

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA



DEPARTAMENT DE CONSTRUCCIONS ARQUITECTÒNIQUES I  
DEPARTAMENT D'ESTRUCTURES A L'ARQUITECTURA

# **Optimización de mallas estructurales de acero envolventes de edificios en altura.**

**Análisis de las direcciones principales identificadas por sus  
líneas isostáticas.**

---

TESIS DOCTORAL

ROGER SEÑÍS LÓPEZ

DIRECTORES

Dr. D. RAMON SASTRE SASTRE

Dr. D. ROBERT BRUFAU NIUBÓ

**Mayo de 2014**

## Capítulo 5 Contribución al formalismo: procedimiento para la optimización de mallas estructurales envolventes de edificios en altura según sus solicitaciones, en base a las direcciones principales identificadas por sus líneas isostáticas

De acuerdo a lo expuesto en los capítulos 1 y 2, resulta relevante el estudio de las direcciones de las tensiones principales de un elemento resistente, representadas mediante las líneas isostáticas, para el diseño y el análisis de estructuras arquitectónicas. Obteniendo así un mejor rendimiento, comportamiento y eficiencia estructural y, en definitiva, la optimización de las estructuras según su forma, en base a sus solicitaciones usuales, como se ha tratado de forma exhaustiva anteriormente.

Es por ello por lo que atendiendo los puntos descritos en los epígrafes anteriores, como son la relación entre la forma y la función estructural, el estudio de las líneas isostáticas para la optimización de estructuras, y la utilización de mallas espaciales como sistema estructural, en el presente capítulo se realiza un estudio comparativo para la optimización de mallas estructurales de acero envolventes de edificios en altura, adaptando su geometría de acuerdo a la trayectoria de las líneas isostáticas del elemento resistente equivalente acorde a sus solicitaciones.

En este contexto, tres son las referencias intrínsecas fundamentales en el desarrollo del presente capítulo. La primera se infiere del proyecto, respecto al concurso de la *Transbay Tower* de San Francisco de Sarkisian <sup>[1]</sup>, en el que su diseño se basa en el esquema del entramado de espirales de Michell para carga puntual en el extremo de un elemento resistente en voladizo, como se aprecia en la figura 5.0-1.

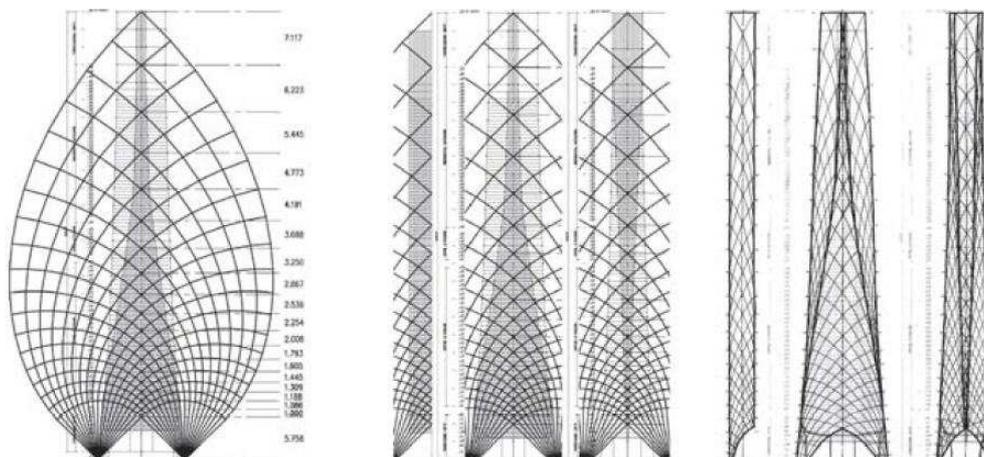


Figura 5.0-1. Alzados del edificio para el concurso de la *Transbay Tower* de San Francisco, en base al esquema del entramado de espirales de Michell. (Imagen tomada de [Sarkisian 2012, 142]).

Conjugándose, ésta, con la segunda y la tercera referencias, Señís <sup>[2][3]</sup>, resultado de la argumentación inicial validada, de interés para la optimización de mallas es-

[1] Sarkisian, M.; Lee, P.; Long, E.; Shook, D. (2010). *Organic and Natural Forms in Building Design*, p. 2844.

[2] Señís López, R. (2011). *Mallas estructurales envolventes per edificis en alçada. Procediment paramètric per optimitzar la forma en funció de les seves sol·licitacions*. Tesina Final de Màster.

[3] Señís, R.; Sastre, R.; Brufau, R.; Carbajal, E.C. (2014). *Estudio para la optimización de mallas estructurales de acero envolventes de edificios en altura según sus solicitaciones, en base al análisis de sus líneas isostáticas*. [In press]

tructurales de acero, envolventes de edificios en altura. Estas tres referencias conforman, por lo tanto, una base formalmente sólida para abordar dicha temática en el presente capítulo, como resultado concluyente aglutinador de todos los puntos tratados en la Tesis.

Una primera visualización básica de la concepción a desarrollar se presenta en la figura 5.0-2, en la que se muestran los esquemas de las líneas isostáticas de un elemento resistente vertical en voladizo para cargas verticales y cargas horizontales respectivamente, así como las geometrías de dos mallas trianguladas, las cuales corresponden a una geometría estructural en fachada convencional y su correspondiente posible geometría optimizada adaptando, en la medida de lo posible, su diseño a la trayectoria de las líneas isostáticas del elemento resistente equivalente, a la vez que se atienden a las cuestiones y necesidades arquitectónicas del edificio para el cual se diseña dicha estructura envolvente.

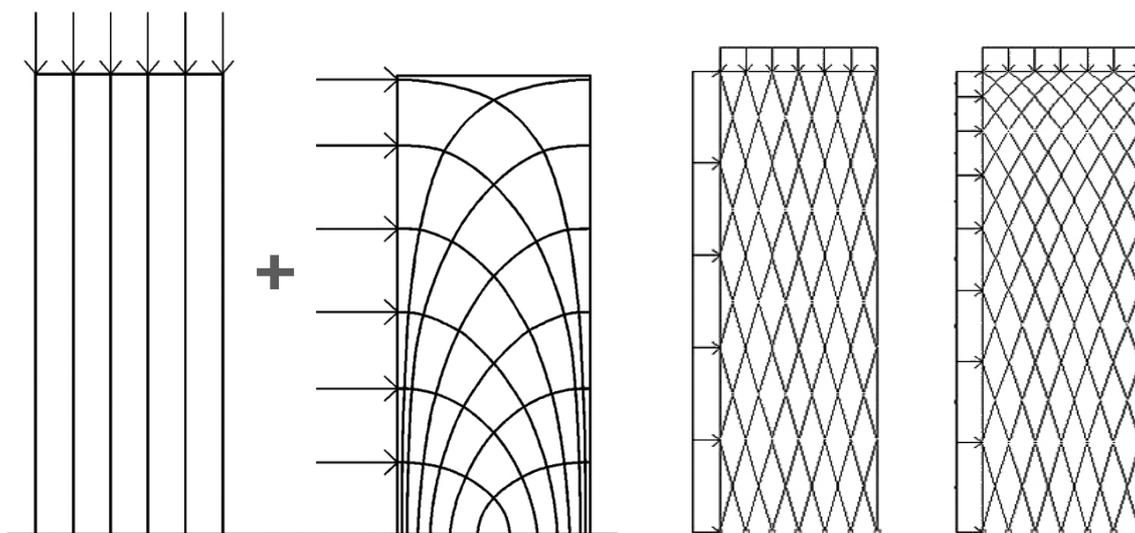


Figura 5.0-2. Esquema líneas isostáticas de un elemento resistente vertical en voladizo para cargas verticales y horizontales según [Brufau Niubó 1997/98, 16.19 y 16.23], y una posible malla convencional y la correspondiente posible malla optimizada.

En base a este concepto de diseño arquitectónico, en el presente capítulo se realizan cuatro estudios comparativo (dos estudios básicos con modelos en dos dimensiones y dos estudios finales con modelos de estructuras espaciales) de rendimiento estructural para la optimización de mallas de acero con distintas triangulaciones, envolventes de edificios en altura, entre las geometrías convencionales y las posibles geometrías optimizadas, para determinar si dichas mallas estructurales son más óptimas y eficientes cuando identifican la trayectoria de las líneas isostáticas generadas por la acción principal, en este caso el viento, al tratarse de un estudio de edificios en altura.

Los estudios básicos previos que se realizan con modelos en 2D permiten obtener una primera recopilación de valores y ratios de eficiencia y rendimiento estructural que son necesarios y de gran utilidad para implementar la metodología de trabajo propuesta para el análisis de estructuras de mayor complejidad, como son las estructuras espaciales envolventes de edificios en altura (modelos en 3D).

Esta línea de estudio requiere, previamente a la obtención-discusión de resultados y sus correspondientes conclusiones, de una definición consecuente de objetivos, metodología de trabajo y bases de cálculo, los cuales se presentan a continuación.

## **5.1 Objetivos de los estudios comparativos del rendimiento estructural de mallas envolventes de edificios en altura según sus solicitaciones**

Los objetivos del estudio comparativo de estructuras de entramado en tubo de edificios en altura, que se lleva a cabo en el presente capítulo, se exponen a continuación. No sólo se trata de un estudio acerca del rendimiento estructural de mallas envolventes de edificios de distintas esbelteces (objetivos generales), sino que además se propone un procedimiento para la optimización de mallas con distintas triangulaciones y geometrías, así como estudiar la tipología estructural más eficiente en base al estudio de las líneas isostáticas (objetivos específicos).

### **5.1.1 Objetivos generales del estudio comparativo de mallas envolventes de edificios en altura**

Los objetivos generales, necesarios para evaluar la influencia de los parámetros de diseño en el rendimiento estructural de mallas envolventes de edificios en altura, son:

- Determinar la influencia en el rendimiento estructural de los parámetros de diseño que definen la geometría de estructuras de entramados en tubo, obteniendo, así, cuáles son las triangulaciones que permiten obtener mallas envolventes de edificios en altura más eficientes en base a las acciones actuales.
- Profundizar en el diseño y el análisis de estructuras malladas, a la vez que se adquiere el dominio en el uso de herramientas paramétricas para el diseño de geometrías de estructuras complejas que tengan una importancia relevante dentro el concepto arquitectónico.

### **5.1.2 Objetivos específicos del estudio comparativo de mallas envolventes de edificios en altura**

Los objetivos específicos, del presente estudio comparativo del rendimiento estructural, para el desarrollo posterior de la fase correspondiente al procedimiento de optimización de mallas espaciales estructurales de acero, envolventes de edificios en altura, son:

- Determinar si las mallas estructurales de acero, envolventes de edificios en altura (sistema estructural en entramado en tubo), son más óptimas y si, en definitiva, ganan eficiencia cuando identifican la trayectoria de las líneas isostáticas, del elemento resistente equivalente, generadas por las cargas actuales.
- Establecer un procedimiento para la optimización de mallas estructurales de acero, envolventes de edificios en altura, según sus solicitaciones, en base al análisis de las direcciones de las tensiones principales y, consecuentemente, de acuerdo a las líneas isostáticas.
- Estudiar la geometría más eficiente para proponer el diseño de un edificio en altura que se caracterice por la capacidad resistente de su forma, según sus solicitaciones.

## 5.2 Metodología de trabajo

A tenor de lo previamente enunciado, la metodología de trabajo de los distintos estudios comparativos para la optimización de mallas estructurales envolventes de edificios en altura, se establece de acuerdo a tres apartados. En el primero, se analizan las líneas isostáticas de cinco elementos verticales en voladizo (equivalentes a los edificios en altura), modelizados en dos dimensiones mediante elementos finitos para distintos estados de carga de acuerdo a la normativa posteriormente enunciada. Dicho estudio permite diseñar las posibles geometrías de comportamiento más eficiente, las cuales se presentan en el apartado 5.2.2. En el tercer apartado se analizan los modelos convencionales y los posibles modelos optimizados, comparando sus resultados, para determinar si las mallas ganan eficiencia cuando identifican la trayectoria de las líneas isostáticas generadas por la acción principal, el viento.

Efectivamente, se está estableciendo un proceso de concepción estructural, que parte de la metodología convencional en el diseño y el análisis de proyectos arquitectónicos, la cual se podría resumir de la siguiente manera:

- Estudio de las distintas tipologías estructurales tipificadas en base a las necesidades y características arquitectónico-constructivas del proyecto y de su puesta en obra.
- Definición de la geometría de acuerdo a una tipología estructural tipificada.
- Predimensionado de la geometría definida previo al análisis y obtención de resultados para el dimensionado de los distintos elementos estructurales que conforman la estructura proyectada.
- Proceso de análisis iterativo, que consiste en calcular la estructura y modificar aquellos elementos estructurales que no cumplan con los requerimientos de seguridad.

En este sentido, de acuerdo a la metodología de trabajo propuesta, se establece un procedimiento para la optimización de mallas estructurales obteniendo una geometría específica, no tipologizada, que esencialmente trabaje por **su forma y no sólo por la resistencia del material que la conforma**. Lo pasos de dicha metodología se exponen a continuación:

- Establecer las características formales y específicas del edificio, así como las acciones actuantes sobre la estructura del proyecto a diseñar.
- Definir la geometría de mayor eficiencia estructural posible, en base a las características arquitectónico-constructivas y las cargas solicitantes previamente definidas. En este caso, en base a las **líneas isostáticas** del elemento resistente equivalente de alma llena.
- Concebir la geometría de la estructura envolvente, en base a dos claras premisas fundamentales en el proceso: menor cantidad de material y criterios de minimización del coste constructivo.
- Predimensionar los distintos elementos resistentes que conforman la estructura previo al análisis, y obtención de resultados.
- Análisis de la estructura propuesta, dimensionado y comprobación de los distintos elementos.

### 5.2.1 Estudio de las direcciones de las tensiones principales y las líneas isostáticas

Se estudian las líneas isostáticas, entendidas como las curvas envolventes de las tensiones principales, de cinco elementos estructurales en voladizo, para distintas esbelteces geométricas ( $H/B$ : 2, 3, 4, 5 y 6), para una base  $B = 30$  m, como se muestra en la figura 5.2-1, sometidos a distintas combinaciones de acciones, de acuerdo a la normativa utilizada, con el fin de determinar las trayectorias de las líneas isostáticas de cada elemento estructural para cada combinación de acciones.

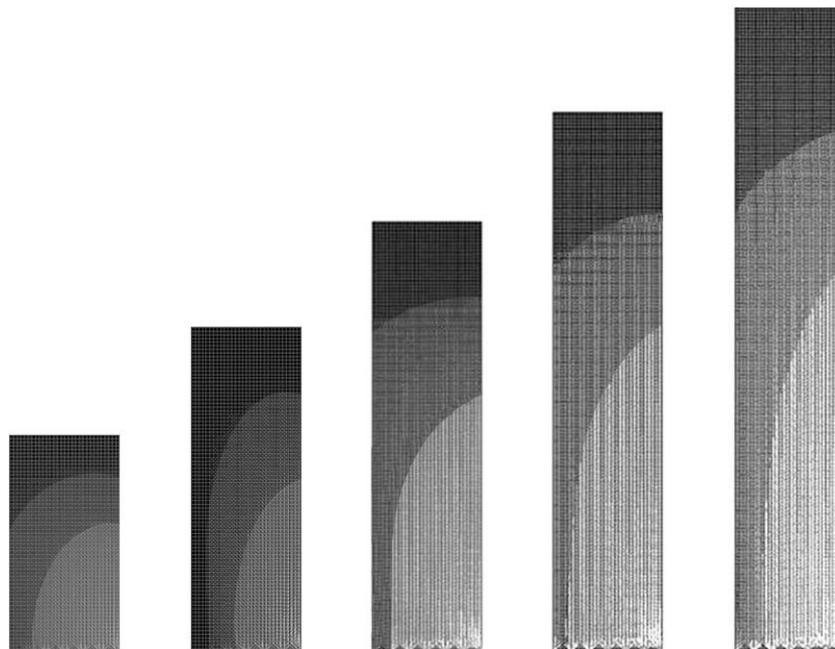


Figura 5.2-1. Estudio de las direcciones de las tensiones principales para cinco esbelteces geométricas distintas ( $H/B$ : 2, 3, 4, 5 y 6).

Las trayectorias obtenidas para los distintos casos estudiados, se presentan en las tablas 5.2-1 y 5.2-2, respectivamente en la parte superior y la base de los elementos analizados, de acuerdo a distintas combinaciones de acciones. Así como los puntos intermedios que se consideren necesarios. Los resultados corresponden a las direcciones de las tensiones principales, en la parte superior y en la base de los elementos estructurales en voladizo analizados, de acuerdo a las acciones y las combinaciones de acciones consideradas en el análisis de los modelos estructurales de edificios en altura de acuerdo a la normativa utilizada <sup>[1][2][3]</sup>.

Las combinaciones mostradas en dichas tablas corresponden, además de las cargas permanentes, a la acción de uso como acción principal y el viento como acción secundaria (combinación 1); a la acción del viento como acción principal y el uso como acción secundaria (combinación 2); y a la acción del viento como acción principal y sin acción de uso (combinación 3). Se aplican los coeficientes de seguridad y simultaneidad correspondientes de acuerdo a la normativa referenciada.

[1] CTE-Código Técnico de la Edificación. (2006). *Documento Básico SE-AE (Seguridad Estructural: Bases de Cálculo y Acciones en la edificación)*.

[2] Eurocódigo 1. (2007). *Acciones en estructuras. Parte 1-4: Acciones generales. Acciones de viento*.

[3] Eurocódigo 8. (2011). *Proyecto de estructuras sismorresistentes. Parte 1: Reglas generales, acciones sísmicas y reglas para edificación*

Inclinación (en °) de las direcciones principales en la parte superior de los elementos estructurales en voladizo					
Combinación	H/B=2	H/B=3	H/B=4	H/B=5	H/B=6
Combinación 1	15,80	16,12	16,44	16,77	17,12
Combinación 2	36,59	42,39	48,50	54,40	59,67
Combinación 3	69,39	73,11	75,84	78,10	80,28

Tabla 5.2-1. Inclinación (en °), respecto a la vertical, de las líneas isostáticas en la parte superior de los modelos analizados.

Inclinación (en °) de las direcciones principales en la parte inferior de los elementos estructurales en voladizo					
Combinación	H/B=2	H/B=3	H/B=4	H/B=5	H/B=6
Combinación 1	18,61	18,06	17,66	17,33	17,05
Combinación 2	19,06	18,20	17,57	17,08	16,69
Combinación 3	19,27	18,26	17,54	17,00	16,58

Tabla 5.2-2. Inclinación (en °), respecto a la vertical, de las líneas isostáticas en la parte inferior de los modelos analizados.

Después de estudiar los resultados obtenidos para los cinco elementos estructurales analizados, se determina un trazado de las líneas isostáticas para elementos verticales en voladizo, que se utilizará para el diseño de las geometrías de las mallas propuestas en el apartado 5.2.2, adaptando las mallas convencionales uniformes en función de las líneas isostáticas, a la vez que se atienden las necesidades arquitectónicas de los edificios.

Cabe destacar que, incidiendo en este aspecto de la trayectoria de las líneas isostáticas de tensiones de acuerdo a lo que se expone en el apartado 5.3.2, al establecer el viento como la acción principal y determinante por tratarse de un estudio de edificios en altura, se está considerando como carga principal una acción variable en el tiempo y por lo tanto, cargas fluctuantes, derivadas de la propia naturaleza de dicha acción dinámica. Esto conlleva, en sí mismo, que haya diversas opciones de geometrías “óptimas”, tantas como combinaciones de acciones contempladas de acuerdo a la normativa utilizada, ya que para cada combinación de acciones hay una determinada trayectoria de las líneas isostáticas, y en consecuencia una geometría de malla envolvente “óptima”.

En este punto es importante matizar que el objetivo principal de los distintos estudios comparativos no es determinar la geometría “óptima”, ya que como se indica, no hay una única solución sino que, tal y como se expone en el presente capítulo, se pretende establecer un procedimiento de optimización que permita obtener geometrías de mallas envolventes de edificios en altura más eficientes, aumentando su rendimiento en comparación con las mallas convencionales. En ningún caso, el objetivo es obtener la geometría “óptima”, ya que dada la naturaleza de las acciones principales, acciones variables en el tiempo, no es posible determinar una única solución “óptima”, dado que existen varias soluciones geométricas.

Por lo tanto, de acuerdo a la metodología propuesta en base a la normativa utilizada, se analizan las distintas variables con el fin de definir una envolvente o espectro de posibilidades geométricas, y tomar una trayectoria representativa, tal y como se muestra en las tablas 5.2.1 y 5.2.2 referidas. Este punto en un principio puede parecer ciertamente aleatorio, pero es importante destacar que hay un factor deter-

minante también a considerar: atender las cuestiones y necesidades arquitectónicas del edificio. De esta forma, la geometría propuesta responde al estudio de las trayectorias de las líneas isostáticas, a la vez que se da respuesta al concepto arquitectónico como es, por ejemplo, una distribución constante de las plantas en altura, acotando las posibilidades geométricas de la malla.

### 5.2.2 Diseño de los modelos estructurales de edificios en altura

El diseño de las estructuras envolventes de edificios en altura se realizará en base a los parámetros de diseño de las mallas que se definen a continuación:

- Forma de la base del prisma correspondiente al edificio en altura: base cuadrada, rectangular, triangular o circular (o aproximación poligonal representativa), como se muestra en la figura 5.2-2.
- Esbeltez geométrica del edificio (en base al número plantas y dimensiones en planta).
- Geometría básica de la malla en alzado.
- Ancho del recuadro o densidad de la malla.

