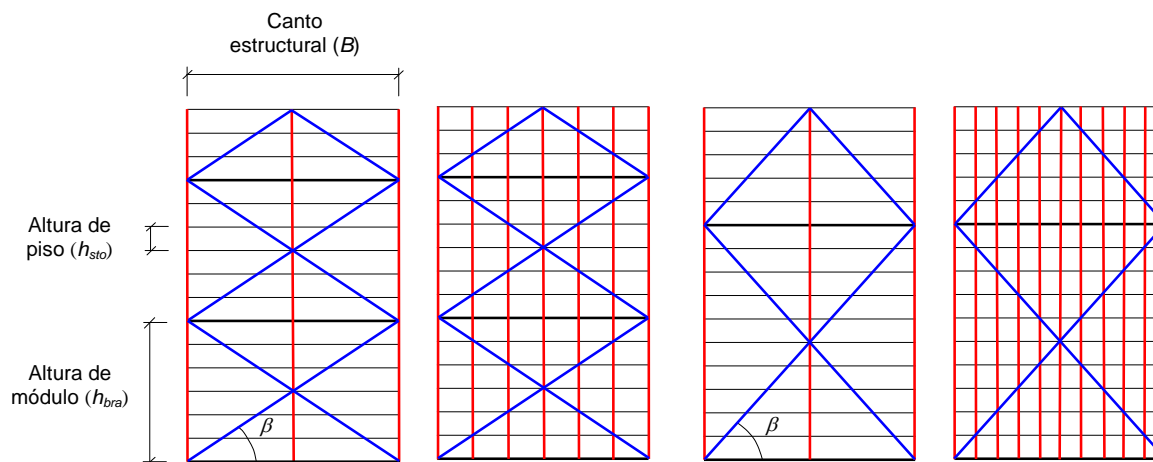
A medida que un edificio gana altura, las acciones horizontales se convierten en la solicitud dominante del diseño. Es entonces cuando el modelo de sólido en compresión, que representa adecuadamente al edificio convencional, se vuelve insuficiente para abordar el comportamiento de un edificio alto, mucho más próximo al de una viga en voladizo.

El control del movimiento de un edificio alto, al estar gobernado por las acciones horizontales, conlleva la consideración de diversos problemas relacionados con la rigidez y las vibraciones del edificio, como son los efectos de segundo orden, la seguridad y funcionalidad de las instalaciones y cerramientos, el confort de los ocupantes, etc. En este contexto, se ha desarrollado en las últimas décadas el denominado *diseño basado en desempeño* (PBD, del inglés *performance-based design*), que incluye entre sus distintas variantes el *diseño basado en rigidez*. En el PBD, el proyecto clásico de estructuras, basado fundamentalmente en la resistencia, se torna insuficiente para abordar un conjunto de restricciones más amplias que tienen que ver con la funcionalidad y durabilidad de las construcciones. Tal y como señala Moon (2010), el diseño basado en rigidez es más eficiente que el diseño basado en resistencia para estructuras relativamente ligeras y flexibles como son los edificios altos.

El sistema estructural de tubo arriostrado fue introducido en la década de 1960 por el ingeniero estructural estadounidense de origen bangladesí Fazlur R. Khan (1929-1982), con el diseño del sistema estructural del *John Hancock Center* (construcción 1965-1969) en Chicago (IL, EUA)—de 344 m de altura en azotea y 100 pisos—. Desde entonces, se ha convertido en una de las tipologías estructurales más extendidas en la construcción de rascacielos. Actualmente, edificios como la *Bank of China Tower* (construcción 1985-1990) en Hong Kong (Hong Kong, R.P. China)—de 305 m de altura en azotea y 72 pisos—o el *Shanghai World Financial Center* (construcción 1997-2008) en Shanghái (Shanghái, R.P. China)—de 492 m de altura en azotea y 101 pisos—constituyen rotundos y espectaculares testimonios de este sistema estructural.

La tipología de tubo arriostrado posee un comportamiento estructural tridimensional, en el cual pueden distinguirse dos tipos de pórticos en función de su posición en relación a la

Figura 1: Distintas Configuraciones Tipo de los Pórticos que Constituyen las Paredes del Tubo Arriostrado



dirección de la acción del viento. Así, los pórticos paralelos a la dirección del viento ejercen la función de pórticos alma—absorbiendo la práctica totalidad del cortante—, mientras que los pórticos perpendiculares a la dirección del viento actúan a modo de pórticos ala—absorbiendo gran parte del flector—. Para esta tipología estructural, el efecto del retraso de cortante entre pórticos perpendiculares es escaso, pudiendo llegar a desprejarse, en primera aproximación (Smith & Coull, 1991).