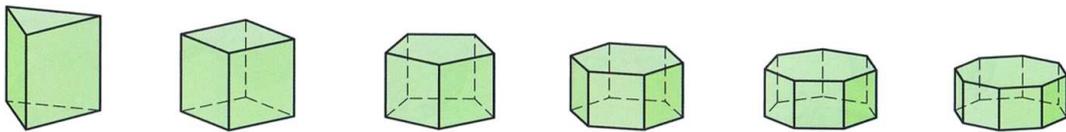


Figura 5.2-2. Prismas de geometrías básicas. (Imagen tomada de [Pottmann et al. 2007, 94]).

Una vez conocida la trayectoria de las líneas isostáticas, de acuerdo a las direcciones de las tensiones principales, se adapta a la forma de distintas mallas para obtener las posibles geometrías envolventes optimizadas. Para el diseño de las mallas optimizadas se utilizan las triangulaciones más comunes para estructuras tipo celosía, en este caso, para estructuras de soporte según Torroja <sup>[4]</sup> como se muestra en la figura 5.2-3 o Gómez <sup>[5]</sup>, entre otros autores.

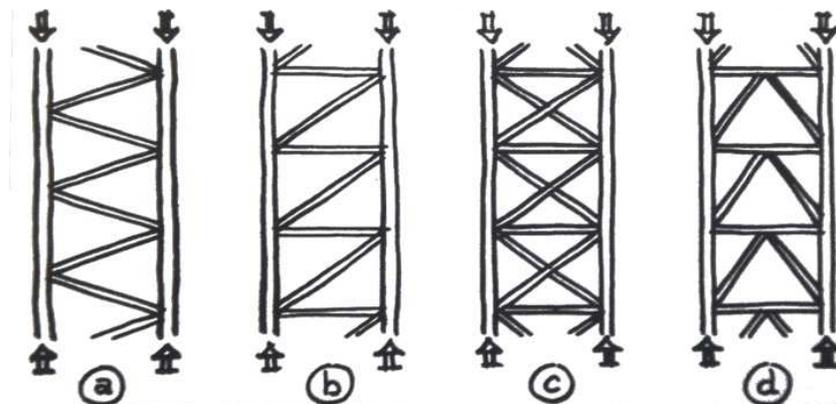


Figura 5.2-3. Soportes en celosía. (Imagen tomada de [Torroja Miret 1957, 2010, 85]).

[4] Torroja Miret, E. (2010). *Razón y ser de los tipos estructurales*, p. 85.

[5] Gómez Hermoso, J.; et al. (2013). *Proyecto de edificios altos*, p. 91.

Las triangulaciones, de acuerdo a la figura 5.2-3, se caracterizan por su capacidad de soportar esfuerzos propios de edificios en altura, gracias a su capacidad de resistir tracciones además de la compresión centrada, compresiones excéntricas, flexiones y cortantes, que transmiten a los elementos resistentes contiguos, atendiendo a las deformaciones que presentan de acuerdo a las cargas actuantes.

La configuración en base a triangulaciones permite considerar la geometría de las mallas convencionales que se definen en los distintos estudios realizados, adaptando posteriormente la forma de éstas en base a la trayectoria de las líneas isostáticas definidas en el apartado 5.2.1, para obtener las geometrías de las posibles mallas envolventes optimizadas que se proponen. Las mallas envolventes se diseñan para estructuras de entramado en tubo, por lo tanto, se utiliza la tipología estructural consistente en aprovechar las fachadas como elementos de contraviento. Este criterio se basa en que la estructura de entramado en tubo es, conceptualmente, una tipología estructural especialmente eficaz en edificios en altura sometidos a flexión y torsión, (bajo las acciones horizontales consideradas en su aspecto dinámico), especialmente en casos en que la torsión o rotación del edificio se produce en estructuras asimétricas, es decir, cuando el centro de masas del forjado y el centro de giro que definen los pórticos no coinciden, pero también en edificios de plantas simétricas debido a la incidencia del viento en unas direcciones no coincidentes con la posición del centro resistente de las distintas plantas del edificio, así como por la combinación de las acciones longitudinal y transversal del viento <sup>[6]</sup>.

La ventaja que tal solución presenta reside en que los elementos de contraviento se disponen a la máxima distancia respecto al centro de resistencia del edificio, aumentando así su inercia y su rigidez torsional, disminuyendo, en este caso, de forma considerable el par flector y el par torsor. Como indica Cobreros <sup>[6]</sup>, el índice a flexión que se obtiene en una estructura en tubo es de 68 con respecto a una superestructura con los pilares en las esquinas, a la cual le correspondería el índice máximo de 100, mientras que 50 sería el índice a flexión que se obtienen para una retícula homogénea de pórticos. Dado que en las estructuras en tubo en su plano la rigidez es mucho mayor, si se compara por ejemplo con una estructura de pórticos, se obtienen desplazamientos horizontales mucho más pequeños, con una deformación más parabólica que lineal dado que la deformación predominante, en sistemas de contraviento, se produce por la flexión global del sistema y no tanto por la deformación por cortante (distorsión angular), siendo ambas deformaciones propias de elementos estructurales que se definen como una ménsula. En base a los métodos de W. Le Mesurier (-) se puede analizar la rigidez del conjunto a cortante, así como frente al vuelco <sup>[7][8]</sup>.

Además de las características geométricas y mecánicas expuestas, los modelos diseñados de entramado en tubo para los edificios prismáticos proyectados ofrecen un comportamiento estructural sencillo atendiendo, de la mejor manera posible, las siguientes grandes ventajas que describe el Eurocódigo <sup>[9]</sup>, en su aspecto sismorresistente:

- Resistencia lateral.
- Simetría mecánica en planta.

[6] Cobreros Vime, M.A. (2002). *Tipologías estructurales de edificios en altura*, pp. 10 y 40.

[7] Ábalos Vázquez, I.; Herreros Guerra, J. (2000). *Técnica y Arquitectura en la ciudad contemporánea, 1950-2000*, p. 79

[8] Bordas Geli, A.M.; Peiro Sendra, M. (2012). *Diseño y concepción del contraviento de edificios en altura de hormigón armado. Análisis de dos casos: torre Phare y torre D2*, p. 29.

[9] Eurocódigo 8. (2011). *Proyecto de estructuras sismorresistentes. Parte 1: Reglas generales, acciones sísmicas y reglas para edificación*.

- Regularidad, mecánica y geométrica, en altura, matizando la conveniente irregularidad decreciente de los intervalos de separación de los niveles principales horizontales de las mallas propuestas.
- Resistencia y rigidez a torsión.
- Ligereza, especialmente en la parte superior del edificio.
- Rigidez de los forjados en su plano, produciendo un beneficioso efecto diafragma, característica u opción de modelado de los forjados que permite igualar los desplazamientos en cada plano, reduciendo así los grados de libertad a tres por planta (dos traslacionales y uno rotacional).
- Sin apeos y sin la necesidad de atender grandes voladizos.

Como se ha expuesto, se consideran estructuras prismáticas (entramado en tubo) de base cuadrada, rectangular, triangular y circular/poligonal, dando así cumplimiento a los puntos anteriormente descritos.

Cuando se diseñan las mallas optimizadas, adaptando su geometría a la trayectoria de las líneas isostáticas de los elementos estructurales equivalentes bajo las acciones solicitantes, se plantea que cada tramo de malla pueda abarcar varias plantas del edificio, es decir, los niveles de las plantas en su mayoría no coinciden con las uniones de las mallas, como se muestra en la figura 5.2-4, sino que se apoyan en tramos intermedios de dichas mallas, permitiendo así una distribución constante de las plantas en todo el alzado.

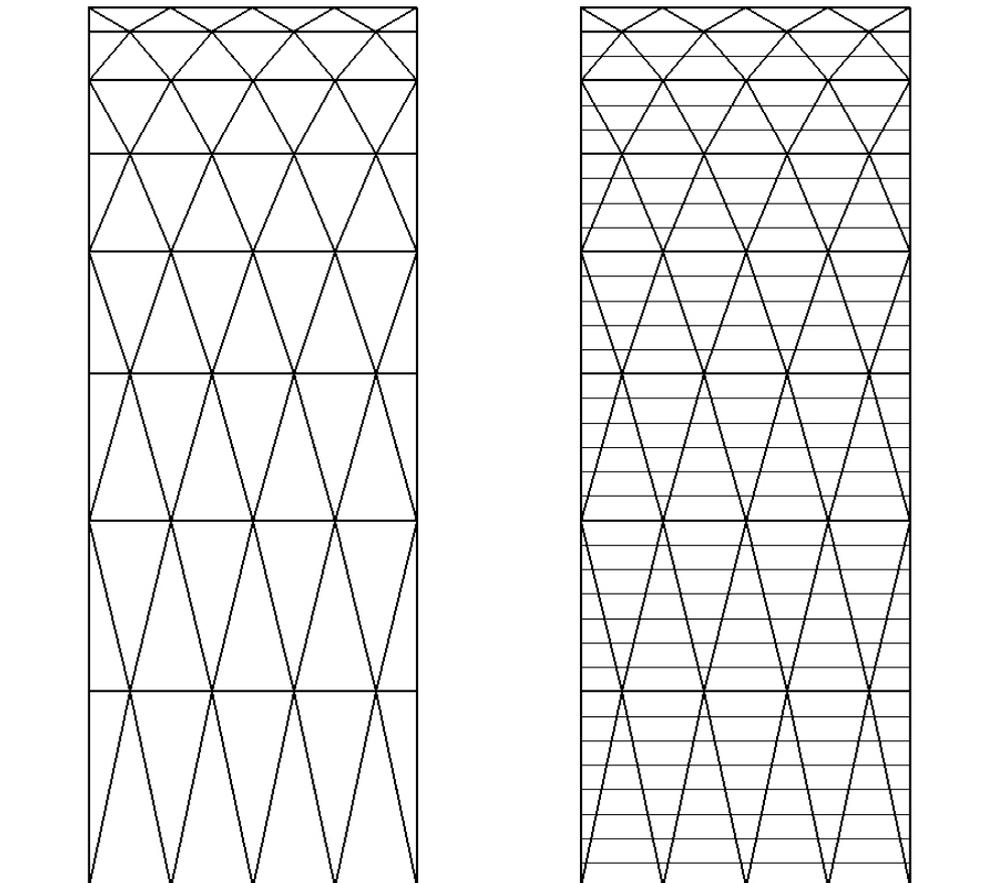


Figura 5.2-4. Propuesta de distribución de plantas para la geometría “optimizada” en alzado, con plantas intermedias.

Este concepto estructural arquitectónico, ha sido suficientemente tratado con resultados que arrojan un buen comportamiento en el ámbito de la ingeniería estructural arquitectónica. Ejemplo de ello, son edificios en altura como puede ser el *Hearst Building* de Nueva York, mostrado en el capítulo 4, y caracterizado por su estructura metálica envolvente de doble diagonal con plantas intermedias.

El efecto diafragma indicado, en el plano de las plantas intermedias, acorta la luz de los “pilares” o barras de las mallas reduciendo la luz característica de los perfiles reduciéndose sustancialmente, en consecuencia, los efectos de segundo orden propios del pandeo. Por esta razón, la densidad de la malla inicialmente pasa a considerarse en una segunda fase.

Para realizar los modelos de edificios en altura, en base a los distintos parámetros de diseño considerados, se utiliza la herramienta de modelado y diseño generativo *Grasshopper 3D-Python*. Este *plugin* de *Rhinceros 3D* de programación visual para el diseño paramétrico es un editor gráfico de algoritmos (automatización de acciones), que posibilita vincular geometrías directamente a la herramienta de modelado CAD *Rhinceros 3D*, permitiendo así diseñar y generar nuevas formas utilizando algoritmos generativos, pero también numéricos y/o textuales entre otros, arrastrando y uniendo subyacentemente en al área de trabajo componentes que tienen entradas y salidas, como se muestra en la figura 5.2-5.

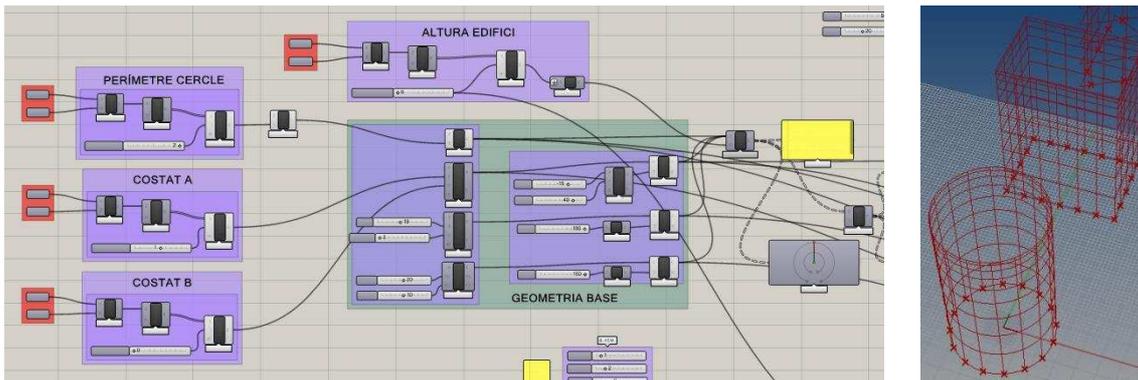


Figura 5.2-5. Modelado, con *Grasshopper*, para el diseño de las distintas formas de edificios en altura para las distintas geometrías de malla. (Imágenes propias).

La utilización de esta herramienta de programación visual permite generar, de una forma relativamente rápida, todo tipo de geometrías y formas, (incluso las más complejas), necesarias en el ámbito de la arquitectura avanzada y paramétrica, agilizando el proceso de su creación sin la necesidad de escribir códigos complejos ni tener conocimientos de programación o *scripting*.

### 5.2.3 Análisis de las estructuras diseñadas

En la última fase de la metodología de trabajo utilizada se analizan los modelos optimizados de acuerdo a las líneas isostáticas y se comparan con los resultados de los modelos convencionales. El objetivo principal de la Tesis es determinar y cuantificar si los modelos optimizados son más eficientes que los modelos convencionales y, asimismo, establecer que mallas son más eficientes para determinadas alturas y, en consecuencia, para cada esbeltez geométrica considerada. Este apartado de análisis se desarrolla en profundidad en los apartados 5.3 y 5.4 que se describen a continuación.

### 5.3 Bases de cálculo

Para abordar los distintos estudios comparativos de rendimiento estructural del presente capítulo, se analizan 956 modelos de edificios en altura de acuerdo a los parámetros que se describen a continuación para los dos estudios básicos con modelos en 2D ( $20+128=148$  modelos) y dos estudios finales de mallas espaciales ( $768+40=808$  modelos).

#### 5.3.1 Esbelteces geométricas de los edificios y altura entre plantas

En general, se analizan cuatro alturas de coronación de los edificios distintas, H: 45, 90, 135 y 180 m, excepto en aquellos estudios que se requiera un mayor número de alturas (valores interpoladores), para obtener un mayor número de resultados en cuanto a rendimiento estructural se refiere. Para cada una de las ellas se analizan distintas esbelteces, de acuerdo a las siguientes dimensiones en planta, B: 15, 22.5 y 30 m de lado, en el caso de base cuadrada y triangular, de diámetro equivalente a B en el caso de edificios de base circular/poligonal y de lado menor en el caso de base rectangular (de proporción en planta de 2 a 1, que permite considerar el efecto diafragma de los forjados ya que no se supera la proporción de 4 a 1, de acuerdo al Eurocódigo).

En lo concerniente a la separación entre plantas, se opta por una altura de cuatro metros o superior, las cuales permiten luces de forjados mayores, para así concentrar las cargas verticales en la estructura de entramado de la fachada sin la necesidad de una estructura interior de pórticos o núcleo resistente, que influya en el comportamiento global de las estructuras de entramado en tubo analizadas, ya que dicha tipología estructural envolvente, de acuerdo a los estudios de Khan <sup>[1]</sup> mostrados en el capítulo anterior, es válida para edificios de estructura metálica de hasta ochenta plantas.

#### 5.3.2 Acciones consideradas y coeficientes de simultaneidad

##### 5.3.2.1 *Acciones gravitatorias*

Para el estudio realizado de edificios en altura se han considerado las siguientes cargas gravitatorias, que se corresponden con una solución de estructura metálica con perfiles y chapa colaborante:

- Peso propio de la estructura metálica horizontal (perfiles/chapa colaborante):  $3.50 \text{ kN/m}^2$ .
- Cargas permanentes (pavimentos, instalaciones y tabiquería):  $2.20 \text{ kN/m}^2$ .
- Sobrecarga de uso residencial o de oficinas:  $2.00\text{-}3.00 \text{ kN/m}^2$ .

Para el estudio comparativo de rendimiento de estructuras de entramado en tubo que se realiza no se aplica la reducción de la sobrecarga de uso, (entre el 20 y el 30% según la normativa que se utilice), que se puede aplicar para el dimensionado de la estructura vertical y la cimentación. Este aspecto no es relevante para el estudio que se realiza, ya que influye de forma similar en las estructuras a comparar, en las cuales la acción principal corresponde a la acción horizontal del viento, como se tratará posteriormente.

---

[1] Khan, F.R. (1969). *Recent structural systems in steel for high-rise buildings*.

### 5.3.2.2 *Acciones horizontales*

En cuanto a cargas horizontales se refiere, dichas cargas corresponden a la acción del viento, los impactos de vehículos y la acción sísmica.

Cabe destacar, en este punto acerca de las acciones consideradas para el análisis de edificios en altura, que no se consideran las cargas horizontales de impactos de vehículos ni la acción sísmica, ya que no son objeto de estudio de la presente Tesis, atendiendo al extenso tratamiento que requieren dichas temáticas, siendo una materia de sumo interés especialmente la acción sísmica que en ocasiones puede ser determinante para los edificios en altura. Es por ello por lo que esta temática puede considerarse objeto de estudio, como una consecuencia propia de las conclusiones.

No obstante, tomando consciencia de la posible relevancia de la acción sísmica en los edificios en altura, en el apartado 5.2.2 se enumeran algunos de los puntos y recomendaciones que define el Eurocódigo <sup>[2]</sup>, en su aspecto sismorresistente y que se han tenido en cuenta en el diseño de los modelos estructurales propuestos, para obtener un comportamiento estructural sencillo.

Dado que el viento es una acción dinámica producida por la masa de aire atmosférico en movimiento que actúa sobre la estructura de un edificio a una determinada velocidad, generando efectos dinámicos en dicha estructura <sup>[3]</sup>, es necesario en consecuencia, como indica Cobreros <sup>[4]</sup>, considerar este aspecto desde el principio del diseño del edificio introduciendo el factor de frecuencia propia o natural de dicho edificio. La acción del viento varía en el tiempo, y por ello las cargas correspondientes a dicha acción dinámica son cargas fluctuantes que producen presiones normales a la superficie de la estructura y/o a los distintos elementos de revestimiento de las fachadas de los edificios analizados, además de las fuerzas de rozamiento tangenciales a la superficie. Cabe destacar que debido a la interacción del viento sobre la estructura, se produce un movimiento de deformación de dicha estructura que, a su vez, modifica el valor de las fuerzas dinámicas por la variación de las condiciones de contorno de la corriente, hasta el punto que el incremento de las cargas dinámicas debido a la deformación del edificio pueda producir un fenómeno de inestabilidad de la estructura y en consecuencia del edificio. Las particularidades y características tan específicas del viento implica que, modelizar esta acción dinámica, sea una tarea de una complejidad y coste elevados <sup>[3]</sup>.

Esta característica indica que en edificios en altura en los cuales, según su esbeltez geométrica y la rigidez de la estructura, su primera frecuencia propia o natural de vibración sea elevada ( $\omega_0 > 5$  Hz) o levemente dinámica ( $1 \text{ Hz} < \omega_0 \leq 5 \text{ Hz}$ ), es decir, en edificios rígidos o muy masivos con oscilaciones no muy grandes <sup>[4]</sup>, poco sensibles a los efectos dinámicos del viento, sea suficiente estimar de forma precisa las cargas aerodinámicas adecuadamente promediadas en el tiempo de acuerdo al método simplificado de las Cargas Estáticas Equivalentes, siempre y cuando el edificio no tenga una altura superior a los 200 m <sup>[3][5]</sup>.

Atendiendo a dicha característica la acción del viento se establece, a pesar de que por su naturaleza sea una carga dinámica, en base a la respuesta espectral como una carga pseudoestática, determinando así las cargas estáticas equivalentes gene-

[2] Eurocódigo 8. (2011). *Proyecto de estructuras sismorresistentes. Parte 1: Reglas generales, acciones sísmicas y reglas para edificación*

[3] Gómez Hermoso, J.; et al. (2013). *Proyecto de edificios altos*, pp. 196, 207 y 209.

[4] Cobreros Vime, M.A. (2002). *Tipologías estructurales de edificios en altura*, p. 16.

[5] Eurocódigo 1. (2007). *Acciones en estructuras. Parte 1-4: Acciones generales. Acciones de viento*, p. 11.

radas por la acción del viento que actúan sobre la estructura y/o los revestimientos de los edificios analizados, no considerando las aceleraciones sobre la estructura. Para ello, es necesario que dicha estructura sea lo suficientemente rígida para no sufrir efectos dinámicos <sup>[6]</sup>.

Considerar la acción del viento como una carga estática es una de las simplificaciones que contemplan las distintas normativas, para abordar este fenómeno de una forma práctica y acotada, a cambio de introducir en el cálculo determinados factores de seguridad. Algunas de estos criterios o simplificaciones se enumeran a continuación tal y como resume Gómez <sup>[6]</sup>:

- La dirección del viento es horizontal.
- La densidad del aire, salvo excepciones, es de valor constante ( $\rho_a = 1,25 \text{ kg/m}^3$ ).
- La velocidad básica de referencia del viento, que se trata a continuación, se establece a partir de una medición normalizada, de la cual se extrae un valor probabilístico.
- La acción del viento sobre la estructura, salvo excepciones como pueden los edificios en altura, es una carga estática.

Para determinar las cargas del viento sobre los edificios en altura analizados, se toman los criterios y parámetros establecidos en el Eurocódigo <sup>[7]</sup>, así como las siguientes condiciones que establece dicha norma:

- El viento se aplicará teniendo en cuenta la variación de su velocidad media con la altura sobre el suelo, según el tipo de terreno.
- El viento se aplicará teniendo en cuenta la turbulencia correcta según el tipo de terreno, en base a la rugosidad del mismo, la topografía y la altura sobre el nivel del suelo.

Esta norma es, de todas las normativas españolas, la más completa en cuanto a la acción del viento se refiere, de utilidad para un ámbito geográfico extenso, en concreto, para toda Europa.

### 5.3.2.3 *Acciones indirectas*

En cuanto a las acciones indirectas se refiere, como son las acciones térmicas, reológicas, terremotos y asientos diferenciales, las cuales producen deformaciones y aceleraciones sobre la estructura, cabe destacar que no son objeto de estudio de la presente Tesis, atendiendo al extenso tratamiento que requieren cada una de ellas. Dada su relevancia en el comportamiento de las estructuras en general, y de edificios en altura en particular, estas temáticas también pueden considerarse objeto de estudio, como una consecuencia propia de las conclusiones.

### 5.3.3 **Presiones, fuerzas y momentos del viento**

En el caso de las estructuras tridimensionales estudiadas, los coeficientes aerodinámicos de fuerza,  $c_F$ , y de momento,  $c_M$ , se definen como el cociente entre la fuerza,  $F$ , o el momento,  $M$ , respectivamente y la influencia directa de la presión

---

[6] Gómez Hermoso, J.; et al. (2013). *Proyecto de edificios altos*, pp. 190, 191 y 209.

[7] Eurocódigo 1. (2007). *Acciones en estructuras. Parte 1-4: Acciones generales. Acciones de viento*.

dinámica de referencia o extendida a su longitud característica, respectivamente, como se muestra en las siguientes expresiones <sup>[8][9][10]</sup>:

$$c_F = \frac{F}{P_D \cdot A_{\text{ref}}} \quad (5.3.1); \quad c_M = \frac{M}{C \cdot P_D \cdot A_{\text{ref}}} \quad (5.3.2)$$

donde,

$c_F$ , es el coeficiente aerodinámico de fuerza;

$c_M$ , es el coeficiente aerodinámico de momento;

$C$ , es la longitud característica del cuerpo u obstáculo;

$A_{\text{ref}}$ , es la superficie de referencia (en cuerpos romos, el Eurocódigo 1 justifica tomar el área frontal del obstáculo);

$P_D$ , es la presión dinámica de referencia de acuerdo a la siguiente expresión:

$$P_D = \frac{1}{2} \rho \cdot U_\infty^2 \quad (5.3.3)$$

$\rho$ , es la densidad del aire ( $\rho_a = 1,25 \text{ kg/m}^3$ );

$U_\infty$ , es la velocidad característica de la corriente incidente;

La presión del viento actuando en las superficies externas de una estructura,  $w_e$ , se obtendrá de acuerdo a la siguiente expresión:

$$w_e = q_p(z_e) \cdot c_{pe} \quad (5.3.4)$$

De la misma forma, la presión del viento actuando en las superficies internas de una estructura,  $w_i$ , se obtendrá de acuerdo a la siguiente expresión:

$$w_i = q_p(z_e) \cdot c_{pi} \quad (5.3.5)$$

donde,

$c_{pe}$ , es el coeficiente de presión para la presión exterior.

$c_{pi}$ , es el coeficiente de presión para la presión interior.

$q_p(z_e)$ , es la presión correspondiente a la velocidad de pico, a una altura  $z_e$ , tal y como se establece posteriormente.

La presión neta considerada será la diferencia de las presiones en cada superficie, donde se toma la presión como positiva y la succión como negativa.

[8] Gómez Hermoso, J.; et al. (2013). *Proyecto de edificios altos*, p. 109.

[9] Holmes, J.D. (2007). *Wind loading of structures*, p. 76.

[10] Meseguer, J.; Sanz Andrés, A.; Pindado, S.; Franchini, S.; Alonso, G. (2013). *Aerodinámica civil. Efectos del viento en edificaciones y estructuras*, pp. 264 y 265.

Las fuerzas de viento provocadas por presiones que actúan sobre una estructura o elemento resistente se determinan por medio de las fuerzas globales,  $F_w$ , de acuerdo a la siguiente expresión del Eurocódigo <sup>[11]</sup>:

$$F_w = c_s c_d \cdot c_F \cdot q_p(z_e) \cdot A_{ref} \quad (5.3.6)$$

donde,

$c_s c_d$ , es el factor estructural que se trata en el apartado 5.3.5;

$c_F$ , es el coeficiente de fuerza;

$q_p(z_e)$ , es la presión correspondiente a la velocidad de pico, a una altura  $z_e$ , tal y como se establece posteriormente.

$A_{ref}$ , es la superficie de referencia para  $c_F$  del elemento estructural o estructura, (habitualmente es la proyección de la superficie de la estructura sobre un plano normal al viento, y el área frontal del obstáculo en cuerpos romos como justifica tomar el Eurocódigo <sup>[11]</sup>).

El efecto de torsión debido a un viento oblicuo y/o no uniforme, se representa para las estructuras sensiblemente simétricas no circulares, como una fuerza  $F_w$ , aplicada con una excentricidad mínima  $e$ , (respecto al centro resistente de la base como se muestra en la figura 5.3.1, equivalente a un viento de dirección inclinada), de acuerdo a la expresión:

$$e = \frac{b}{10} \quad (5.3.7)$$

donde,

$b$ , es la dimensión perpendicular al eje principal considerado.

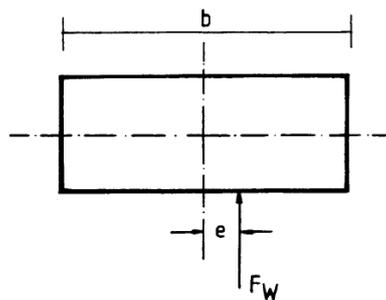


Figura 5.3-1. Fuerza del viento sobre una sección según [Eurocódigo 1. Parte 1-4].

### 5.3.4 Parámetros, coeficientes y modelización del viento

La velocidad y presión del viento se componen de una componente media y una componente variable. La velocidad media del viento  $v_m(z)$  a una altura  $z$  por encima del terreno, depende de la rugosidad y orografía del terreno, determinándose mediante la siguiente expresión:

$$v_m(z) = c_r(z) \cdot c_o(z) \cdot v_b \quad (5.3.8)$$

<sup>[11]</sup> Eurocódigo 1. (2007). *Acciones en estructuras. Parte 1-4: Acciones generales. Acciones de viento.*

donde,

$c_r(z)$ , es el factor de rugosidad (expresión (5.3.13)).

$c_o(z)$ , es el coeficiente topográfico, que se toma 1,0.

$v_b$ , es la velocidad básica del viento que se determina de acuerdo a la expresión (5.3.9):

$$v_b = c_{dir} \cdot c_{season} \cdot v_{b,0} \quad (5.3.9)$$

donde,

$v_b$ , es la velocidad básica, definida en función de la dirección del viento y la época del año a 10 m de altura de un terreno de categoría II.

$c_{dir}$ , es el factor direccional.

$c_{season}$ , es el factor estacional.

$v_{b,0}$ , es el valor fundamental de la velocidad básica del viento.

La presión dinámica pico,  $q_p(z)$ , incluye la velocidad media y las fluctuaciones de velocidad a corto plazo de acuerdo a la siguiente expresión (5.3.10), en base al Eurocódigo <sup>[12]</sup>:

$$q_p(z) = [1 + 7 \cdot l_v(z)] \cdot \frac{1}{2} \rho \cdot v_m^2(z) = c_e(z) \cdot q_b \quad (5.3.10)$$

donde,

$c_e(z)$ , es el coeficiente de exposición, el cual contempla los efectos que la rugosidad del terreno, la topografía y la altura sobre el nivel del suelo provocan sobre la velocidad del viento y la turbulencia.

$q_b$ , es el coeficiente de presión dinámica básica o presión media de la velocidad de referencia del viento se describe en la expresión (5.3.11):

$$q_b = \frac{1}{2} \rho \cdot v_b^2 \quad (5.3.11)$$

donde,

$v_b$ , es la velocidad básica del viento, de acuerdo a la expresión (5.3.9);

$\rho$ , es la densidad del aire ( $\rho_a = 1,25 \text{ kg/m}^3$ ).

Suponiendo la carga del viento en ráfaga cuasi-estática, el coeficiente de exposición,  $c_e(z)$ , se determina de acuerdo a la expresión (5.3.12), en base al Eurocódigo <sup>[12]</sup>, para un coeficiente topográfico  $c_t = 1$  (terreno llano) y considerando un tipo de zona I (mar abierto, lagos y campo abierto llano):

<sup>[12]</sup> Eurocódigo 1. (2007). *Acciones en estructuras. Parte 1-4: Acciones generales. Acciones de viento.*

$$c_e(z) = c_r^2(z) \left[ 1 + \frac{7 k_T}{c_r(z)} \right] \quad (5.3.12)$$

donde,

$k_T$ , es el factor del terreno;

$c_r(z)$ , es coeficiente de rugosidad;

El coeficiente de rugosidad,  $c_r(z)$ , a una altura  $z$  acotada se define mediante la siguiente ley logarítmica:

$$c_r(z) = k_T \cdot \ln \left( \frac{z}{z_0} \right) \quad \text{para } z_{\min} \leq z \leq 200 \text{ m} \quad (5.3.13)$$

$$c_r(z) = c_r(z_{\min}) \quad \text{para } z \leq z_{\min}$$

donde,

$z_0$ , es la longitud de rugosidad;

$z_{\min}$ , es la altura mínima.

Estos parámetros dependen de la categoría del terreno según la tabla 5.3-1, de tal forma que para el tipo de zona I considerada, (mar abierto, lagos y campo abierto llano), los parámetros anteriores según Eurocódigo <sup>[13]</sup> son:

$$k_T = 0,17; \quad z_0 = 0,01\text{m}; \quad z_{\min} = 2 \text{ m}$$

Categoría del terreno	$k_T$	$z_0$ [m]	$z_{\min}$ [m]	$e$
I Mar abierto, lagos de al menos 5 km de <i>fetch</i> en la dirección del viento, terreno llano sin obstáculos	0,17	0,01	2	[0,13]
II Granjas con setos, pequeñas estructuras agrarias ocasionales, casas o árboles	0,19	0,05	4	[0,26]
III Áreas suburbanas o industriales, bosques permanentes	0,22	0,3	8	[0,37]
IV Áreas urbanas con al menos el 15% de su superficie cubierta con edificios de altura media mayor de 15 m	0,24	1	16	[0,46]

Tabla 5.3-1. Parámetros de modelización del viento en función de la categoría del terreno según [Eurocódigo 1. Parte 1-4].

### 5.3.5 Método simplificado y efectos dinámicos del exceso de esbeltez

Dado que los edificios analizados no superan los 200 m de altura y, por lo tanto, están dentro de la capa límite atmosférica o zona de influencia de la superficie terrestre, se calcularán las cargas estáticas equivalentes del viento según el método simplificado del Eurocódigo <sup>[13]</sup>, para estructuras no susceptibles a la excitación dinámica, como se ha expuesto en el apartado 5.3.2. No obstante, cuando analizamos edificios en altura y por lo tanto bajo cargas de viento atmosférico, el flujo es turbulento (velocidad del aire no constante ni en el tiempo ni en el espacio), de

<sup>[13]</sup> Eurocódigo 1. (2007). *Acciones en estructuras. Parte 1-4: Acciones generales. Acciones de viento.*

forma que se considera la variación del viento con la altura según la rugosidad del terreno.

Considerando que la presión media de una corriente fluctuante es mayor que la presión correspondiente a la velocidad media, es necesario definir el efecto de la turbulencia en las cargas estáticas de presión, de forma que se debe determinar la presión dinámica de cálculo en función de la rugosidad local y de la altura.

Este aspecto es muy importante, ya que es necesario considerar la turbulencia en las cargas estáticas, especialmente en las estructuras de mayor esbeltez (levemente dinámicas  $\omega_0 \leq 5$  Hz). En este caso se utilizará el método simplificado, pero será necesario aplicar el factor estructural  $c_s c_d$ , que depende del tipo de estructura (acero, hormigón, etc.) y de la esbeltez del edificio. Dicho factor se puede separar en un factor de escala  $c_s$ , que tiene en cuenta en las acciones del viento el efecto dinámico mediante un coeficiente dinámico  $c_d$ , considerando así la amplificación dinámica producido por las vibraciones de la estructura debidas a las turbulencias [14].

El factor estructural se aplica sobre las cargas estáticas equivalentes calculadas con el método simplificado utilizado para edificios de una altura inferior a 200 m, considerando, así, el aumento de los desplazamientos estáticos producidos por la vibración libre del edificio como respuesta, en el caso que nos ocupa, a la acción dinámica del viento [15][16]. Los valores del factor estructural para estructura metálica y estructura de hormigón de base rectangular se muestran en las figuras 5.3-2 y 5.3-3, respectivamente.

En ambas figuras 5.3-2 y 5.3-3 se aprecia que para edificios altos, o sensibles a los efectos dinámicos, el coeficiente dinámico está comprendido entre 1 y 1,2 ( $1 < c_d < 1,2$ ) [16], aumentando las cargas estáticas del viento, siendo aconsejable realizar un cálculo de la estructura con mayor precisión para obtener las frecuencias propias de vibración de dicha estructura.

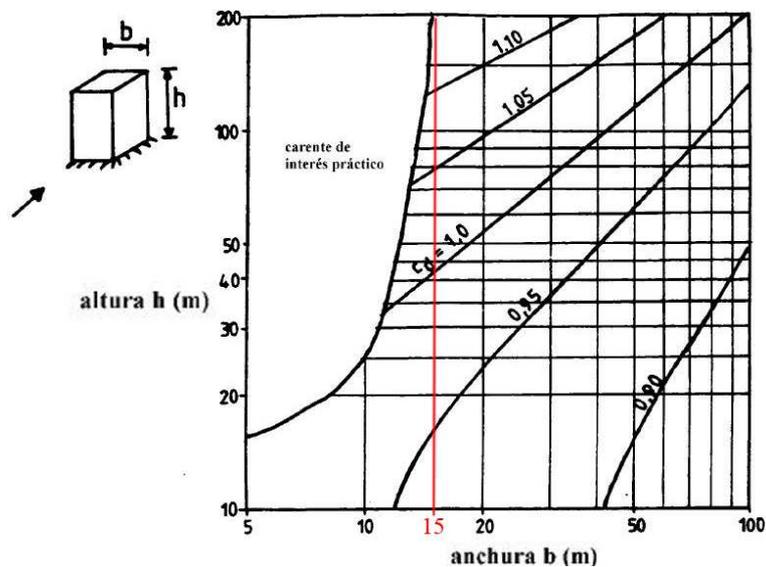


Figura 5.3-2. Coeficiente dinámico  $c_d$ , para edificios de estructura metálica, para una velocidad básica de referencia de 28 m/s, categoría del terreno I,  $\delta_a=0$  y  $\delta_s=0,045n_1 \geq 0,05$  según [Eurocódigo 1. Parte 1-4].

[14] Eurocódigo 1. (2007). *Acciones en estructuras. Parte 1-4: Acciones generales. Acciones de viento*, p. 28.

[15] Cobreros Vime, M.A. (2002). *Tipologías estructurales de edificios en altura*, p. 16.

[16] Gómez Hermoso, J.; et al. (2013). *Proyecto de edificios altos*, pp. 209 y 210.

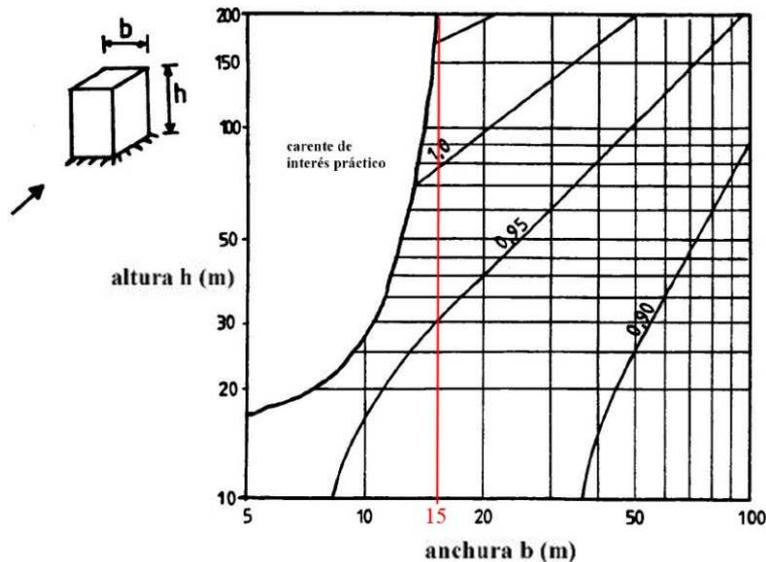


Figura 5.3-3. Coeficiente dinámico  $c_d$ , para edificios de estructura mixta, para una velocidad básica de referencia de 28 m/s, categoría de del terreno I,  $\delta_a=0$  y  $\delta_s=0,08n_1 \geq 0,08$  según [Eurocódigo 1. Parte 1-4]).

La representación de la presión del viento de los edificios analizados mediante el coeficiente dinámico, dependerá de la rigidez de éstos frente a la vibración resonante provocada por la acción del viento. Además, dado que las estructuras de los edificios en altura pueden sufrir un fenómeno de inestabilidad cuando la deformación de dicho edificio provoca un aumento de las acciones dinámicas del viento, es necesario conocer que edificios son sensibles a los fenómenos dinámicos del viento. La evolución de este fenómeno se estima mediante el cálculo de las frecuencias propias y los modos de vibración de los modelos estructurales estudiados durante el proceso de vibración libre, en concreto: el primer modo de oscilación a flexión en el plano paralelo o perpendicular a la dirección del viento, o a torsión sobre el eje vertical del edificio, para determinar si se aproximan a los periodos o frecuencias de fluctuación de la acción del viento. Cuanto mayor sea la inercia y la rigidez torsional del edificio, menor será la afectación de los efectos dinámicos, mientras que cuanto más esbelto sea el edificio en el plano perpendicular al viento mayor será la afectación producida por las turbulencias formadas en los planos paralelos al viento <sup>[17]</sup>, como se infiere de la figura 5.3-4.

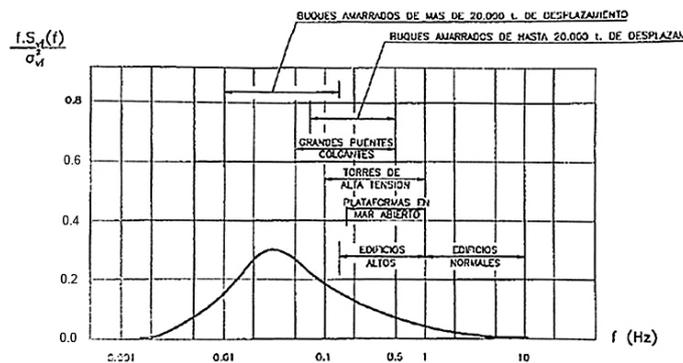


Figura 5.3-4. Rangos de sensibilidad de distintas construcciones, en función de la frecuencia propia de vibración, a los efectos dinámicos inducidos por el viento, [ROM 0.4-95. Parte 3 1995]. (Imagen tomada de [Gómez Hermoso 2013, 208]).

[17] Gómez Hermoso, J.; et al. (2013). *Proyecto de edificios altos*, p. 207.

En ningún caso se analizan edificios con una esbeltez y una tipología estructural, que definen la rigidez estructural, para los cuales el coeficiente dinámico,  $c_d$ , supere el valor 1,2. De la misma manera tampoco se considerarán edificios con una frecuencia propia o natural de vibración inferior a 1 Hz, donde la respuesta a resonancia es significativa, correspondiente a edificios flexibles o poco rígidos con oscilaciones amplias <sup>[18][19][20]</sup>. En caso contrario se deberá aplicar el método detallado para calcular las cargas de viento, no siendo objeto de la Tesis ni el estudio de estructuras susceptibles de excitación ni efectos complejos de los fenómenos aerodinámicos, tal como se indicó en la justificación de este trabajo, si bien conviene especificarlos brevemente: el desprendimiento de torbellinos de “von Karman”, el galope transversal o el bataneo por estela en los edificios analizados, es decir, respectivamente las cuestiones relativas a las fuerzas laterales periódicas que causan vibraciones laterales, la inestabilidad de frecuencia baja producida por la oscilación lateral de la estructura, y el efecto de aumento de la turbulencia por la estela de edificios cercanos <sup>[19][21][22]</sup>.

Su tratamiento será básicamente normativo siendo de utilidad los criterios de proporción que establece el Eurocódigo <sup>[21]</sup>, en base a las dimensiones en planta y altura del edificio.