En esta ponencia se propone una metodología de diseño basado en rigidez, orientada al mínimo consumo de recursos estructurales, como estrategia para un diseño óptimo y sostenible. En particular, se realiza un estudio paramétrico de las principales variables que condicionan el comportamiento estructural del sistema de tubo arriostrado frente a las cargas de viento. A partir de una formulación simplificada, se obtiene una expresión del peso total mínimo de material estructural que garantiza los requisitos de rigidez. La metodología se aplica a edificios de 45 y 65 pisos de altura, incluyendo la influencia de la esbeltez en el gasto de material. Asimismo, se proporcionan estrategias de diseño y se evalúan las geometrías más óptimas para el sistema estructural, lo que permite un enfoque integral de su proceso de diseño.

2. Metodología de Diseño

En el desarrollo de la metodología de diseño basado en rigidez que se presenta en esta ponencia, únicamente se considerará el peso de los elementos principales del sistema resistente primario frente a acciones horizontales, es decir, de las columnas y las diagonales del tubo arriostrado. El peso de los montantes horizontales no se incluye, debido a que asumen una función estructural secundaria frente a las acciones horizontales y su diseño viene condicionado fundamentalmente por las acciones verticales.

En el presente documento se asume que la estructura presenta doble simetría en planta y en alzado, de modo que los cuatro pórticos de fachada son idénticos. Únicamente se estudian arriostramientos sencillos formados por doble diagonal (cruz de San Andrés) que abarcan todo el lado del tubo, pudiendo variar el número de columnas de fachada. En la Figura 1 se recogen distintas configuraciones tipo de los pórticos que constituyen las paredes del tubo arriostrado, a base de variar la inclinación de las diagonales o el número de columnas.

2.1 Analogía con la Viga de Timoshenko. Rigideces Equivalentes

El desarrollo de la formulación simplificada para describir el perfil óptimo de desplazamientos laterales, está basado en la modelización del edificio como una viga en voladizo empotrada en el terreno. Muchos edificios altos suelen tener una esbeltez mayor o igual que 5 (e.g., Connor, 2003), por lo que podría pensarse que la distancia resultante entre puntos de inflexión de la deformada permitiría la utilización de la teoría de vigas de Navier-Bernoulli, que no considera la deformación por cortante. No obstante, debe tenerse en cuenta que la estructura de un edificio suele presentar una relación entre rigideces a flector y a cortante (factor de cortante equivalente) bastante mayor que en una viga de alma llena convencional, por lo que la influencia del cortante sobre el desplazamiento lateral puede llegar a ser bastante significativa, particularmente en la parte superior del edificio (Smith & Coull, 1991). De ahí que, en general, resulte aconsejable la aplicación de la teoría de vigas de Timoshenko, que sí considera la deformación por cortante. La hipótesis cinemática de Timoshenko, que da nombre a esa teoría de vigas, implica que la sección transversal de una viga se mantiene plana e indeformada durante la deformación, aunque su giro no tiene porqué coincidir con el de la tangente a la directriz, al verse afectado por la deformación tangencial debida al cortante.

Deformaciones equivalentes

La clave para establecer la analogía entre la trama tridimensional de barras que constituye el sistema resistente del edificio alto y el modelo unidimensional que plantea la teoría de vigas de Timoshenko, consiste en determinar las rigideces equivalentes a cortante, $(GA_V)_{eq}$, y a flector, $(EI)_{eq}$, de la estructura de dicho edificio. Para ello, se proponen las siguientes definiciones de la deformación transversal relativa unitaria equivalente debida al cortante (γ_{eq})—referida a un módulo para cortante, de altura h_{mod-V} —, y del giro relativo unitario equivalente de la sección transversal debido al flector (χ_{eq})—referido a un módulo para flector, de altura h_{mod-M} —:

$$\gamma_{eq} = \frac{\Delta V_{V,mod-V}}{h_{mod-V}} = \frac{V_{eff}}{(GA_V)_{eq}} \quad (1)$$

$$\chi_{eq} = \frac{\Delta \theta_{mod-M}}{h_{mod-M}} = \frac{M_{eff}}{(EI)_{eq}} \quad (2)$$

donde $\Delta V_{V,mod-V}$ es el desplazamiento lateral relativo debido al cortante en el módulo para cortante considerado; $\Delta \theta_{mod-M}$ es el giro relativo de la sección transversal debido al flector en el módulo para flector considerado; V_{eff} es el cortante efectivo en el módulo para cortante considerado; y M_{eff} es el flector efectivo en el módulo para flector considerado.