Los coeficientes eólicos en edificios en altura, prismáticos y de planta rectangular, de acuerdo al Eurocódigo <sup>[21]</sup>, se indican en la tabla 5.3-2:

	Esbeltez menor planos vertical y horizontal paralelos al viento ( $z_e/d$ )			
	> 4,0	2,0	1,33	≤ 1,0
$C_p$ (presión)	0,60	0,73	0,78	0,80
$C_s$ (succión)	-0,3	-0,3	-0,3	-0,3

Tabla 5.3-2. Coeficientes eólicos

donde,

$d$ , es la dimensión de base del edificio en el plano paralelo al viento;  
 $z_e$ , es la altura de referencia, la menor entre H (altura del edificio) y B (base del edificio en el plano perpendicular al viento).

En este sentido es adecuado mencionar las estructuras en tubo de base circular, ya que edificios con geometrías o cuerpos romos (no fuseladas o no aerodinámicas), de planta circular u otras curvas (formas ovaladas, elípticas, etc.), configuran una categoría que requiere un tratamiento específico. Es conveniente realizar ensayos con túnel de viento o túnel aerodinámico para determinar los coeficientes eólicos en cada zona de la superficie de la estructura y/o fachada. Este aspecto no es objeto de estudio en el presente comparativo, si bien también puede considerarse una perspectiva de desarrollo, como una consecuencia propia de las conclusiones.

[18] Cobreros Vime, M.A. (2002). *Tipologías estructurales de edificios en altura*, p. 16.

[19] Gómez Hermoso, J.; et al. (2013). *Proyecto de edificios altos*, pp. 117, 118, 125 y 210.

[20] Holmes, J.D. (2007). *Wind loading of structures*, p. 103.

[21] Eurocódigo 1. (2007). *Acciones en estructuras. Parte 1-4: Acciones generales. Acciones de viento*, p. 30 y apartado 9.3.

[22] Meseguer, J.; Sanz Andrés, A.; Pindado, S.; Franchini, S.; Alonso, G. (2013). *Aerodinámica civil. Efectos del viento en edificaciones y estructuras*, pp. 166, 182 y 220.

En el caso del análisis de los edificios en altura de base circular, de acuerdo a las recomendaciones de Gómez <sup>[23]</sup>, se toman los coeficientes de las tablas anteriores considerando como base el diámetro del cilindro/polígono.

### 5.3.6 Combinación de acciones

De acuerdo al Código Técnico de la Edificación (CTE), para Estado Límite de Servicio, se toman las siguientes combinaciones de acciones:

- **Combinación característica.** Se analizarán los efectos producidos por las acciones de corta duración y que puedan resultar irreversibles, de acuerdo a la expresión:

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \Psi_{0,i} \cdot Q_{k,i} \quad (5.3.14)$$

- **Combinación frecuente.** Se analizarán los efectos producidos por las acciones de corta duración y que pueden resultar reversibles, de acuerdo a la expresión:

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + \Psi_{1,1} \cdot Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \Psi_{2,i} \cdot Q_{k,i} \quad (5.3.15)$$

- **Combinación cuasi permanente.** Se analizarán los efectos producidos por las acciones de larga duración, de acuerdo a la expresión:

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + \sum_{i > 1} \Psi_{2,i} \cdot Q_{k,i} \quad (5.3.16)$$

donde,

$G_{k,j}$	Valor característico de las acciones permanentes.
$Q_{k,1}$	Valor característico de la acción variable determinante.
$\Psi_{0,i} \cdot Q_{k,i}$	Valor representativo de combinación de las acciones variables concomitantes.
$\Psi_{1,1} \cdot Q_{k,1}$	Valor representativo frecuente de la acción variable determinante.
$\Psi_{2,i} \cdot Q_{k,i}$	Valores representativos cuasi permanentes de las acciones variables con la acción determinante o con la acción accidental.
$A_k$	Valor característico de la acción accidental.

### 5.3.7 Limitaciones de desplazamientos

Al tratarse de un estudio sobre el comportamiento global de la estructura frente a fuerzas horizontales, el parámetro analizado ha sido el desplazamiento horizontal en la parte superior del edificio bajo el efecto de dichas cargas. Atendiendo a las limitaciones especificadas en el Código Técnico de la Edificación (CTE) y las

<sup>[23]</sup> Gómez Hermoso, J.; et al. (2013). *Proyecto de edificios altos*, p. 205.

combinaciones a emplear, se puede especificar en forma tabulada, según la tabla 5.3-3:

	Combinación	Desplome total	Desplome local
Integridad elementos	Característica	1/500	1/250
Apariencia edificio	Cuasi permanente	-	1/250

Tabla 5.3-3. Limitaciones de desplome según [CTE 2006].

Además del desplome total, también se ha comprobado el desplome local para la integridad de los elementos constructivos y para la apariencia del edificio con las combinaciones característica, y cuasi permanente respectivamente, de acuerdo al Código Técnico de la Edificación (ya que se requiere un análisis de otras normativas al respecto, que no son objeto de este Tesis dada su variedad).

La limitación de los desplazamientos horizontales elásticos de las estructuras se debe a la magnificación del momento de vuelco que provocan estos desplazamientos, como se trata a continuación. Existe una cuestión adicional del mismo tipo pero a nivel de planta. El desplazamiento relativo entre cabeza y pie de un pilar se limita, para evitar el pandeo local del pilar, como refiere Cobrerros <sup>[24]</sup>.

### 5.3.8 Perfiles utilizados

Los perfiles utilizados para las mallas analizadas son perfiles tubulares de sección cuadrada de la serie europea de perfiles, eligiendo el perfil de menor peso que cumpla con las condiciones de dimensionado correcto para estados límite últimos (ELU) y que dé una respuesta satisfactoria al cumplimiento de la normativa para estados límite de servicio (ELS).

<sup>[24]</sup> Cobrerros Vime, M.A. (2002). *Tipologías estructurales de edificios en altura*, p. 38.

## 5.4 Análisis de los modelos

Cuando analizamos modelos estructurales de edificios en altura, como se ha argumentado anteriormente, es fundamental tener en cuenta los efectos dinámicos del viento, ya que esta tipología de edificio es muy sensible ante este tipo de carga. Bajo esta acción, los edificios esbeltos se exponen a cargas dinámicas en la dirección del viento y en la dirección perpendicular a él, considerando asimismo, los movimientos torsionales, como se muestra en la figura 5.4.1.

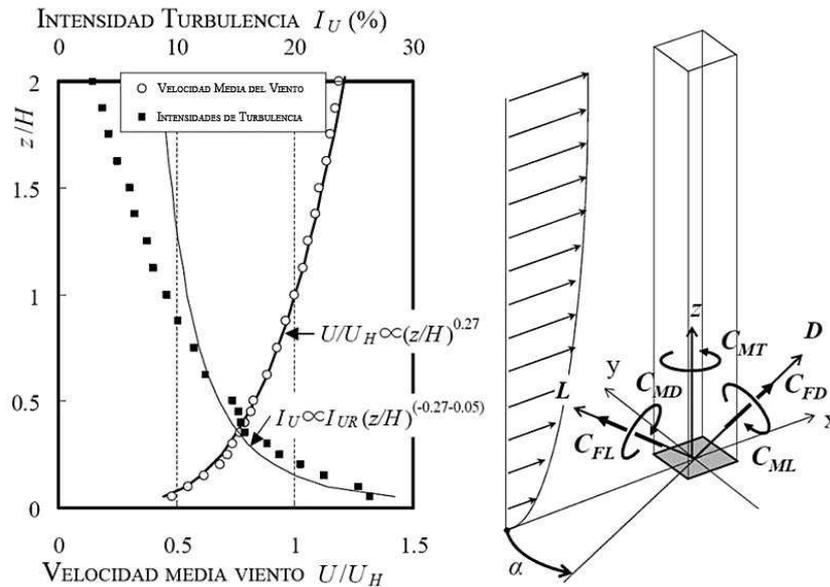


Figura 5.4-1. Fuerzas, momentos y turbulencias resultantes del viento. (Notación adaptada de [Tamura et al. 2010, 3105]).

Las cargas de viento se han determinado mediante el método simplificado de Cargas Estáticas Equivalentes, aplicando el coeficiente aerodinámico en los casos que así lo han requerido de acuerdo a las condiciones descritas en el apartado 5.3.5. Las frecuencias y modos de vibración de las estructuras se deben calcular para determinar la rigidez de las estructuras para evitar la vibración resonante provocada por el viento. Este punto es fundamental, dado que es necesario para determinar las cargas de viento mediante el método simplificado en aquellas estructuras cuyas propiedades estructurales no las hacen susceptibles a la excitación dinámica. En las estructuras levemente dinámicas ( $1 \text{ Hz} < \omega_0 \leq 5 \text{ Hz}$ ), se utilizará adicionalmente el factor estructural  $c_s c_d$ , descrito anteriormente.

De acuerdo a las bases de cálculo anteriormente descritas, se analizan 808 modelos en tres dimensiones, de los cuales 414 corresponden a modelos con geometrías de mallas uniformes convencionales y los 394 restantes a mallas de las posibles geometrías optimizadas según lo expuesto en el apartado 5.2.2.

### 5.4.1 Análisis multimodal espectral no lineal P-Delta (P- $\Delta$ ) y factor de magnificación del momento de vuelco

El análisis de los distintos modelos estructurales se realizará con un análisis multimodal no lineal P-Delta (P- $\Delta$ ). Esto se debe a que se considera la no linealidad geométrica de los modelos analizados, tal y como especifica la normativa utilizada,

para así considerar los efectos de segundo orden derivados del desplazamiento horizontal en la coronación del edificio, efecto de las cargas horizontales, que produce el efecto suplementario P- $\Delta$ , bajo las cargas muertas y variables que desde un punto de vista global producen el incremento del momento de vuelco (momento de vuelco de segundo orden), al aumentar la excentricidad de dichas cargas verticales, como se muestra en la figura 5.4-2, y frente al cual cada tipología estructural ofrece un mejor comportamiento global en función de su rigidez respecto a este fenómeno. Para considerar este efecto o inestabilidad, se realiza el análisis dinámico de los modelos estudiados con el programa de cálculo SAP 2000, versión 15, que permite todas las opciones de cálculo anteriormente descritas, de acuerdo al modelo de cortantes en su método general, que establece la norma utilizada, basado en el método de superposición modal <sup>[1]</sup>.

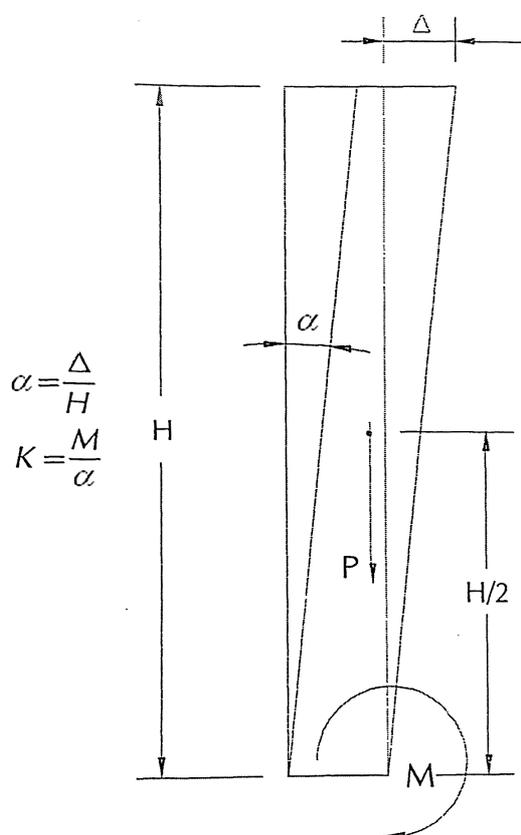


Figura 5.4-2. Desplazamiento horizontal en la coronación del edificio.  
(Imagen adaptada de [Cobrerros 2002, 11]).

Cabe destacar que en el análisis no lineal P- $\Delta$  realizado no se consideran la inestabilidad producida por las imperfecciones de carga, orientación del viento o intrínsecas del material (no linealidad mecánica), así como las imperfecciones geométricas como son el desplome inicial del edificio durante el montaje o la curvatura de la estructura, ya que las fuerzas horizontales equivalentes en base a dichos defectos se pueden despreciar al ser sus valores relativamente pequeños en comparación con la carga dominante del viento, considerándose así únicamente el efecto suplementario P- $\Delta$ , expuesto anteriormente, por el desplazamiento en la coronación producido por las cargas horizontales.

<sup>[1]</sup> Cobrerros Vime, M.A. (2002). *Tipologías estructurales de edificios en altura*, p. 40.

De acuerdo al esquema de la figura 5.4-2, se puede determinar con un grado de precisión viable la rigidez de la estructura  $K$ , de acuerdo a la siguiente relación:

$$K = \frac{M}{\alpha} \quad (5.4.1)$$

donde,

$M$ , es el momento de vuelco;

$\alpha$ , distorsión angular para un valor de  $\alpha = \Delta/H$ ; de acuerdo con el desplazamiento horizontal inicial en la coronación  $\Delta$ , y la altura  $H$ , del edificio.

Para considerar el efecto  $P-\Delta$  se utiliza, en el análisis previo, el factor de magnificación,  $r_M$ , que mejora el momento inicial, y toma el siguiente valor de acuerdo a la figura 5.4-2:

$$r_M = \frac{P \cdot H/2}{K} \quad (5.4.2)$$

donde,

$P$ ,  $H$ ,  $K$ , son el peso, la altura y la rigidez de les estructura, respectivamente.

Dicho factor, comprendido obviamente entre  $0 < r_M \leq 1$ , el cual se sitúa normalmente de forma razonable en torno al 10% [2], se puede determinar considerando la rigidez  $K$ , constante, de forma que se establece la proporcionalidad entre los sucesivos incrementos de momento respecto al incremento anterior, obteniéndose mediante la suma geométrica de una serie respecto al momento inicial  $M$ , relación que responde a la siguiente hipótesis:

$$r_M = \frac{M_1}{M} = \frac{M_2}{M_1} = \frac{M_3}{M_2} \quad (5.4.3)$$

donde,  $M_1 = P \cdot \Delta/2$ ;  $M_2 = P \cdot \Delta_1/2$ ; ...

Admitiendo la hipótesis dinámica evolutiva  $M_i/M_{i-1} = r_M$ , para rigidez  $K$ , constante y  $P$  en  $H/2$ , se garantiza que se produzca una evolución estrictamente monótona, lo que corresponde a una serie geométrica finita convergente, (por las imperfecciones anteriormente descritas), de razón  $r_M$ , tal que el momento final  $M_F$  resultante responde a:

$$M_F = M(1 + r_M + r_M^2 + \dots) = M \sum_i^n r_M^{i-1} \quad (5.4.4)$$

y por lo tanto, operando para  $n = 1, 2, 3, \dots$ , se obtiene la siguiente expresión:

---

[2] Cobreros Vime, M.A. (2002). *Tipologías estructurales de edificios en altura*, p. 10.

$$M_F = \frac{M}{1 - r_M} \quad (5.4.5)$$

donde  $r_M$  atiende a (5.4.2).

Quedando demostrado en base a la expresión (5.4.5), que para un factor de magnificación  $r_M$ , próximo a la unidad se produce una inestabilidad o pandeo global de la estructura, como indica Cobreros<sup>[3]</sup>.

El análisis multimodal permite determinar las frecuencias naturales y los modos de vibración de una estructura durante el proceso de vibración libre de los edificios analizados. Para el caso de un estudio de los problemas de un material elástico que se rige por las leyes de elasticidad de Hooke, la ecuación generalizada de movimiento así descrita, de forma conjunta, responde en forma matricial a la siguiente expresión:

$$M\ddot{x}(t) + C\dot{x}(t) + Kx(t) = f(t) \quad (5.4.6)$$

donde,

$M$ ,  $C$ ,  $K$ , son respectivamente las matrices de masa, de amortiguamiento y de rigidez de la estructura.

$\ddot{x}$ ,  $\dot{x}$ ,  $x$ , son los vectores que representan respectivamente la aceleración, la velocidad y la posición de un conjunto de puntos de la estructura.

Se considera, tal como se ha precisado en el anterior apartado, el movimiento de la estructura en ausencia de excitación así como de amortiguación, la cual se puede establecer en un porcentaje del 1% con respecto a la amortiguación crítica en el caso de estructuras de acero<sup>[3]</sup>, resultando la ecuación (5.4.6) anteriormente descrita, en este caso:

$$M\ddot{x}(t) + Kx(t) = 0 \quad (5.4.7)$$

La solución de la ecuación (5.4.7) es de tipo armónico  $x = A \text{ sen } (\omega t + \alpha)$ , y el equilibrio dinámico es el resultado de considerar las fuerzas estáticas y las fuerzas de inercia. Para el estudio de la frecuencia se considera el sistema en proceso de vibración libre<sup>[3]</sup>, y su valor responde, a:

$$\omega = \sqrt{K/M} \quad (5.4.8)$$

donde;

$K$ , es la rigidez de la estructura;

$M$ , es la masa de la estructura;

$\omega$ ,  $\alpha$ , son la frecuencia angular y el ángulo de desfase (frecuencia inicial previa);

---

[3] Cobreros Vime, M.A. (2002). *Tipologías estructurales de edificios en altura*, pp. 11, 16, 17 y 38.

La importancia de la frecuencia de una estructura  $\omega$ , la cual está en relación directa con la raíz de la rigidez y en relación inversa con la raíz de la masa (ecuación (5.4.8)), reside en que es un indicador del comportamiento dinámico de dicha estructura, tal y como lo es la rigidez para el comportamiento estático.

El análisis realizado dará respuesta a las siguientes condiciones en cuanto al número de modos a considerar, como establece la normativa sismorresistente del Eurocódigo <sup>[4]</sup>, y que tomaremos de referencia para el estudio desarrollado:

- Al tratarse de un estudio de edificios en altura, y por lo tanto esbeltos, se analizarán, además del primer modo de vibración (el mayor), todos los modos correspondientes a los períodos significativos necesarios para que el Factor de Participación Modal, el cual representa el porcentaje de masa movilizada, refleje un porcentaje mínimo del 90% de la masa total de la estructura, durante el proceso de vibración libre.
- Se analizarán todos los modos de vibración con una masa modal efectiva superior al 5% del total de la masa tomada.

#### 5.4.2 Factor de Participación Modal

El Factor de Participación Modal, PF, representa el porcentaje de masa movilizada para cada modo de vibración, de forma que nos da una idea de la importancia de cada modo de vibración y de cuáles de ellos no son determinantes. Dicho factor se determina mediante la siguiente expresión (5.4.9):

$$PF = \left[ \frac{\sum_{N_i=1} \frac{(w_i \cdot \phi_i)}{g}}{\sum_{N_i=1} \frac{(w_i \cdot \phi_i^2)}{g}} \right] \quad (5.4.9)$$

donde,

PF, es el factor de participación modal;

$w_i$ , peso del nivel o de la planta  $i$ ;

$\phi_i$ , es el vector de forma modal para el nivel de la planta  $i$ ;

$g$ , aceleración de la gravedad.

En el caso de modelos espaciales como los analizados en el presente estudio, se verificarán dichas condiciones en cada una de las direcciones relevantes, de acuerdo a la expresión (5.4.9).

#### 5.4.3 Evaluación del rendimiento estructural global

Para realizar el comparativo entre los modelos convencionales y los modelos optimizados, es necesario determinar el rendimiento estructural global  $R_g$ , de cada estructura analizada de acuerdo a la expresión formulada considerando el concepto

<sup>[4]</sup> Eurocódigo 8. (2011). *Proyecto de estructuras sismorresistentes. Parte 1: Reglas generales, acciones sísmicas y reglas para edificación*

expuesto por Estévez y Martín <sup>[5][6]</sup>, tratado en el capítulo 2, que determina el rendimiento global de una estructura de acuerdo a las deformaciones máximas (en este caso desplazamientos horizontales) y el peso propio de la estructura, para un determinado estado de cargas  $Q$ , y una altura  $H$ , que atiende a la expresión (2.4.21) con  $L=H$ ,

$$R_g = \beta \cdot \frac{Q \cdot H}{\delta \cdot P_e} \quad (5.4.10)$$

donde,

$\beta$ , es el coeficiente constante de ajuste a la escala de ordenadas;

$Q$ , es la carga horizontal total soportada;

$H$ , es la altura del edificio estudiado;

$\delta$ , es el desplazamiento horizontal máximo en la coronación del edificio;

$P_e$ , es el peso propio de la estructura envolvente.

Este valor del rendimiento estructural global se optimizará cuando el producto  $\delta \cdot P_e$  sea menor.

El estudio del rendimiento estructural de los modelos  $R_g$ , se ha realizado comparando los desplazamientos horizontales en la coronación de los edificios para estados límite de servicio (ELS). Asimismo, se han comprobado tensionalmente todas las barras para estados límite últimos (ELU), considerando los efectos de segundo orden a nivel barra y a nivel sección, (incluidas las características geométricas y mecánicas de las secciones reducidas de los perfiles de sección clase 4).

---

[5] Estévez Cimadevila, F.J.; Martín Gutiérrez, E. (2002). *Influencia de los parámetros de diseño en el rendimiento estructural de vigas de celosía*.

[6] Estévez Cimadevila, F.J.; Martín Gutiérrez, E. (2003). *Análisis del rendimiento estructural de vigas Vierendeel*.

## 5.5 Estudios básicos previos de geometrías de malla con modelos 2D

En el presente epígrafe se realizan dos estudios comparativos de rendimiento estructural con modelos de mallas analizadas en 2D, para obtener una primera aproximación del rendimiento estructural en base a los parámetros de diseño de las distintas triangulaciones que componen dichas mallas. Para ello, se comparan los resultados de las geometrías de mallas convencionales con los resultados de las correspondientes posibles geometrías de malla optimizadas, de acuerdo a la trayectoria de las líneas isostáticas del elemento resistente vertical en voladizo equivalente, tal y como se describe en la metodología propuesta, según 5.2.