En general, el módulo considerado para el estudio de un esfuerzo determinado, viene caracterizado porque las barras del sistema estructural principal que resisten de forma efectiva dicho esfuerzo, tienen la misma sección en todo el módulo. El módulo más conveniente para la definición de γ_{eq} en un tubo arriostrado con doble diagonal es el correspondiente a un recuadro de arriostramiento, es decir, $h_{mod-V}=h_{bra}$. Para la definición de χ_{eq} puede adoptarse un módulo de uno o varios pisos; en la aplicación numérica, se tomará un módulo de un solo piso, es decir, $h_{mod-M}=h_{sto}$, para poder estudiar de forma detallada la variación del área de las columnas en altura.

Rigidez a cortante equivalente

En la tipología de tubo arriostrado con doble diagonal, el cortante actuante en el piso k -ésimo del módulo para cortante considerado, $V_{d,k}$, es absorbido fundamentalmente por el axil de las diagonales de los pórticos alma, es decir:

$$V_{d,k} \approx V_{dia,w,k} \quad (3)$$

donde $V_{dia,w,k}$ es el cortante absorbido por las diagonales de los pórticos alma en el piso k -ésimo del módulo para cortante considerado.

Teniendo en cuenta la deformación de las diagonales originada por el cortante en un pórtico alma, se deduce la siguiente expresión para la deformación transversal relativa unitaria equivalente:

$$\gamma_{eq} = \frac{\varepsilon_{dia,w}}{\sin \beta \cos \beta} \quad (4)$$

donde $\varepsilon_{dia,w}$ es la deformación longitudinal relativa unitaria de una diagonal de pórtico alma; y β es el ángulo que forman las diagonales del módulo con la horizontal.

Sustituyendo en la Ec. (4) la expresión de $\varepsilon_{dia,w}$ en función del valor medio del axil que solicita una diagonal de pórtico alma en el módulo para cortante considerado, $\bar{N}_{dia,w}$, y a continuación la de $\bar{N}_{dia,w}$ en función del cortante actuante medio en el módulo para cortante considerado, \bar{V}_d , se obtiene:

$$\gamma_{eq} = \frac{\bar{V}_d}{4EA_{dia,w} \sin \beta \cos^2 \beta} \quad (5)$$

donde E es el módulo de deformación longitudinal del material; y $A_{dia,w}$ es el área de una diagonal de pórtico alma.

De la comparación de la Ec. (5) con la relación constitutiva de la Ec. (1), se deduce que la rigidez a cortante equivalente de un módulo para cortante viene dada por:

$$(GA_V)_{eq} = 4EA_{dia,w} \sin \beta \cos^2 \beta \quad (6)$$

y que el cortante efectivo en un módulo para cortante debe calcularse a partir del cortante actuante medio en el módulo como sigue:

$$V_{eff} = \bar{V}_d \quad (7)$$

Rigidez a flector equivalente

En la tipología de tubo arriostrado con doble diagonal, el flector actuante en el piso k -ésimo del módulo para flector considerado, $M_{d,k}$, es absorbido fundamentalmente por el axil de las columnas y diagonales de los pórticos ala, y por el axil de las columnas y diagonales de los pórticos alma, es decir:

$$M_{d,k} \approx M_{col,f,k} + M_{col,w,k} + M_{dia,f,k} + M_{dia,w,k} \quad (8)$$

donde $M_{col,f,k}$ es el flector absorbido por las columnas de los pórticos ala en el piso k -ésimo del módulo para flector considerado; $M_{col,w,k}$ es el flector absorbido por las columnas de los pórticos alma en el piso k -ésimo del módulo para flector considerado; $M_{dia,f,k}$ es el flector

absorbido por las diagonales de los pórticos ala en el piso k -ésimo del módulo para flector considerado; y $M_{dia,w,k}$ es el flector absorbido por las diagonales de los pórticos alma en el piso k -ésimo del módulo para flector considerado.