La relevancia de los estudios básicos previos, que se realizan a continuación, reside en que permiten obtener resultados válidos para la toma de decisiones acerca de los parámetros de diseño de las mallas como son, por ejemplo, la inclinación de las barras, la densidad y la geometría base de las mallas en alzado, antes de implementar la metodología de trabajo propuesta para el análisis de estructuras de mayor complejidad, las estructuras espaciales, utilizadas como sistemas resistentes envolventes de edificios en altura (modelos en 3D).

Asimismo, en base a los comparativos básicos entre los resultados de las geometrías convencionales y las posibles geometrías optimizadas en 2D, se descartarán aquellas geometrías y/o parámetros de diseño, para los cuales no se obtengan resultados significativos o relevantes para el estudio de la temática que se desarrolla en la presente Tesis.

Los estudios en 2D en base a las distintas geometrías, resultan relevantes a tenor de las conclusiones obtenidas en el segundo capítulo, acerca de la diferencia en el rendimiento de estructuras de entramado con un mismo peso propio y un mismo estado de cargas, de acuerdo a la disposición de las barras, identificando, o no, las direcciones principales del elemento resistente equivalente de alma llena. Las geometrías de la figura 5.5-1 son un ejemplo de mallas con una mismo número de barras pero con rendimientos y comportamientos globales muy distintos, como se verá posteriormente.

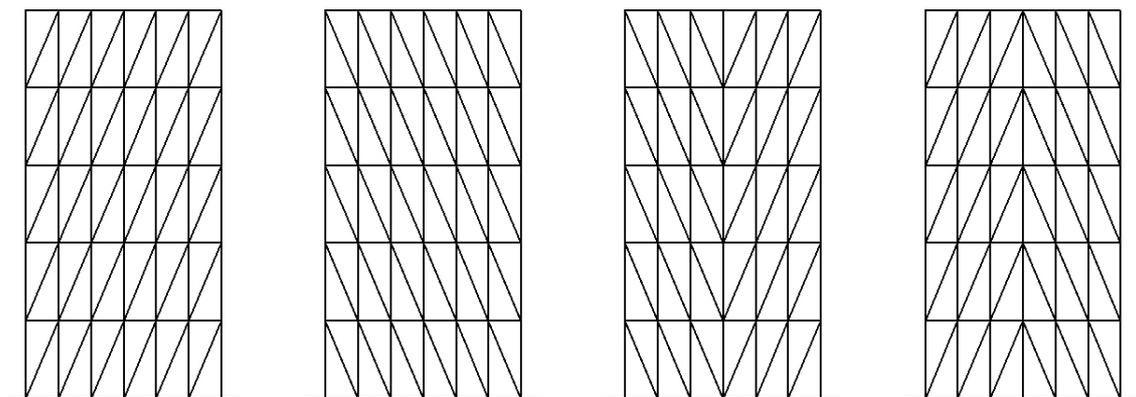


Figura 5.5-1. Geometrías de mallas para un mismo peso propio, pero con disposiciones de barras distintas.

### 5.5.1 Estudio comparativo de mallas según la inclinación de las barras

El primer estudio básico en base al rendimiento estructural global, con 20 modelos de mallas en 2D, se realiza de acuerdo a las consideraciones que se describen a

continuación, para determinar de éste modo que inclinaciones de barras son más adecuadas:

- Se modelizan cinco tipos de mallas con las siguientes inclinaciones de las barras con respecto la línea horizontal: 80°, 70°, 60°, 45° y 30° aproximadamente, como se muestra en la figura 5.5-2.
- Se consideran las siguientes alturas H: 45, 90, 135 y 180 m, para una base de 30 m, que permite una modulación adecuada para obtener las inclinaciones deseadas de las barras.
- La separación entre plantas es la misma en todas las mallas.
- Se consideran todas las barras de la misma sección en todo el alzado de cada malla para dar cumplimiento a ELS y ELU.
- Comprobación de las estructuras sin limitación de deformación, estableciendo el rendimiento estructural global de acuerdo al apartado 5.4.3.

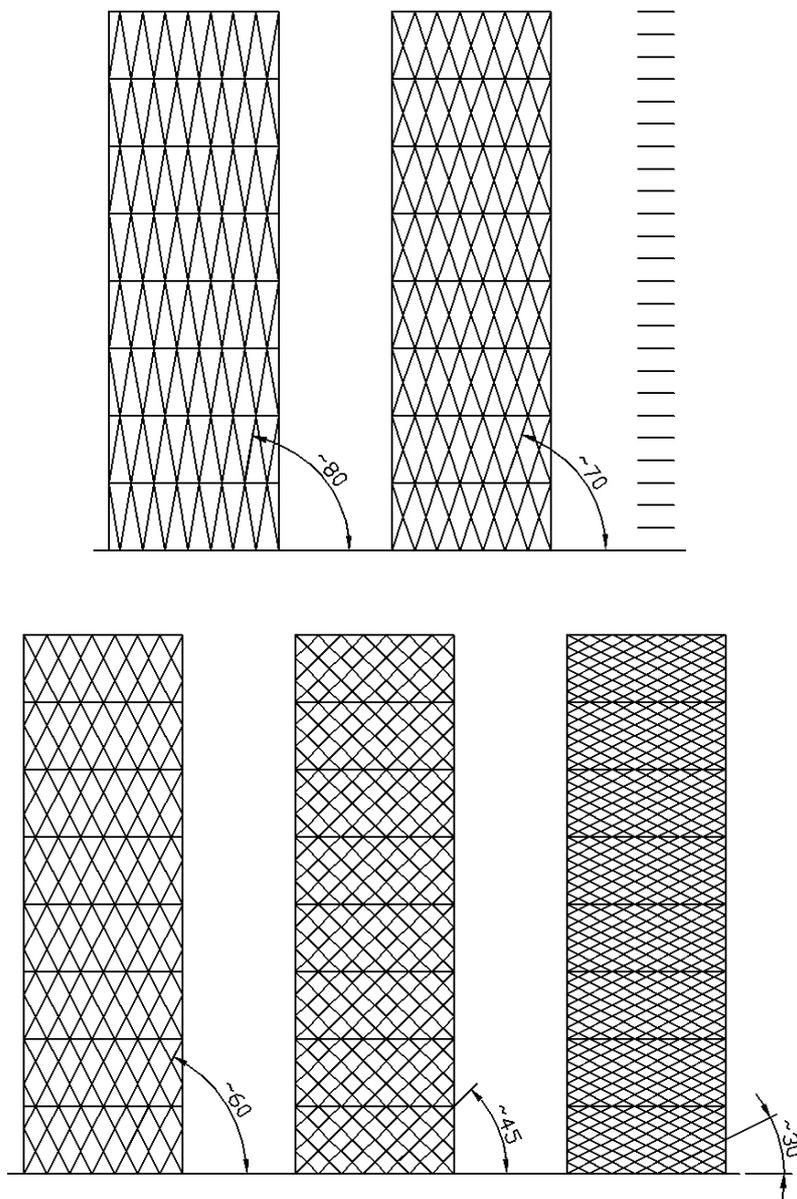


Figura 5.5-2. Geometría de las mallas (H/B=3) para distintas inclinaciones de barras de 80°, 70°, 60°, 45° y 30°, aproximadamente.

En la tabla 5.5-1 y la figura 5.5-3 se muestran los resultados de rendimiento estructural de cada geometría de malla para distintas inclinaciones de barras con respecto a la línea horizontal (80°, 70°, 60°, 45° y 30°), para las distintas esbelteces geométricas consideradas de acuerdo a las alturas de 45, 90, 135, 180 m, y una base de 30 m. El rendimiento se establece de acuerdo al apartado 5.4.3, donde  $P_e$  es el peso propio de la estructura envolvente.

Modelo	H (m)	$\delta_{\max}$ (cm)	$P_e$ (kN)	$R_g$
Modelo 80°	45	4,069	75,43	2,93
Modelo 70°	45	1,667	77,73	<b>6,95</b>
Modelo 60°	45	1,624	81,38	6,81
Modelo 45°	45	1,964	98,26	4,66
Modelo 30°	45	2,164	145,11	2,87
Modelo 80°	90	11,191	318,5	2,53
Modelo 70°	90	6,985	328,20	<b>3,93</b>
Modelo 60°	90	8,686	343,59	3,02
Modelo 45°	90	12,665	414,86	1,71
Modelo 30°	90	14,520	612,68	1,01
Modelo 80°	135	16,799	1074,94	1,50
Modelo 70°	135	13,279	1107,67	<b>1,84</b>
Modelo 60°	135	17,804	1159,61	1,31
Modelo 45°	135	27,014	1400,20	0,71
Modelo 30°	135	31,322	2067,8	0,42
Modelo 80°	180	24,599	2710,35	1,08
Modelo 70°	180	22,069	2625,60	<b>1,24</b>
Modelo 60°	180	30,226	2748,71	0,87
Modelo 45°	180	46,173	3318,99	0,47
Modelo 30°	180	54,045	4901,45	0,27

Tabla 5.5-1. Comparativo rendimiento global de mallas de distintas inclinaciones de las barras (80°, 70°, 60°, 45° y 30° aproximadamente) y distintas esbelteces geométricas para las alturas 45, 90, 135 y 180 m.

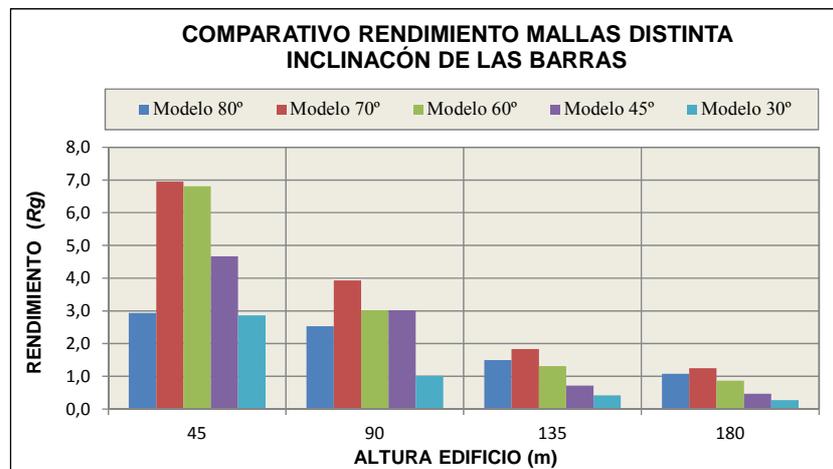


Figura 5.5-3. Comparativo rendimiento global de mallas de distintas inclinaciones de las barras (80°, 70°, 60°, 45° y 30° aproximadamente) y distintas esbelteces geométricas para las alturas 45, 90, 135 y 180 m.

### 5.5.2 Estudio comparativo de mallas según su geometría base

El segundo estudio básico de acuerdo al rendimiento estructural global, con modelos de mallas en 2D, se realiza en base a las consideraciones que se describen a continuación, para determinar de éste modo que geometrías ofrecen mejores resultados:

- Se modelizan dieciséis tipos de triangulaciones distintas, para un total de 128 modelos.
- Se consideran las siguientes alturas H: 45, 90, 135 y 180 m, para una base de 22.5 m, que permite una modulación adecuada para obtener las inclinaciones deseadas de las barras.
- La separación entre plantas es la misma en todas las mallas.
- Se consideran todas las barras de la misma sección en todo el alzado de cada malla para dar cumplimiento a ELS y ELU.
- Comprobación de las estructuras sin limitación de deformación, estableciendo el rendimiento estructural de acuerdo al apartado 5.4.3.

En base al rendimiento estructural, y al porcentaje de optimización obtenidos para cada geometría estudiada en este segundo estudio básico, se determinan las estructuras con un mayor ratio obtenido de acuerdo al producto entre ambos conceptos (ratio = rendimiento estructural \* % optimización).

Las geometrías que ofrezcan un ratio más elevado serán las que se utilizarán para los dos estudios comparativos finales en 3D de mallas espaciales envolventes de edificios en altura para distintas esbelteces geométricas.

En base a las geometrías básicas de triangulaciones mostradas en el apartado 5.2.2, (según Torroja <sup>[1]</sup> y Gómez <sup>[2]</sup>) y tomando también como referencia las geometrías del estudio paramétrico sobre el comportamiento de las fachadas portantes realizado por Bordas y Peiro <sup>[3]</sup>, de acuerdo con la figura 5.5-4, se diseñan las dieciséis geometrías convencionales y optimizadas (indicadas con \*) del presente estudio comparativo de mallas en 2D, como se muestran en las figuras 5.5-5 y 5.5-6.

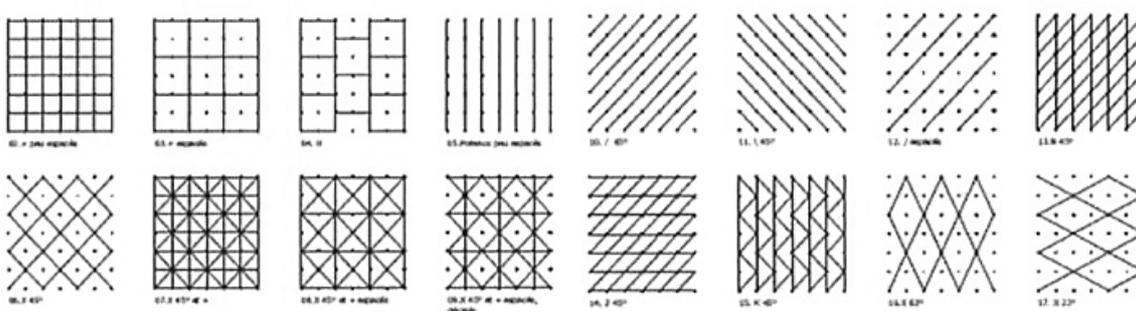


Figura 5.5-4. Geometrías de fachadas para edificios en altura analizadas según [Bordas Geli et al. 2012, 32].

[1] Torroja Miret, E. (2010). *Razón y ser de los tipos estructurales*, p. 85.

[2] Gómez Hermoso, J.; et al. (2013). *Proyecto de edificios altos*, p. 91.

[3] Bordas Geli, A.M.; Peiro Sendra, M. (2012). *Diseño y concepción del contraviento de edificios en altura de hormigón armado. Análisis de dos casos: torre Phare y torre D2*, p. 32.

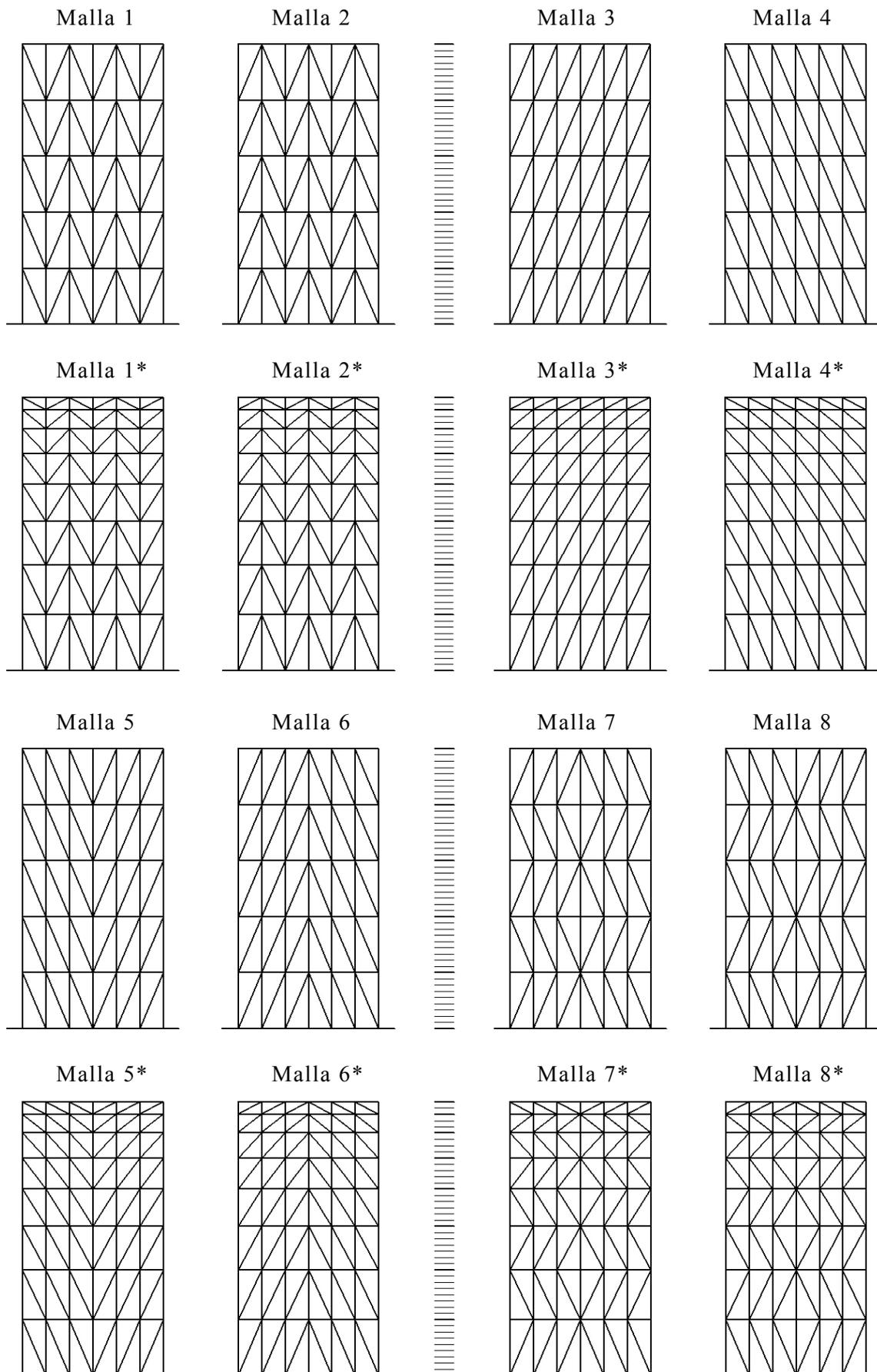


Figura 5.5-5. Geometrías convencionales y optimizadas (indicadas con \*) del segundo estudio básico en dos dimensiones.

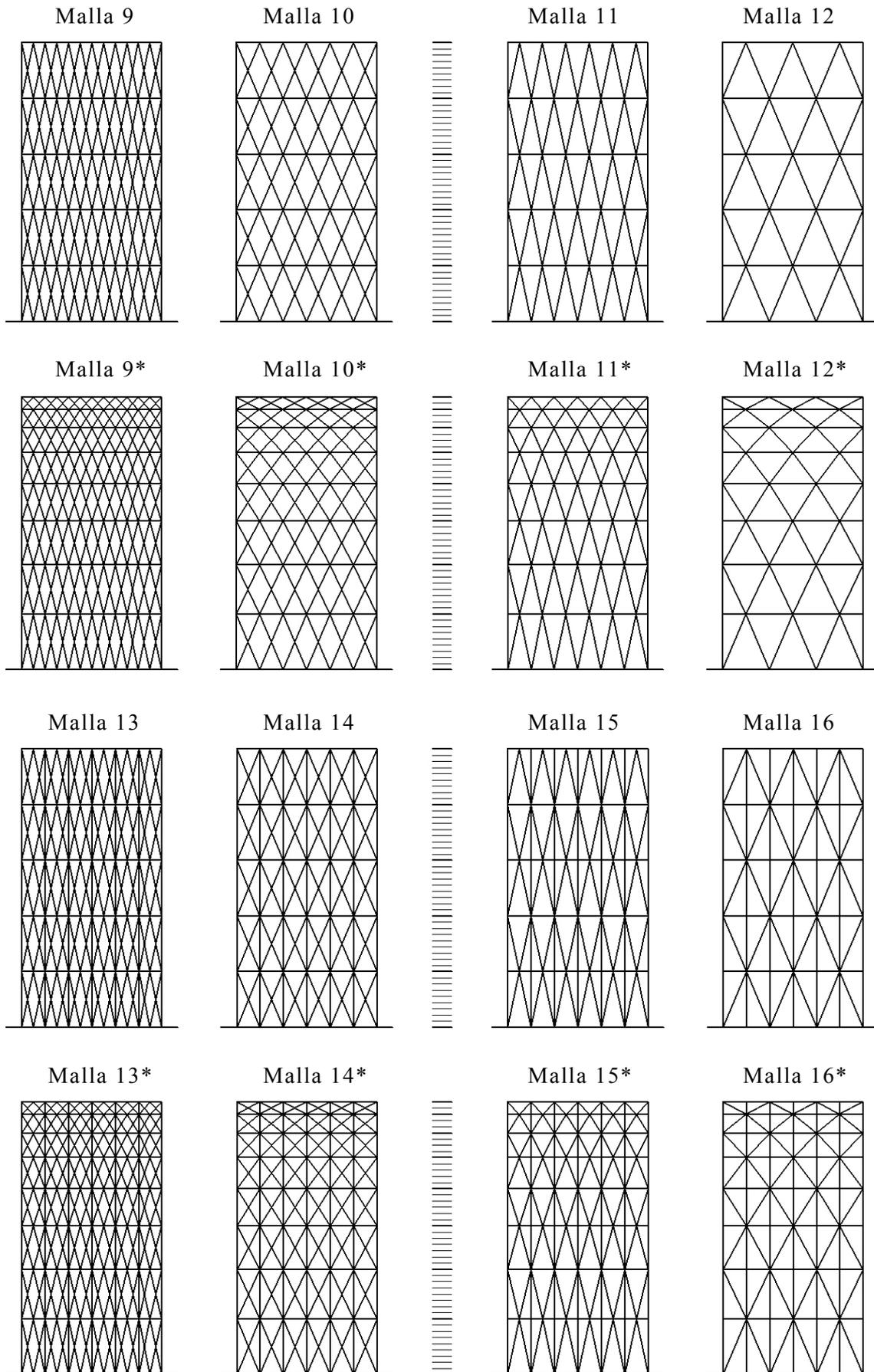


Figura 5.5-6. Geometrías convencionales y optimizadas (indicadas con \*) del segundo estudio básico en dos dimensiones.