Teniendo en cuenta la relación existente en una viga entre la deformación longitudinal relativa unitaria de una fibra cualquiera y el giro relativo unitario de la sección transversal, así como la simetría de los edificios prototipo en estudio, se deduce la siguiente expresión para la deformación transversal relativa unitaria equivalente:

$$\chi_{eq} = \frac{\varepsilon_{col,f}}{B/2} \quad (9)$$

donde $\varepsilon_{col,f}$ es la deformación longitudinal relativa unitaria de una columna de un pórtico ala; y B es el ancho del edificio en la dirección considerada, que hace el papel de canto estructural para la flexión.

Sustituyendo en la Ec. (9) la expresión de $\varepsilon_{col,f}$ en función del valor medio del axil que solicita una columna de pórtico ala en el módulo para flector considerado, $\bar{N}_{col,f}$, y a continuación la de $\bar{N}_{col,f}$ en función del flector actuante medio en el módulo para flector considerado, \bar{M}_d , se obtiene:

$$\chi_{eq} = \frac{\bar{M}_d - 4 \bar{N}_{dia,w} \cos \beta \left(\frac{h_{mod-V}}{2} - x'_G \right)}{EA_{col,f} n_{col,f,eq} \frac{B^2}{2}} \quad (10)$$

donde $A_{col,f}$ es el área de una columna de pórtico ala; $n_{col,f,eq}$ es el número total equivalente de columnas de un pórtico ala, obtenido a partir del número de columnas de un pórtico ala $n_{col,f}$; y x'_G es la distancia a la que se encuentra el centro de gravedad de la ley de cortantes del módulo para flector considerado respecto a la parte inferior del módulo para cortante correspondiente.

De la comparación de la Ec. (10) con la relación constitutiva de la Ec. (2), se deduce que la rigidez a flector equivalente de un módulo para flector viene dada por:

$$(EI)_{eq} = EA_{col,f} n_{col,f,eq} \frac{B^2}{2} \quad (11)$$

y que el flector efectivo en un módulo para flector debe calcularse a partir del flector actuante medio en el módulo como sigue:

$$M_{eff} = \bar{M}_d - 4 \bar{N}_{dia,w} \cos \beta \left(\frac{h_{mod-V}}{2} - x'_G \right) \quad (12)$$

2.2 Criterio de Rigidez Global y Parámetro de Ponderación de Modos

Todo proceso de optimización de un edificio alto basado en rigidez, debe incorporar las restricciones relacionadas con el desplazamiento lateral del sistema resistente primario frente a acciones horizontales. Según Connor (2003), el perfil óptimo de desplazamientos es el correspondiente a un estado de deformación uniforme de cortante y de flector, es decir:

$$\gamma_{eq} = \gamma_{eq}^* \quad (13)$$

$$\chi_{eq} = \chi_{eq}^* \quad (14)$$

donde γ_{eq}^* es el valor constante en toda la altura del edificio de la deformación transversal relativa unitaria equivalente; y χ_{eq}^* es el valor constante en toda la altura del edificio del giro relativo unitario equivalente de la sección transversal. La propuesta de deformada basada en los parámetros de deformación uniforme, implica que no se produce ninguna concentración de deformación (ni, por lo tanto, de sus correspondientes esfuerzos) en ningún módulo del edificio.

Para la determinación del perfil de desplazamientos, se aplicará un criterio de rigidez global habitual en la práctica, basado en limitar el desplome total unitario, δ_{tot} , definido como el cociente entre el desplazamiento lateral máximo del edificio, $v(H)$, y la altura del mismo, H :

$$\delta_{tot} = \frac{v(H)}{H} \leq \delta_{tot,adm} \quad (15)$$

donde $\delta_{tot,adm}$ es el desplome total unitario admisible; un rango habitual de valores para este parámetro es 1/400~1/800.

A partir de la expresión para el desplazamiento lateral máximo del edificio, puede definirse el parámetro de ponderación de modos s_{M1} , como la relación entre la componente del desplazamiento lateral máximo debida al modo de flexor y la debida al modo de cortante (Connor, 2003):

$$s_{M1} = \frac{\chi_{eq}^* H}{\gamma_{eq}^* 2} \quad (16)$$

2.3 Ecuaciones de Predimensionamiento. Función de Peso Total

A partir de las rigideces equivalentes de las Ecs. (6) y (11), de los límites de deformación uniforme dados en las Ecs. (13) y (14), y de las relaciones constitutivas de las Ecs. (1) y (2), se deducen las expresiones para el predimensionamiento de las áreas de las diagonales de un módulo para cortante y de las áreas de las columnas de un módulo para flexor. Sumando el peso de todos los módulos en que se ha dividido el edificio, y suponiendo que la inclinación de las diagonales es la misma en todos los módulos, se obtiene la función de peso total necesario por rigidez frente a acciones horizontales del sistema de tubo arriostrado:

$$W_{tot} = \frac{2\gamma}{E\delta_{tot,adm}} \left[(1 + s_{M1}) \Phi_{\beta} \Phi_V + \frac{1 + s_{M1}}{s_{M1}} \left(\frac{H}{B} \right)^2 \Phi_c \Phi_M \right] \quad (17)$$

donde γ es el peso específico del material utilizado; Φ_{β} es el factor de inclinación de las diagonales, dado por:

$$\Phi_{\beta} = \frac{1}{\sin^2 \beta \cos^2 \beta}; \quad (18)$$

Φ_c es el factor de número de columnas, dado por:

$$\Phi_c = \frac{2(n_{col,f} - 1)}{n_{col,f,eq}}; \quad (19)$$

y Φ_V y Φ_M son, respectivamente, el factor de cortantes efectivos y el factor de flectores efectivos, que se obtienen como sigue, a partir de los esfuerzos efectivos en cada módulo:

$$\Phi_V = \sum_{j=1}^{n_{mod-V}} V_{eff,j} h_{mod-V,j} \quad (20)$$

$$\Phi_M = \frac{\sum_{j=1}^{n_{mod-M}} M_{eff,j} h_{mod-M,j}}{H} \quad (21)$$

donde el subíndice j indica la pertenencia al módulo j -ésimo; n_{mod-V} es el número de módulos para cortante del edificio; y n_{mod-M} es el número de módulos para flector del edificio.

En la función de peso total dada en la Ec. (17), se identifican como principales variables de diseño las siguientes: el módulo de deformación longitudinal específico del material (E/γ); el criterio de rigidez global utilizado (a través de $\delta_{tot,adm}$); el parámetro de ponderación de modos (s_M); la inclinación de las diagonales (a través de Φ_β); el número de columnas de cada pórtico (a través de Φ_c); la esbeltez (H/B); y la forma de las leyes de esfuerzos (a través de Φ_V y Φ_M).

3. Estudio de Caso

La metodología desarrollada en este documento se aplica a dos edificios prototipo de 45 y 65 pisos, cuyo sistema resistente primario frente a acciones horizontales pertenece a la tipología de tubo arriostrado con dobles diagonales. La planta de los edificios considerados es cuadrada de 36 m de lado en toda la altura, y la altura entre forjados es de 4 m, por lo que las esbelteces de los edificios son de $180/36=5,00$ y de $260/36=7,22$, respectivamente.

El cálculo de las cargas de viento se realiza aplicando el Eurocódigo 1, Parte 1-4, sobre acciones de viento (Comité Técnico AEN/CTN-140, 2005), al que nos referiremos como EC1-1-4. Los edificios prototipo se supone que se ubican en la ciudad de Valencia (Valencia, España), por lo que se toma un valor fundamental de la velocidad básica del viento de $v_{b,0}=26$ m/s y una categoría del terreno IV. Se considera el efecto de la turbulencia, extrapolando la formulación del EC1-1-4 para el edificio de más de 200 m de altura. La sollicitación del viento se trata de la forma habitual, como un sistema de fuerzas estáticas equivalentes aplicadas a la altura de los forjados.

En la aplicación numérica, se considera que el material utilizado es acero estructural de tipo S-355, con módulo de deformación longitudinal $E=210.000$ MPa, módulo de deformación transversal $G=81.000$ MPa, y peso específico $\gamma=77$ kN/m³. Las columnas y diagonales se diseñan, en general, con perfiles laminados con sección transversal en I o en H. Los elementos más sollicitados que exceden de dichas series se diseñan con perfiles de sección hueca cuadrada, de lado y espesor dimensionados al efecto a partir de los esfuerzos y la rigidez requerida.

Para el desplome total unitario del edificio se especifica un máximo $\delta_{tot,adm} = 1/500$, que es un valor habitual recogido en muchas normas.

3.1 Estudio Paramétrico

En lo referente a la variable de diseño relacionada con la eficacia estructural del material (E/γ), la Ec. (17) muestra que la elección del acero estructural implica un peso necesario por rigidez del orden de 2~3 veces menor que si el tubo arriostrado fuese diseñado con hormigón armado o pretensado.

Asimismo, puede observarse que el criterio de rigidez global afecta proporcionalmente a la función de peso total, de forma que a menor desplome total unitario admisible corresponde mayor peso necesario por rigidez.

Por otra parte, se comprueba que el peso necesario para absorber el cortante actuante (diagonales) depende del término $(1+s_{M1})$, el cual crece linealmente al aumentar s_{M1} . Por el contrario, el peso necesario para absorber el flector actuante (columnas) depende del término $(1+s_{M1})/s_{M1}$, que decrece asintóticamente al aumentar s_{M1} . Las tendencias opuestas en cuanto al peso necesario para columnas y diagonales en función de s_{M1} , da lugar a que exista un valor óptimo del parámetro de ponderación de modos que permite conseguir un mínimo en la función de peso total. Derivando en la Ec. (17) se obtiene dicho valor, que denominaremos $s_{M1,opt}$:

$$s_{M1,opt} = \sqrt{\frac{\Phi_c}{\Phi_\beta}} \sqrt{\frac{\Phi_M}{\Phi_V}} \frac{H}{B} \quad (22)$$

Así pues, haciendo $s_{M1}=s_{M1,opt}$ se obtiene el peso total mínimo necesario por rigidez, que puede escribirse como sigue:

$$W_{tot,min} = \frac{2\gamma}{E\delta_{tot,adm}} (1 + s_{M1,opt})^2 \Phi_\beta \Phi_V \quad (23)$$

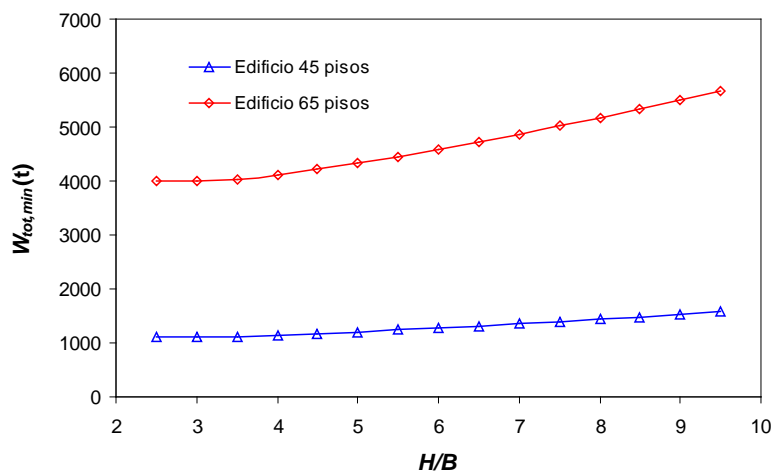
De la Ec. (18) puede comprobarse que el ángulo que minimiza el área de las diagonales ($\beta=35,3^\circ$) no coincide con el que minimiza la función de peso ($\beta=45^\circ$). Esta diferencia pone de manifiesto que el ángulo que supone la mínima área de las diagonales para resistir el cortante, no implica el mínimo peso de las mismas, debido a que la longitud de diagonales se incrementa cuanto menor es el ángulo β .

De la Ec. (19) se comprueba que, desde el punto de vista del peso necesario por rigidez, el valor óptimo del número de columnas es 2. Este resultado coincide con la configuración en planta que, según Taranath (2010), maximiza el denominado índice de rigidez a flexión, correspondiente a colocar toda el área de columnas en las esquinas del edificio. A partir de 5 columnas por pódico, el factor Φ_c apenas varía. Este hecho implica que la elección del número de columnas en un tubo arriostrado, normalmente estará gobernada por la resistencia de las cargas gravitatorias más que por la rigidez frente a las cargas laterales.

También de la Ec. (17), puede concluirse que la esbeltez influye de forma cuadrática en el peso de las columnas, mientras que la altura del edificio afecta tanto al peso de las columnas como de las diagonales, a través del incremento de los factores de esfuerzos (Φ_V y Φ_M).

En la Figura 2 se representa el peso total mínimo de varios edificios de 45 y de 65 pisos, con diferentes esbelteces en cada caso, obtenidas a base de variar el lado de la planta respecto a los 36 m de los edificios prototipo. Se comprueba que para una altura determinada, el incremento de esbeltez del edificio implica un incremento cuadrático del peso total, aunque la variación es bastante suave y podría aproximarse de forma simplificada con una recta. Asimismo, se comprueba que para una esbeltez determinada, el incremento de altura

Figura 2: Influencia de la Esbeltez y de la Altura en el Peso Total Mínimo (para $n_{col,f}=5$, $\beta=45^\circ$)



implica un incremento no lineal del peso total del edificio, debido al incremento no lineal de Φ_V .