En la tabla 5.5-2 se presentan los resultados de los rendimientos estructurales y % de optimización, así como el ratio de las dieciséis geometrías de malla convencionales y sus respectivas geometrías optimizadas (indicadas con \*), para una esbeltez geométrica de dos (H/B=2), de acuerdo a la metodología establecida.

Malla	H (m)	$\delta_{\max}$ (cm)	$P_e$ (kN)	$R_g$	% opt.	Ratio
Malla 1	45	12,25	368,546	4,98	113,41%	5,652
Malla 1*	45	10,36	384,238	5,65		6,410
Malla 2	45	9,86	368,546	6,19	114,15%	7,068
Malla 2*	45	8,29	384,238	7,07		<b>8,068</b>
Malla 3	45	15,81	368,546	3,86	117,88%	4,553
Malla 3*	45	12,86	384,238	4,55		5,368
Malla 4	45	13,42	368,546	4,55	123,90%	5,639
Malla 4*	45	10,39	384,238	5,64		6,986
Malla 5	45	19,29	368,546	3,17	115,21%	3,647
Malla 5*	45	16,06	384,238	3,65		<b>4,202</b>
Malla 6	45	7,61	368,546	8,03	117,27%	9,414
Malla 6*	45	6,22	384,238	9,41		<b>11,041</b>
Malla 7	45	12,53	368,546	4,87	124,30%	6,059
Malla 7*	45	9,67	384,238	6,06		7,531
Malla 8	45	15,91	368,546	3,84	115,08%	4,416
Malla 8*	45	13,26	384,238	4,42		5,082
Malla 9	45	6,83	711,17	4,64	126,09%	5,845
Malla 9*	45	5,32	724,231	5,85		7,371
Malla 10	45	8,19	408,033	7,17	119,23%	8,549
Malla 10*	45	5,90	446,436	8,55		<b>10,193</b>
Malla 11	45	12,50	388,491	4,64	129,54%	6,005
Malla 11*	45	9,50	394,436	6,00		<b>7,779</b>
Malla 12	45	10,66	236,92	8,14	120,72%	9,832
Malla 12*	45	8,96	255,539	9,83		<b>11,870</b>
Malla 13	45	6,68	842,794	4,00	128,20%	5,127
Malla 13*	45	5,15	852,93	5,13		6,573
Malla 14	45	6,07	539,657	6,35	117,78%	7,480
Malla 14*	45	5,23	575,135	7,48		<b>8,810</b>
Malla 15	45	12,14	520,115	3,56	132,49%	4,721
Malla 15*	45	9,11	523,135	4,72		6,255
Malla 16	45	9,59	368,546	6,37	116,95%	7,445
Malla 16*	45	7,87	384,238	7,45		<b>8,708</b>

Tabla 5.5-2. Comparativo de resultados de mallas convencionales y mallas optimizadas (indicadas con \*). Base de 22.5 m de lado y una altura de 45 m (H/B=2).

En la figuras 5.5-7 y 5.5-8 se muestran gráficamente los ratios correspondientes a la tabla 5.5-2 de acuerdo a los rendimientos estructurales y % de optimización de las dieciséis geometrías de malla convencionales y sus respectivas geometrías optimizadas, para una esbeltez geométrica de dos ( $H/B=2$ ), de acuerdo a la metodología establecida.

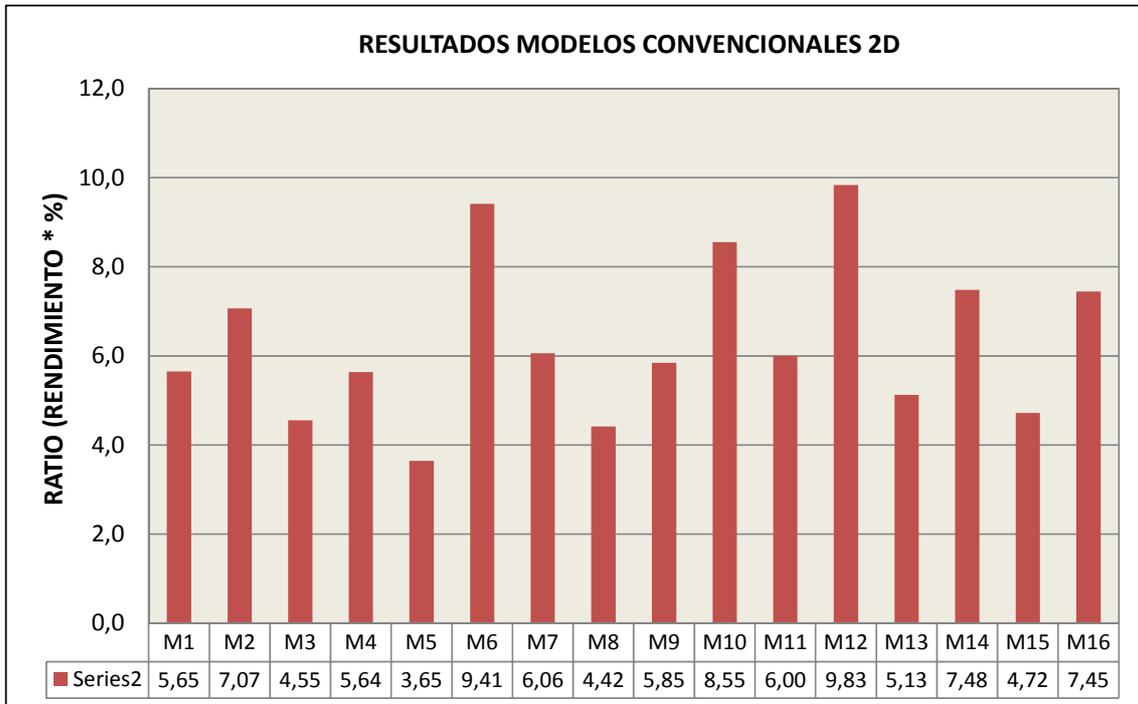


Figura 5.5-7. Comparativo de resultados de mallas en 2D convencionales. Base de 22.5 m de lado y una altura de 45 m ( $H/B=2$ ).

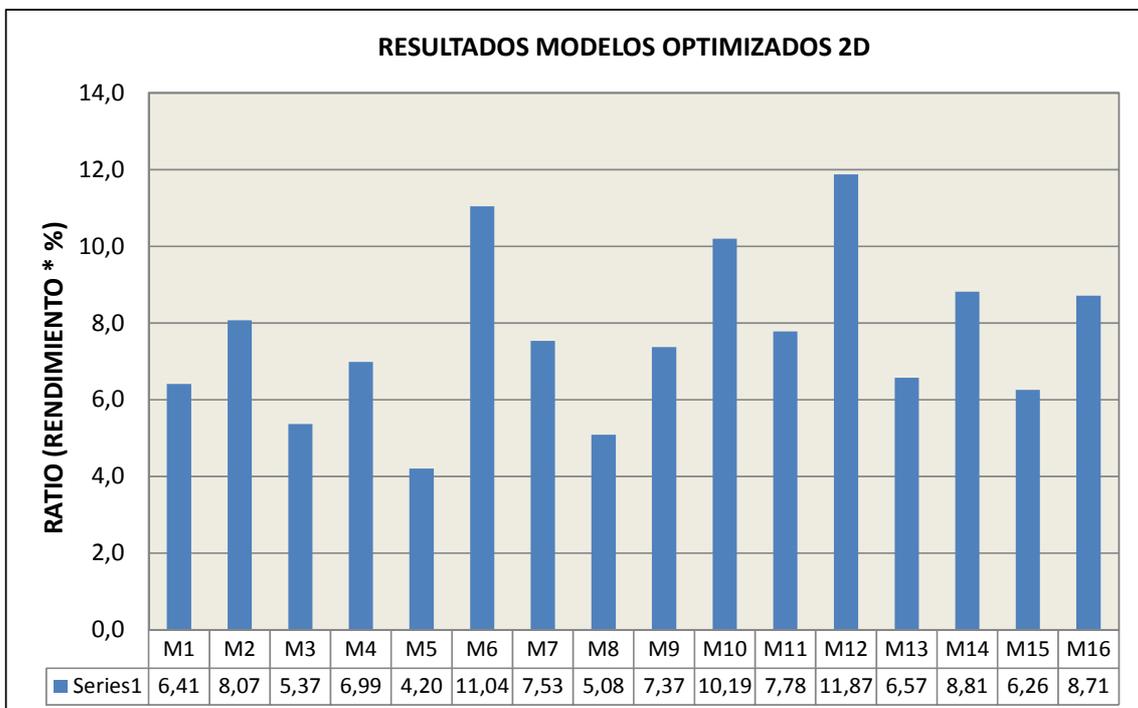


Figura 5.5-8. Comparativo de resultados de mallas en 2D optimizadas. Base de 22.5 m de lado y una altura de 45 m ( $H/B=2$ ).

En la figura 5.5-9, se muestran los diagramas de esfuerzos axiales de los dieciséis modelos optimizados del estudio comparativo que se realiza.

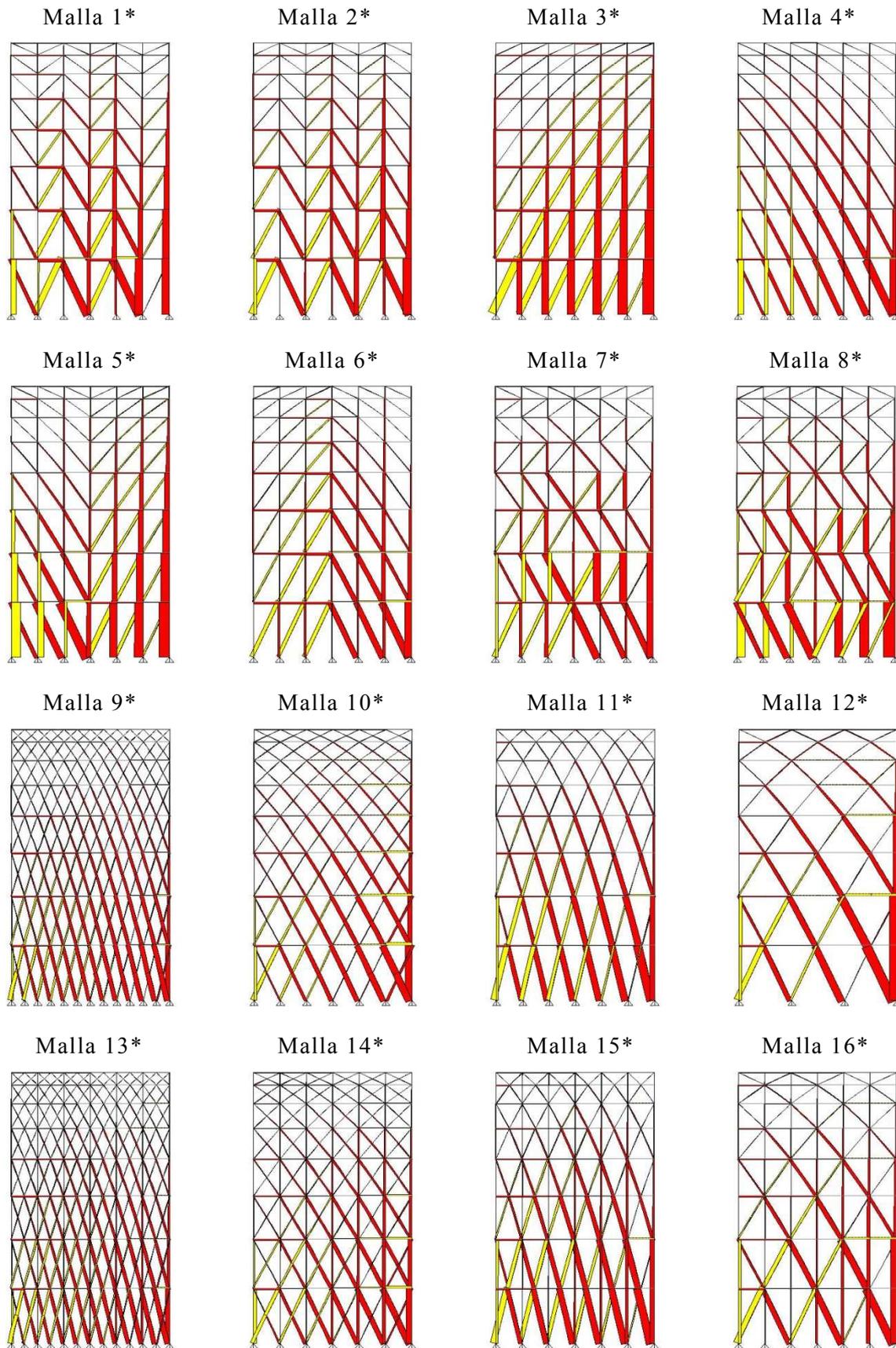


Figura 5.5-9. Diagramas de esfuerzos axiales de los 16 modelos en 2D optimizados.

En la tabla 5.5-3 se presentan los resultados de los rendimientos estructurales y % de optimización, así como el ratio de las dieciséis geometrías de malla convencionales y sus respectivas geometrías optimizadas (indicadas con \*), para una esbeltez geométrica de cuatro ( $H/B=4$ ), de acuerdo a la metodología establecida.

Malla	H (m)	$\delta_{\max}$ (cm)	$P_e$ (kN)	$R_g$	% opt.	Ratio
Malla 1	90	24,50	1105,638	1,73	109,05%	1,884
Malla 1*	90	20,72	1152,714	1,88		2,055
Malla 2	90	19,72	1105,638	2,15	109,76%	2,356
Malla 2*	90	16,57	1152,714	2,36		2,586
Malla 3	90	31,61	1105,638	1,34	113,35%	1,518
Malla 3*	90	25,72	1152,714	1,52		1,720
Malla 4	90	26,83	1105,638	1,58	119,14%	1,880
Malla 4*	90	20,77	1152,714	1,88		2,239
Malla 5	90	38,57	1105,638	1,10	110,78%	1,216
Malla 5*	90	32,11	1152,714	1,22		1,347
Malla 6	90	15,21	1105,638	2,78	112,76%	3,138
Malla 6*	90	12,44	1152,714	3,14		3,539
Malla 7	90	25,05	1105,638	1,69	119,52%	2,020
Malla 7*	90	19,33	1152,714	2,02		2,414
Malla 8	90	31,82	1105,638	1,33	110,66%	1,472
Malla 8*	90	26,52	1152,714	1,47		1,629
Malla 9	90	13,65	2133,51	1,61	121,24%	1,948
Malla 9*	90	10,63	2172,693	1,95		2,362
Malla 10	90	15,38	1224,099	2,49	114,64%	2,850
Malla 10*	90	11,79	1339,308	2,85		3,267
Malla 11	90	24,99	1165,473	1,61	124,56%	2,002
Malla 11*	90	19,00	1183,308	2,00		2,493
Malla 12	90	23,32	710,76	2,82	116,08%	3,277
Malla 12*	90	17,91	766,617	3,28		3,804
Malla 13	90	13,35	2528,382	1,39	123,27%	1,709
Malla 13*	90	10,29	2558,79	1,71		2,107
Malla 14	90	13,13	1618,971	2,20	113,25%	2,493
Malla 14*	90	10,46	1725,405	2,49		2,824
Malla 15	90	24,28	1560,345	1,24	127,40%	1,574
Malla 15*	90	18,22	1569,405	1,57		2,005
Malla 16	90	19,18	1105,638	2,21	112,45%	2,482
Malla 16*	90	15,73	1152,714	2,48		2,791

Tabla 5.5-3. Comparativo de resultados de mallas convencionales y mallas optimizadas (indicadas con \*). Base de 22.5 m de lado y una altura de 90 m ( $H/B=4$ ).

En la figuras 5.5-10 y 5.5-11 se muestran gráficamente los ratios correspondientes a la tabla 5.5-3 de acuerdo a los rendimientos estructurales y % de optimización de las dieciséis geometrías de malla convencionales y sus respectivas geometrías optimizadas, para una esbeltez geométrica de cuatro ( $H/B=4$ ), de acuerdo a la metodología establecida.

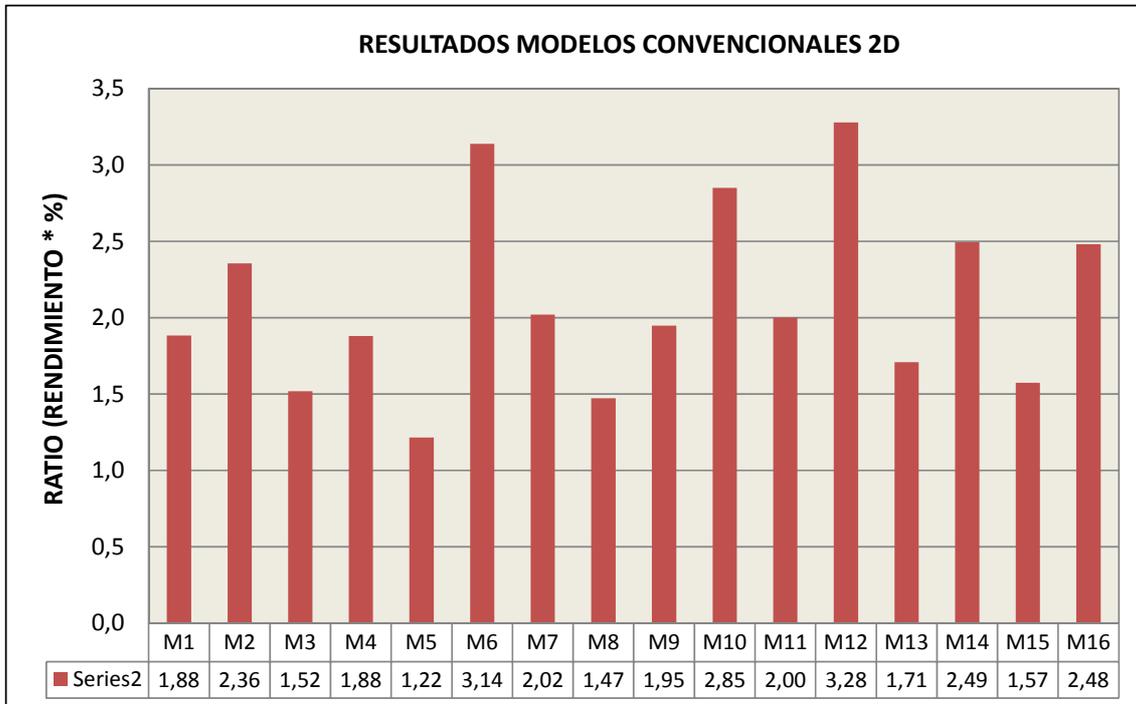


Figura 5.5-10. Comparativo de resultados de mallas en 2D convencionales. Base de 22.5 m de lado y una altura de 90 m ( $H/B=4$ ).

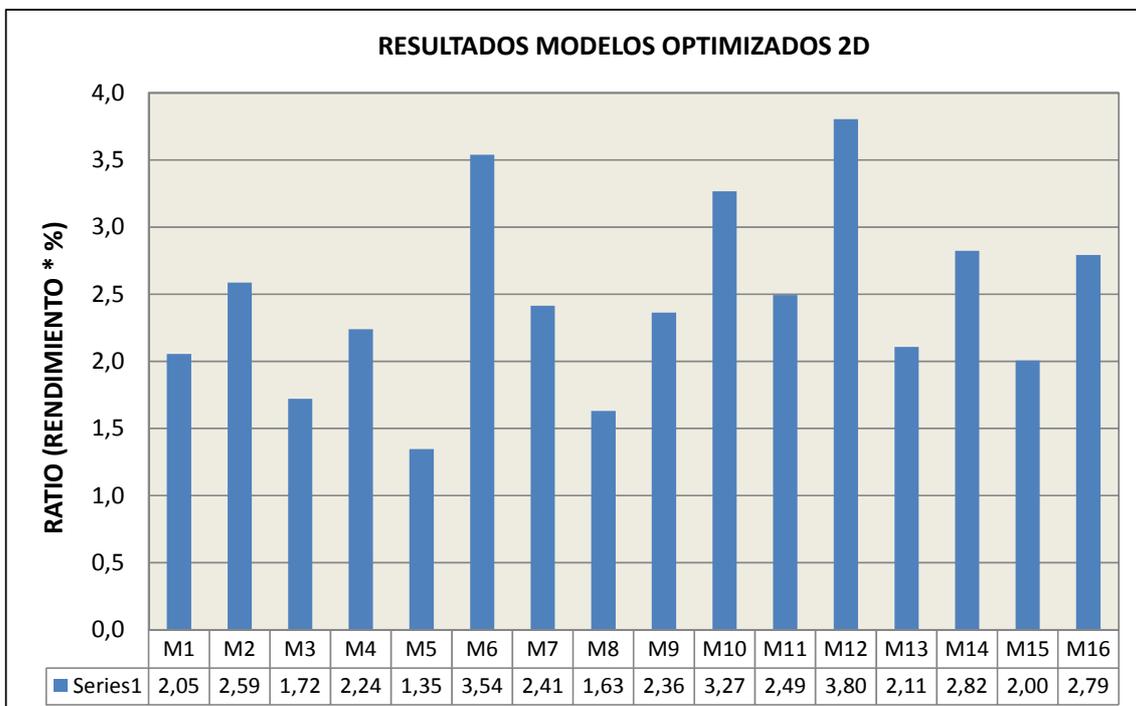


Figura 5.5-11. Comparativo de resultados de mallas en 2D optimizadas. Base de 22.5 m de lado y una altura de 90 m ( $H/B=4$ ).