3.2 Aplicación Numérica

En la Tabla 1, se adjuntan los resultados de los cálculos previos realizados para la elección de las variables de diseño a partir de la formulación propuesta. Se ha optado por disponer $n_{col,f}=5$ columnas en cada pórtico para obtener entre ellas una luz de $36/(5-1)=9$ m en las fachadas, que resulta aceptable para la resistencia de las cargas gravitatorias. Se estima que el número total equivalente de columnas de un pórtico ala es $n_{col,f,eq} \approx 5,5$.

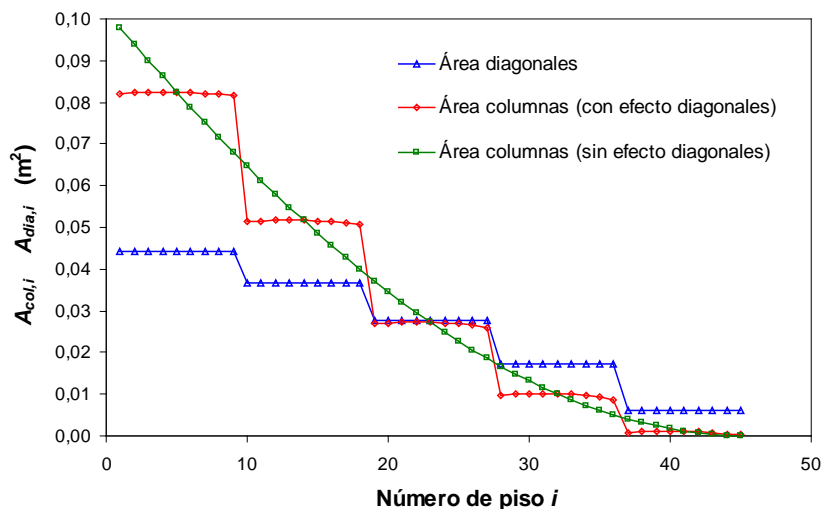
Si se comparan los valores del parámetro de ponderación de modos óptimo para los edificios prototipo de 45 y 65 pisos, se observa un incremento de 1,78 a 2,55, respectivamente, lo cual pone de manifiesto que, a medida que aumenta la esbeltez del edificio, el modo de flector se vuelve más importante.

En las Figuras 3 y 4 se representa el predimensionamiento de las columnas y las diagonales para cada edificio prototipo. En el caso de las columnas, el cálculo se realiza teniendo en cuenta el efecto de las diagonales en los pórticos alma (según la formulación desarrollada en esta ponencia), y sin tenerlo en cuenta. Se comprueba que el efecto de las diagonales en los módulos genera que las columnas puedan dimensionarse con sección prácticamente constante a lo largo de cada módulo definido por las diagonales, lo cual implica importantes ventajas constructivas. Por ello, en la tipología estructural estudiada resulta apropiado tomar para el flector la misma modulación que para el cortante ($h_{mod-v}=h_{mod-M}$). Además, se concluye que, para el predimensionamiento de las columnas a lo largo del módulo, resulta suficientemente aproximado utilizar como flector eficaz el flector actuante medio en el

Tabla 1: Modulación y Diseño Óptimo de los Edificios Prototipo (para $n_{col,f}=5$)

Edificio	Modulación	β (°)	$s_{M1,opt}$	Φ_V (MN·m)	$W_{tot,min}$ (t)
45 pisos	5 módulos de 9 pisos	45	1,78	1.046	1.205
65 pisos	6 módulos de 10 pisos + 1 módulo de 5 pisos	48,0	2,55	2.599	4.955

Figura 3: Áreas de las Columnas y las Diagonales del Edificio Prototipo de 45 Pisos



módulo ($M_{eff,j} = \overline{M}_{d,j}$). A su vez, una aproximación razonable del flector actuante medio en el módulo consiste en tomar el flector existente en el punto medio de la altura del módulo. No se comprueba la capacidad resistente del predimensionamiento obtenido por criterios de rigidez.

En la Tabla 2 se compara el desplazamiento lateral máximo impuesto en el diseño de los dos edificios estudiados ($H/500$), con el obtenido mediante el programa de elementos finitos SAP2000, a partir de un modelo de la estructura basado en el predimensionamiento efectuado de columnas y diagonales. Se comprueba que la formulación simplificada desarrollada en este documento presenta un elevado grado de precisión, pues las diferencias con un cálculo más preciso son escasas.