En la tabla 5.5-4 se presentan los resultados de los rendimientos estructurales y % de optimización, así como el ratio de las dieciséis geometrías de malla convencionales y sus respectivas geometrías optimizadas (indicadas con \*), para una esbeltez geométrica de seis ( $H/B=6$ ), de acuerdo a la metodología establecida.

Malla	H (m)	$\delta_{\max}$ (cm)	$P_e$ (kN)	$R_g$	% opt.	Ratio
Malla 1	135	36,75	2579,822	0,58	105,01%	0,606
Malla 1*	135	31,08	2689,666	0,61		0,636
Malla 2	135	29,58	2579,822	0,72	105,69%	0,757
Malla 2*	135	24,86	2689,666	0,76		<b>0,800</b>
Malla 3	135	47,42	2579,822	0,45	109,15%	0,488
Malla 3*	135	38,58	2689,666	0,49		0,533
Malla 4	135	40,25	2579,822	0,53	114,72%	0,604
Malla 4*	135	31,16	2689,666	0,60		0,693
Malla 5	135	57,86	2579,822	0,37	106,68%	0,391
Malla 5*	135	48,17	2689,666	0,39		<b>0,417</b>
Malla 6	135	22,82	2579,822	0,93	108,59%	1,009
Malla 6*	135	18,66	2689,666	1,01		<b>1,095</b>
Malla 7	135	37,58	2579,822	0,56	115,09%	0,649
Malla 7*	135	29,00	2689,666	0,65		<b>0,747</b>
Malla 8	135	47,73	2579,822	0,44	106,56%	0,473
Malla 8*	135	39,78	2689,666	0,47		0,504
Malla 9	135	20,48	4978,19	0,54	116,75%	0,626
Malla 9*	135	15,95	5069,617	0,63		0,731
Malla 10	135	23,07	2856,231	0,83	110,40%	0,916
Malla 10*	135	17,69	3125,052	0,92		<b>1,011</b>
Malla 11	135	37,49	2719,437	0,54	119,95%	0,643
Malla 11*	135	28,50	2761,052	0,64		<b>0,772</b>
Malla 12	135	34,98	1658,44	0,94	111,78%	1,053
Malla 12*	135	26,87	1788,773	1,05		<b>1,178</b>
Malla 13	135	20,03	5899,558	0,46	118,70%	0,549
Malla 13*	135	15,44	5970,51	0,55		0,652
Malla 14	135	19,70	3777,599	0,73	109,06%	0,801
Malla 14*	135	15,69	4025,945	0,80		<b>0,874</b>
Malla 15	135	36,42	3640,805	0,41	122,68%	0,506
Malla 15*	135	27,33	3661,945	0,51		0,621
Malla 16	135	28,77	2579,822	0,74	108,29%	0,798
Malla 16*	135	23,60	2689,666	0,80		<b>0,864</b>

Tabla 5.5-4. Comparativo de resultados de mallas convencionales y mallas optimizadas (indicadas con \*). Base de 22.5 m de lado y una altura de 135 m ( $H/B=6$ ).

En la figuras 5.5-12 y 5.5-13 se muestran gráficamente los ratios correspondientes a la tabla 5.5-4 de acuerdo a los rendimientos estructurales y % de optimización de las dieciséis geometrías de malla convencionales y sus respectivas geometrías optimizadas, para una esbeltez geométrica de seis ( $H/B=6$ ), de acuerdo a la metodología establecida.

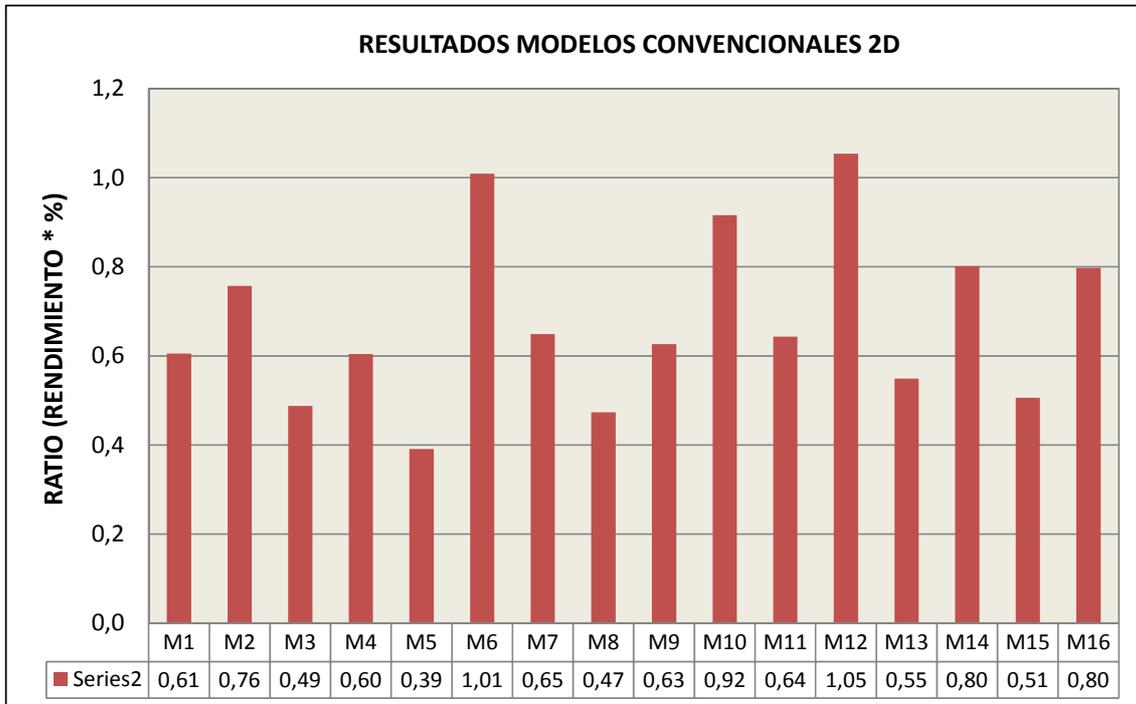


Figura 5.5-12. Comparativo de resultados de mallas en 2D convencionales. Base de 22.5 m de lado y una altura de 135 m ( $H/B=6$ ).

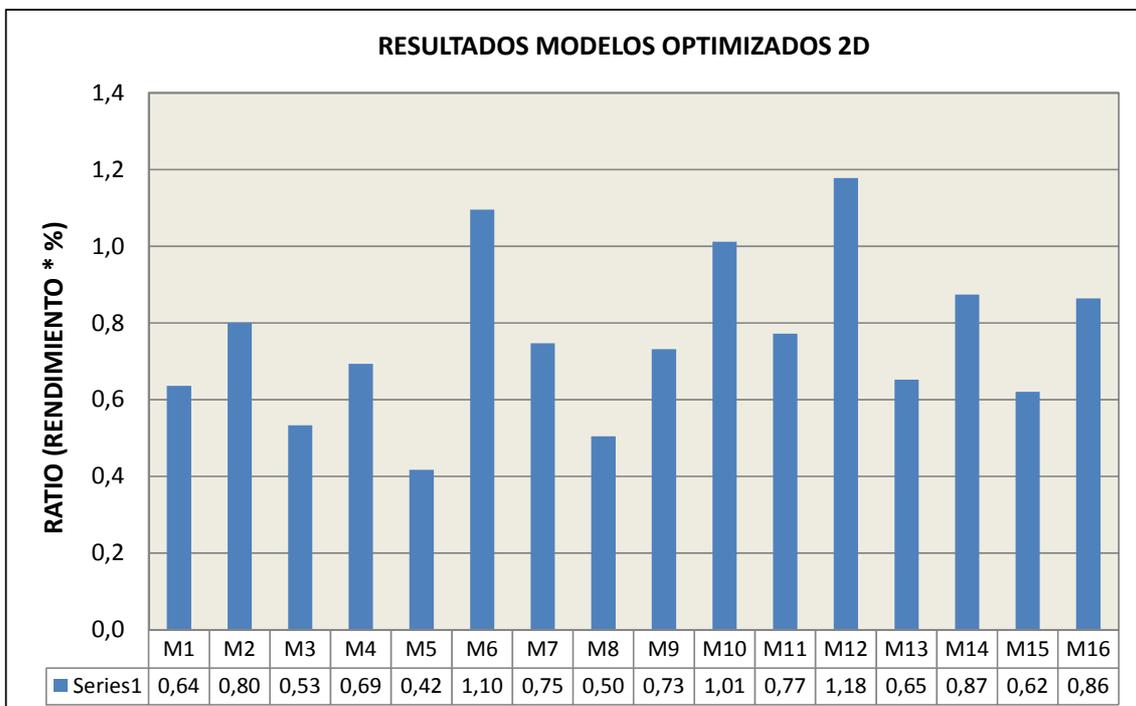


Figura 5.5-13. Comparativo de resultados de mallas en 2D optimizadas. Base de 22.5 m de lado y una altura de 135 m ( $H/B=6$ ).

En la tabla 5.5-5 se presentan los resultados de los rendimientos estructurales y % de optimización, así como el ratio de las dieciséis geometrías de malla convencionales y sus respectivas geometrías optimizadas (indicadas con \*), para una esbeltez geométrica de ocho ( $H/B=8$ ), de acuerdo a la metodología establecida.

Malla	H (m)	$\delta_{\max}$ (cm)	$P_e$ (kN)	$R_g$	% opt.	Ratio
Malla 1	180	30,63	3685,46	0,22	101,68%	0,220
Malla 1*	180	25,90	3842,38	0,22		0,224
Malla 2	180	24,65	3685,46	0,27	102,34%	0,276
Malla 2*	180	20,71	3842,38	0,28		<b>0,282</b>
Malla 3	180	39,51	3685,46	0,17	105,69%	0,178
Malla 3*	180	32,15	3842,38	0,18		0,188
Malla 4	180	33,54	3685,46	0,20	111,08%	0,220
Malla 4*	180	25,96	3842,38	0,22		0,244
Malla 5	180	48,21	3685,46	0,14	103,29%	0,142
Malla 5*	180	40,14	3842,38	0,14		<b>0,147</b>
Malla 6	180	19,01	3685,46	0,35	105,14%	0,367
Malla 6*	180	15,55	3842,38	0,37		<b>0,386</b>
Malla 7	180	31,31	3685,46	0,21	111,44%	0,236
Malla 7*	180	24,16	3842,38	0,24		<b>0,263</b>
Malla 8	180	39,78	3685,46	0,17	103,18%	0,172
Malla 8*	180	33,15	3842,38	0,17		0,178
Malla 9	180	17,06	7111,7	0,20	113,05%	0,228
Malla 9*	180	13,29	7242,31	0,23		0,258
Malla 10	180	19,23	4080,33	0,31	106,89%	0,333
Malla 10*	180	14,74	4464,36	0,33		<b>0,356</b>
Malla 11	180	31,24	3884,91	0,20	116,14%	0,234
Malla 11*	180	23,75	3944,36	0,23		<b>0,272</b>
Malla 12	180	29,15	2369,2	0,35	108,23%	0,383
Malla 12*	180	22,39	2555,39	0,38		<b>0,415</b>
Malla 13	180	16,69	8427,94	0,17	114,93%	0,200
Malla 13*	180	12,86	8529,3	0,20		0,230
Malla 14	180	16,41	5396,57	0,28	105,60%	0,292
Malla 14*	180	13,08	5751,35	0,29		<b>0,308</b>
Malla 15	180	30,35	5201,15	0,16	118,78%	0,184
Malla 15*	180	22,78	5231,35	0,18		0,219
Malla 16	180	23,98	3685,46	0,28	104,85%	0,290
Malla 16*	180	19,66	3842,38	0,29		<b>0,304</b>

Tabla 5.5-5. Comparativo de resultados de mallas convencionales y mallas optimizadas (indicadas con \*). Base de 22.5 m de lado y una altura de 180 m ( $H/B=8$ ).

En la figuras 5.5-14 y 5.5-15 se muestran gráficamente los ratios correspondientes a la tabla 5.5-5 de acuerdo a los rendimientos estructurales y % de optimización de las dieciséis geometrías de malla convencionales y sus respectivas geometrías optimizadas, para una esbeltez geométrica de ocho ( $H/B=8$ ), de acuerdo a la metodología establecida.

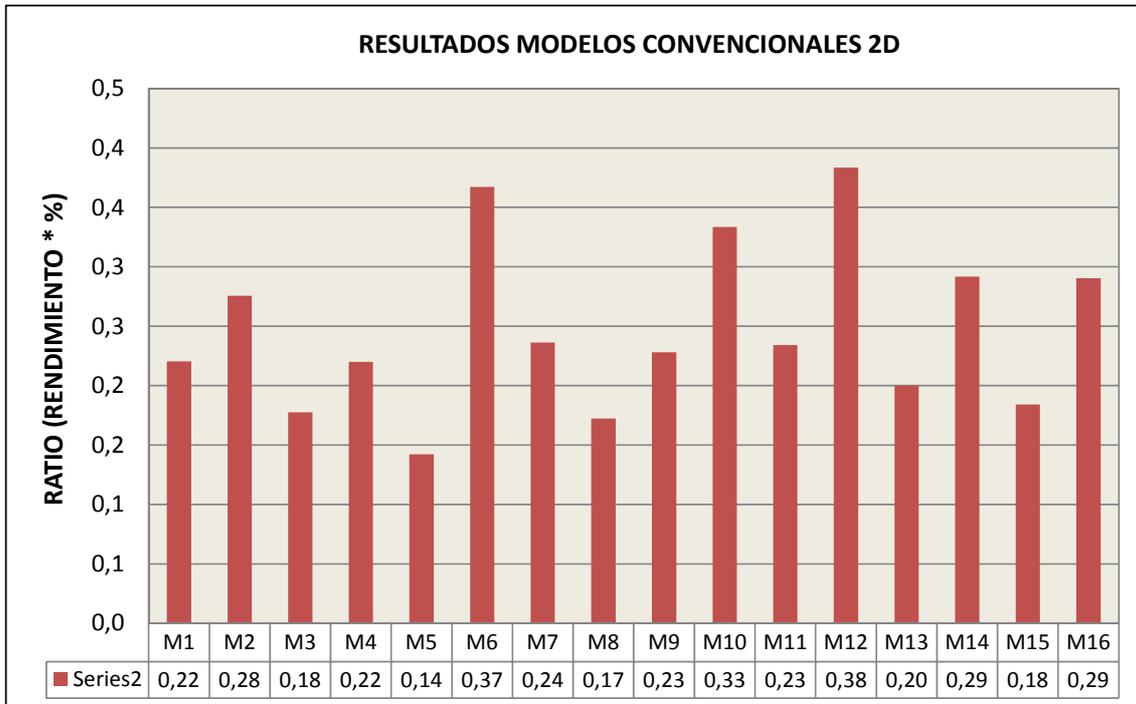


Figura 5.5-14. Comparativo de resultados de mallas en 2D convencionales. Base de 22.5 m de lado y una altura de 180 m ( $H/B=8$ ).

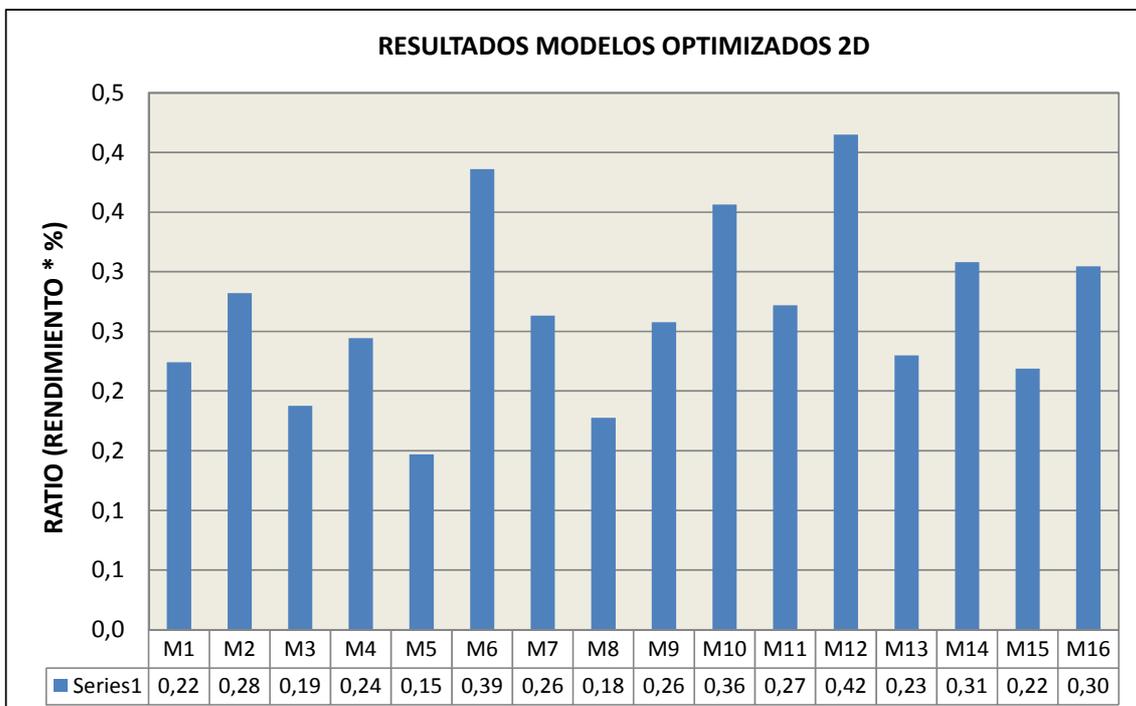


Figura 5.5-15. Comparativo de resultados de mallas en 2D optimizadas. Base de 22.5 m de lado y una altura de 180 m ( $H/B=8$ ).

### 5.5.3 Conclusiones estudios comparativos básicos de mallas

De acuerdo a los resultados anteriormente mostrados, en base a los estudios comparativos básicos realizados, acerca del rendimiento global con modelos de mallas en 2D para obtener valores y ratios previos antes de realizar el estudio de mallas envolventes de edificios en altura, las conclusiones previas se describen en los siguientes seis párrafos.

- De los resultados mostrados se desprende que, según a los estados de carga y combinaciones de acciones consideradas, la inclinación de las barras más eficiente está alrededor de un ángulo de  $70^\circ$  con respecto a la horizontal, confirmando así la tendencia geométrica expuesta en el capítulo 1 en base al proyecto de la *Lotte Super Tower* de Seúl a cargo del estudio de arquitectura e ingeniería SOM.
- Se observa que, en base a los distintos estados de carga y combinaciones de acciones consideradas, en este tipo de edificios el viento es determinante ya que el incremento de cargas verticales frente a las cargas horizontales no mejora, de forma significativa, el comportamiento global de la estructura.
- El aumento de densidad de las mallas, para una misma inclinación de las barras, no implica necesariamente una mejora del rendimiento y comportamiento global de la estructura, como se observa en los resultados de las geometrías de los modelos 9, 10, 11 y 12. La geometría 9 es la que ofrece rendimientos más bajos, a pesar de la alta densidad de la malla.
- En base a los modelos 1-8, los cuales tienen el mismo peso propio de malla, se aprecia que los modelos que obtienen rendimientos menores son los que corresponden a las geometrías 5 y 8.
- La presencia de montantes verticales en los modelos 13, 14, 15 y 16, con respecto a las geometrías 9, 10, 11 y 12, empeora los resultados ya que en ninguna de ellas el rendimiento global es mayor en las geometrías con montantes verticales (13, 14, 15 y 16), que sin ellos (9, 10, 11 y 12). No obstante, la geometría 16 ofrece un buen rendimiento dentro de la globalidad del estudio realizado.
- Para todas las triangulaciones de malla estudiadas y optimizadas, de acuerdo a la metodología propuesta, se obtienen resultados satisfactorios ya que las geometrías resultantes ganan eficiencia cuando identifican la trayectoria de las líneas isostáticas generadas por la acción principal, el viento. Las geometrías que obtienen mejores rendimientos globales son las que corresponden a los modelos 6 y 12.

Las características de estas conclusiones nos permitirán plantear la modelización de las geometrías que se utilizarán para el estudio de modelos en 3D, correspondientes a mallas espaciales envolventes de edificios en altura, son las geometrías de los modelos 2, 6, 7, 10, 11, 12, 14 y 16. Asimismo, se considera la geometría 5, como contraejemplo, a tenor de su reducido rendimiento.

Dado que el viento puede venir en cualquier dirección, se descartan aquellas geometrías asimétricas con respecto al eje vertical del alzado, como son el caso de las geometrías de los modelos analizados 3 y 4.

## 5.6 Estudios comparativos de mallas estructurales de acero envolventes de edificios en altura

En base a los estudios básicos y sus respectivas conclusiones descritas, en este epígrafe se realizan dos estudios comparativos respecto al rendimiento estructural global de mallas envolventes de edificios en altura.

El primer estudio consiste en un comparativo de ocho tipologías de malla para optimizar dichas geometrías, para distintos esbelteces de acuerdo a cuatro alturas distintas. En el segundo estudio comparativo se pretende optimizar la geometría más eficiente, de acuerdo con los resultados del primer estudio de este epígrafe, para obtener la forma de la malla con el más elevado rendimiento estructural, a la vez que se atienden a las cuestiones arquitectónicas del proyecto correspondiente.