4. Conclusiones

La metodología propuesta de diseño basado en rigidez, constituye una herramienta práctica

Figura 4: Áreas de las Columnas y las Diagonales del Edificio Prototipo de 65 Pisos

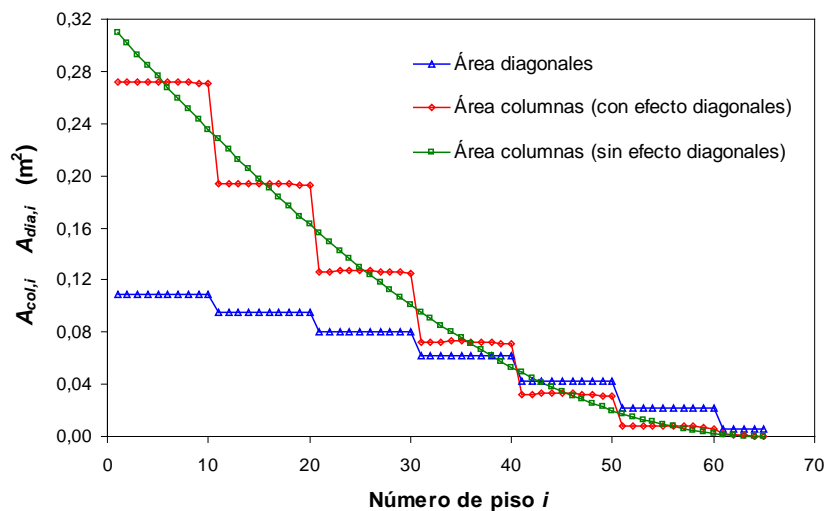


Tabla 2: Comparación del Desplazamiento Lateral Máximo de Diseño con el Obtenido mediante el Programa SAP2000

Edificio	$v(H)$ diseño (m)	$v(H)$ SAP2000 (m)	Diferencia
45 pisos	0,36	0,347	-3,6%
65 pisos	0,52	0,521	+0,2%

para realizar un predimensionamiento óptimo y sostenible frente a acciones horizontales de edificios altos con la tipología estructural de tubo arriostrado. Se proporcionan fórmulas suficientemente precisas, de sencillo manejo y aplicación, que permiten al proyectista plantear diseños más eficientes.

A partir del estudio paramétrico realizado, se concluye que la geometría óptima para minimizar el peso de la estructura necesario por rigidez, implica una inclinación de las diagonales tan cercana a 45° como sea posible. Asimismo, se constata que el número de columnas por pórtico no influye, de forma significativa, en el ahorro de material estructural para las luces que suelen imponer las cargas gravitatorias. La obtención explícita en este estudio de la función de peso total, permite valorar cuantitativamente el impacto de las distintas variables de diseño, en términos de consumo de material estructural.

La modulación establecida a partir de las diagonales condiciona el momento efectivo soportado por las columnas, permitiendo un diseño con sección constante para éstas a lo largo del módulo de arriostramiento. Este resultado implica grandes ventajas constructivas y simplifica el proceso de prediseño. Se concluye que para el predimensionamiento de las columnas, es suficiente utilizar como flector de diseño el flector medio del módulo de arriostramiento o el flector obtenido a mitad de su altura.

Referencias

- Comité Técnico AEN/CTN-140 (2005). *UNE-EN 1991-1-4:2007. Eurocódigo 1: Acciones en estructuras. Parte 1-4: Acciones generales. Acciones de viento, EC1-1-4*. Madrid: AENOR, España.
- Connor, J. J. (2003). *Introduction to structural motion control*. New York, NY: Prentice Hall.
- Moon, K. S. (2010). Stiffness-based design methodology for steel braced tube structures: A sustainable approach. *Engineering Structures*, 32, 3163-3170.
- Smith, B. S., & Coull, A. (1991). *Tall building structures: Analysis and design*. New York, NY: John Wiley & Sons, Inc.
- Taranath, B. S. (2010). *Reinforced concrete design of tall buildings*. New York, NY: CRC Press.

Correspondencia (Para más información contacte con):

Carlos R. Sánchez-Carratalá
Departamento de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras
E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Valencia
Tfno.: +34 96 387 7000 - Ext. 76772
Correo-e: csanchez@mes.upv.es
URL: <http://www.upv.es>