### 5.6.1 Estudio comparativo para la optimización de mallas envolventes de edificios en altura en base a las líneas isostáticas

De acuerdo a lo anteriormente expuesto, en este primer estudio comparativo se analizan 768 modelos de edificios en altura con un entramado en tubo como tipología estructural. Se consideran cuatro alturas distintas de coronación de los edificios, tal que, H: 45, 90, 135 y 180 m. Para cada una de las ellas, se analizan 3 esbelteces distintas de acuerdo a las siguientes dimensiones en planta, B: 15, 22.5 y 30 m de lado en el caso de base cuadrada y triangular, de diámetro equivalente a B en el caso de edificios de base circular/poligonal y de lado menor en el caso de base rectangular (con una proporción, en planta, de 2 a 1).

En cuanto a la separación entre plantas se refiere, se opta por una altura mínima de cuatro metros, tal y como se ha descrito en el apartado 5.3.1, para que no sea necesario disponer una estructura interior de pórticos o con un núcleo resistente que influya en el comportamiento global de las estructuras de entramado en tubo analizadas.

Los resultados más relevantes se muestran en las figuras y tablas del presente apartado, de acuerdo a los siguientes parámetros de diseño y de dimensionado:

- Modelos espaciales envolventes de edificios en altura, de acuerdo a 9 esbelteces distintas  $H/B = 1.5, 2, 3, 4, 4.5, 6, 8, 9$  y  $12$ , para  $B = 15, 22.5$  y  $30$  m; y  $H = 45, 90, 135$  y  $180$  m.
- Ocho triangulaciones distintas, como se muestra en la figura 5.6-1.

Se analizan dichos modelos, según las acciones descritas en el apartado 5.3.2, con el objetivo de valorar el rendimiento estructural global  $R_g$  (expresión (5.4.10)), de cada tipología para realizar un estudio comparativo de acuerdo con los siguientes criterios de dimensionado:

- Los perfiles utilizados para las mallas analizadas son perfiles tubulares de sección cuadrada, eligiendo el perfil de menor peso que cumpla con las condiciones de dimensionado correcto para estados límite últimos (ELU) y que dé una respuesta satisfactoria al cumplimiento de la normativa para estados límite de servicio (ELS).
- Limitación de desplazamientos horizontales de acuerdo con las bases de cálculo descritas anteriormente (apartado 5.3.7).

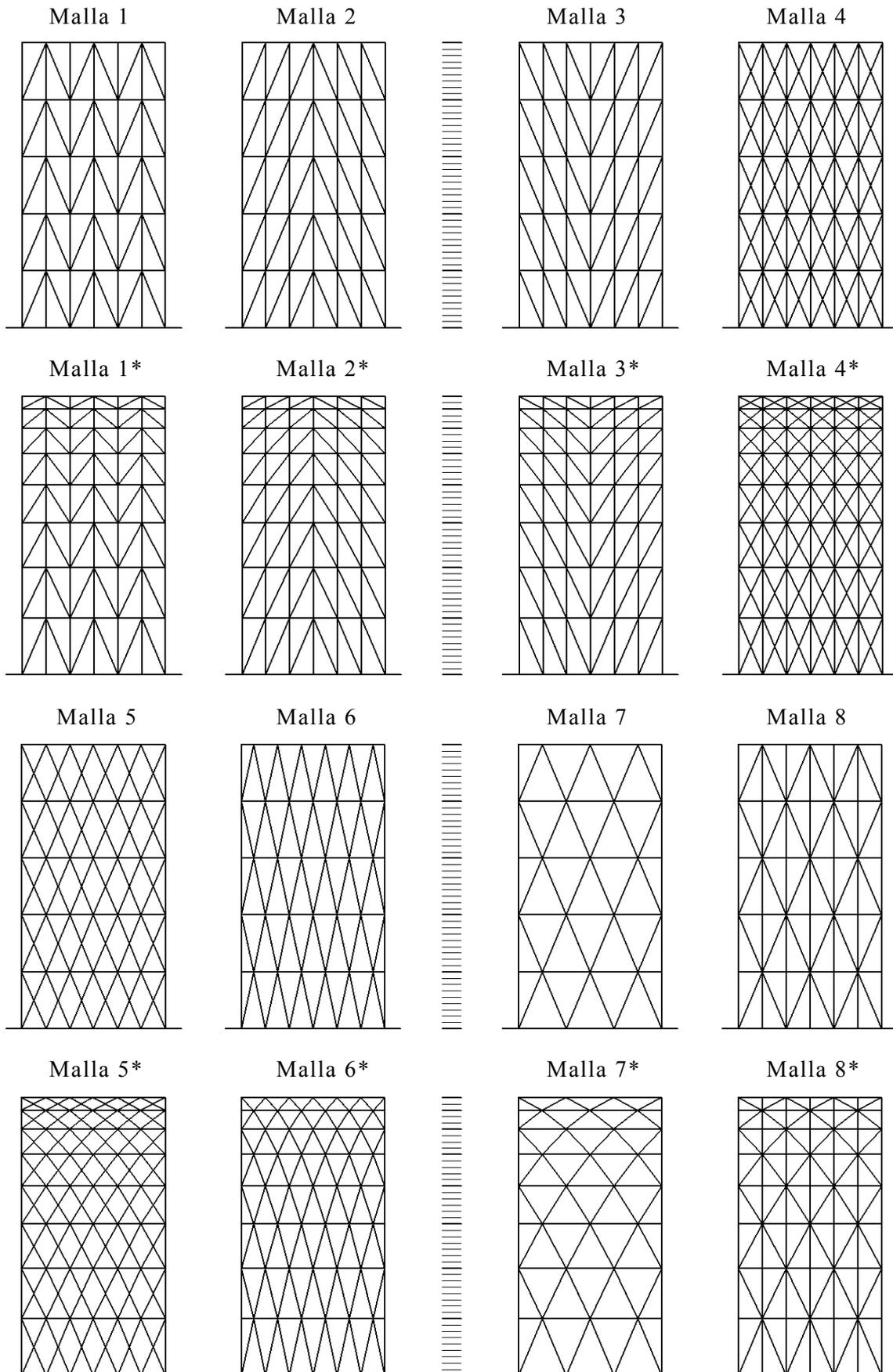


Figura 5.6-1. Geometrías de las ocho mallas convencionales y las posibles mallas optimizadas, teniendo en cuenta la trayectoria de las líneas isostáticas y el diseño arquitectónico.

### 5.6.1.1 *Resultados comparativo de modelos de base cuadrada*

En el presente epígrafe se presentan los resultados del estudio comparativo en base a los modelos de base cuadrada. En la figura 5.6-2, se muestran algunos de los modelos analizados de acuerdo al estudio comparativo realizado.

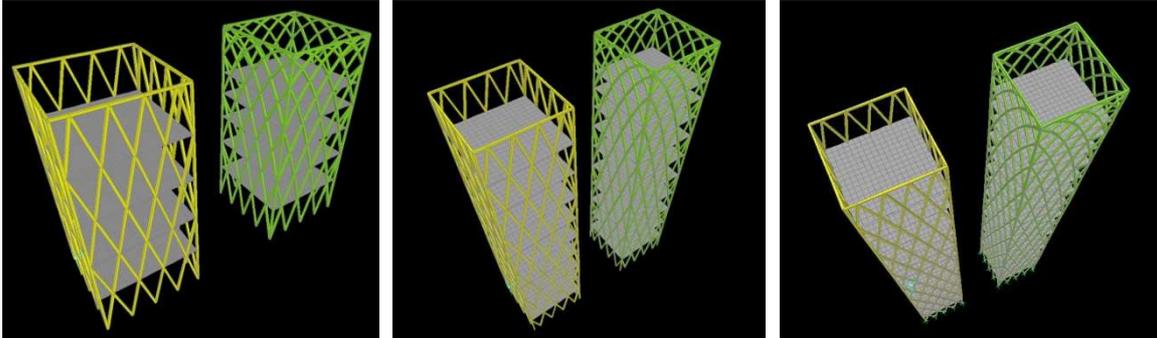


Figura 5.6-2. Geometrías de tres mallas convencionales y tres mallas optimizadas de base cuadrada, teniendo en cuenta la trayectoria de las líneas isostáticas y el diseño arquitectónico.

En las figuras 5.6-3, 5.6-4, 5.6-5 y 5.6-6, así como en las tablas 5.6-1, 5.6-2, 5.6-3 y 5.6-4, se muestran los resultados del estudio comparativo de mallas envolventes de edificios en altura de acuerdo a las ocho triangulaciones, para los modelos de base cuadrada.

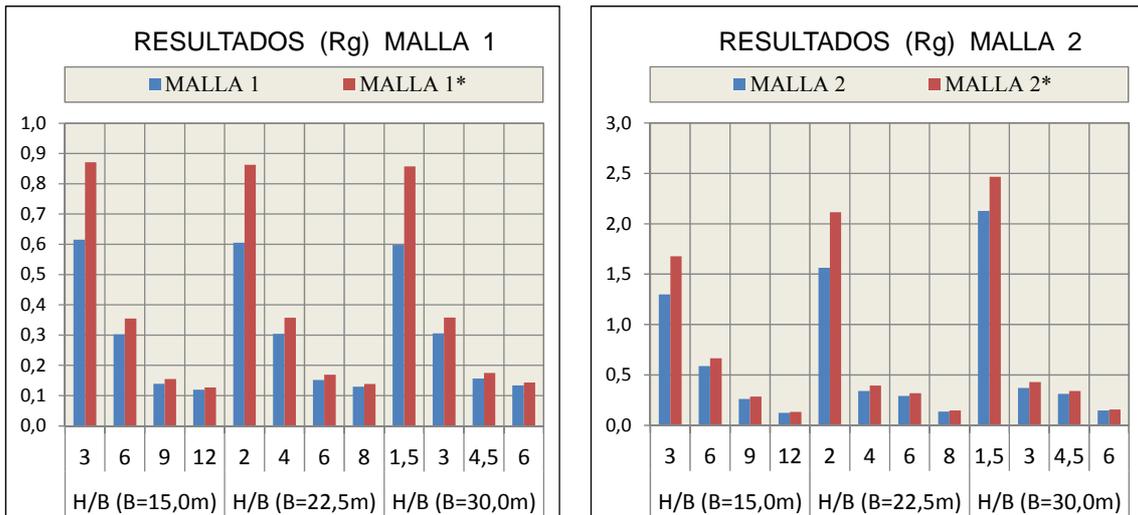


Figura 5.6-3. Comparativo de los modelos 1 y 2 de base cuadrada (24 mallas convencionales y 24 mallas optimizadas\*) para las distintas esbelteces analizadas.

Modelo	H (m)	B (m)	$\delta_{max}$ (cm)	$R_g$	%	H (m)	B (m)	$\delta_{max}$ (cm)	$R_g$	%
Modelo 1	45,0	15,0	9,0	0,62	141,6 %	90,0	15,0	18,0	0,30	117,3 %
Modelo 1*	45,0	15,0	9,0	0,87		90,0	15,0	18,0	0,35	
Modelo 1	45,0	22,5	9,0	0,61	142,5 %	90,0	22,5	18,0	0,30	117,3 %
Modelo 1*	45,0	22,5	9,0	0,86		90,0	22,5	18,0	0,36	
Modelo 1	45,0	30,0	9,0	0,60	143,4 %	90,0	30,0	18,0	0,31	117,2 %
Modelo 1*	45,0	30,0	9,0	0,86		90,0	30,0	18,0	0,36	
Modelo 1	135,0	15,0	27,0	0,14	111,1 %	180,0	15,0	36,0	0,12	106,3 %
Modelo 1*	135,0	15,0	27,0	0,16		180,0	15,0	36,0	0,13	
Modelo 1	135,0	22,5	27,0	0,15	111,7 %	180,0	22,5	36,0	0,13	106,8 %
Modelo 1*	135,0	22,5	27,0	0,17		180,0	22,5	36,0	0,14	
Modelo 1	135,0	30,0	27,0	0,16	111,7 %	180,0	30,0	36,0	0,13	106,9 %
Modelo 1*	135,0	30,0	27,0	0,18		180,0	30,0	36,0	0,14	
Modelo 2	45,0	15,0	9,0	1,30	129,2 %	90,0	15,0	18,0	0,59	113,3 %
Modelo 2*	45,0	15,0	9,0	1,68		90,0	15,0	18,0	0,67	
Modelo 2	45,0	22,5	9,0	1,56	135,2 %	90,0	22,5	18,0	0,34	116,4 %
Modelo 2*	45,0	22,5	9,0	2,11		90,0	22,5	18,0	0,39	
Modelo 2	45,0	30,0	9,0	2,13	115,9 %	90,0	30,0	18,0	0,37	116,3 %
Modelo 2*	45,0	30,0	9,0	2,47		90,0	30,0	18,0	0,43	
Modelo 2	135,0	15,0	27,0	0,26	108,8 %	180,0	15,0	36,0	0,12	106,7 %
Modelo 2*	135,0	15,0	27,0	0,29		180,0	15,0	36,0	0,13	
Modelo 2	135,0	22,5	27,0	0,29	109,1 %	180,0	22,5	36,0	0,14	106,9 %
Modelo 2*	135,0	22,5	27,0	0,32		180,0	22,5	36,0	0,15	
Modelo 2	135,0	30,0	27,0	0,31	108,9 %	180,0	30,0	36,0	0,15	106,8 %
Modelo 2*	135,0	30,0	27,0	0,34		180,0	30,0	36,0	0,16	

Tabla 5.6-1. Comparativo de los modelos 1 y 2 de base cuadrada (24 mallas convencionales y 24 mallas optimizadas\*) para las distintas esbelteces analizadas.

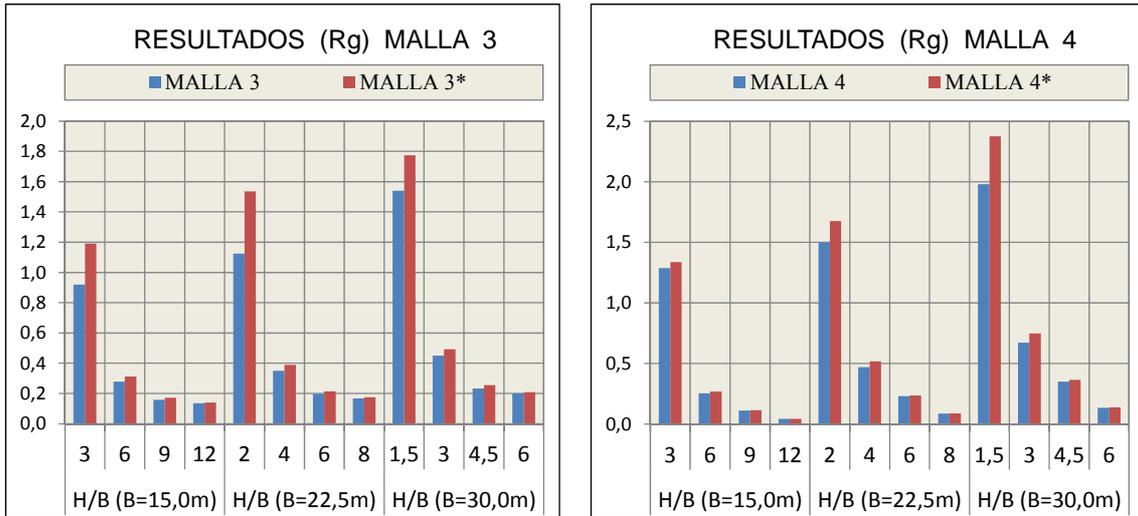


Figura 5.6-4. Comparativo de los modelos 3 y 4 de base cuadrada (24 mallas convencionales y 24 mallas optimizadas\*) para las distintas esbelteces analizadas.

Modelo	H (m)	B (m)	$\delta_{max}$ (cm)	$R_g$	%	H (m)	B (m)	$\delta_{max}$ (cm)	$R_g$	%
Modelo 3	45,0	15,0	9,0	0,92	<b>129,6 %</b>	90,0	15,0	18,0	0,28	<b>112,1 %</b>
Modelo 3*	45,0	15,0	9,0	1,19		90,0	15,0	18,0	0,31	
Modelo 3	45,0	22,5	9,0	1,12	<b>136,6 %</b>	90,0	22,5	18,0	0,35	<b>111,0 %</b>
Modelo 3*	45,0	22,5	9,0	1,54		90,0	22,5	18,0	0,39	
Modelo 3	45,0	30,0	9,0	1,54	<b>115,2 %</b>	90,0	30,0	18,0	0,45	<b>109,4 %</b>
Modelo 3*	45,0	30,0	9,0	1,77		90,0	30,0	18,0	0,49	
Modelo 3	135,0	15,0	27,0	0,16	<b>108,7 %</b>	180,0	15,0	36,0	0,14	<b>103,9 %</b>
Modelo 3*	135,0	15,0	27,0	0,17		180,0	15,0	36,0	0,14	
Modelo 3	135,0	22,5	27,0	0,20	<b>108,5 %</b>	180,0	22,5	36,0	0,17	<b>103,8 %</b>
Modelo 3*	135,0	22,5	27,0	0,21		180,0	22,5	36,0	0,18	
Modelo 3	135,0	30,0	27,0	0,23	<b>109,0 %</b>	180,0	30,0	36,0	0,20	<b>104,3 %</b>
Modelo 3*	135,0	30,0	27,0	0,25		180,0	30,0	36,0	0,21	
Modelo 4	45,0	15,0	9,0	1,29	<b>103,8 %</b>	90,0	15,0	18,0	0,25	<b>106,3 %</b>
Modelo 4*	45,0	15,0	9,0	1,34		90,0	15,0	18,0	0,27	
Modelo 4	45,0	22,5	9,0	0,84	<b>111,8 %</b>	90,0	22,5	18,0	0,47	<b>109,9 %</b>
Modelo 4*	45,0	22,5	9,0	0,94		90,0	22,5	18,0	0,52	
Modelo 4	45,0	30,0	9,0	1,98	<b>119,9 %</b>	90,0	30,0	18,0	0,67	<b>111,2 %</b>
Modelo 4*	45,0	30,0	9,0	2,37		90,0	30,0	18,0	0,75	
Modelo 4	135,0	15,0	27,0	0,11	<b>102,6 %</b>	180,0	15,0	36,0	0,04	<b>101,4 %</b>
Modelo 4*	135,0	15,0	27,0	0,11		180,0	15,0	36,0	0,04	
Modelo 4	135,0	22,5	27,0	0,23	<b>103,1 %</b>	180,0	22,5	36,0	0,09	<b>101,8 %</b>
Modelo 4*	135,0	22,5	27,0	0,24		180,0	22,5	36,0	0,09	
Modelo 4	135,0	30,0	27,0	0,35	<b>103,9 %</b>	180,0	30,0	36,0	0,13	<b>102,7 %</b>
Modelo 4*	135,0	30,0	27,0	0,36		180,0	30,0	36,0	0,14	

Tabla 5.6-2. Comparativo de los modelos 3 y 4 de base cuadrada (24 mallas convencionales y 24 mallas optimizadas\*) para las distintas esbelteces analizadas.

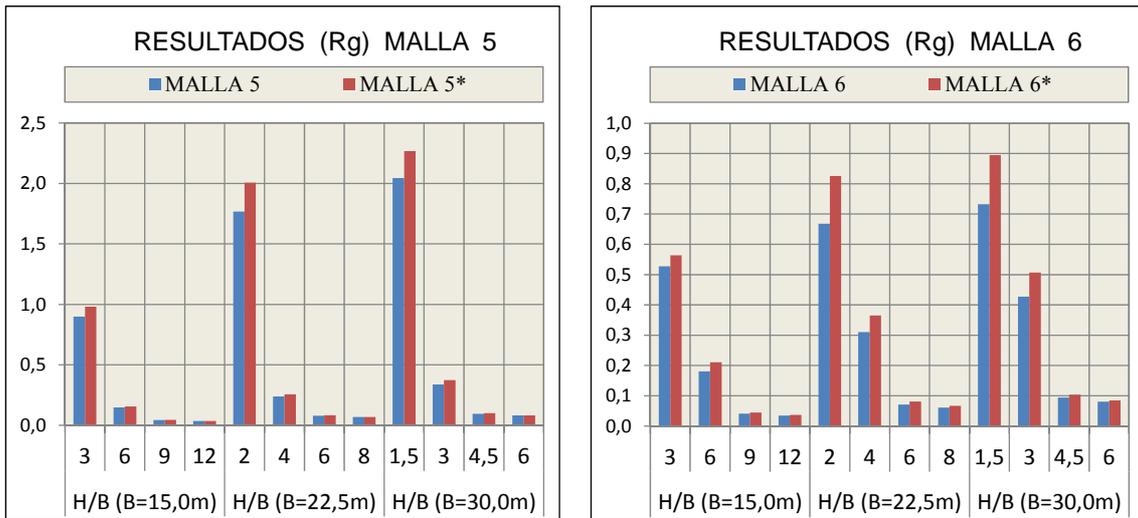


Figura 5.6-5. Comparativo de los modelos 5 y 6 de base cuadrada (24 mallas convencionales y 24 mallas optimizadas\*) para las distintas esbelteces analizadas.

Modelo	H (m)	B (m)	$\delta_{max}$ (cm)	$R_g$	%	H (m)	B (m)	$\delta_{max}$ (cm)	$R_g$	%
Modelo 5	45,0	15,0	9,0	0,90	109,3 %	90,0	15,0	18,0	0,15	105,5 %
Modelo 5*	45,0	15,0	9,0	0,98		90,0	15,0	18,0	0,15	
Modelo 5	45,0	22,5	9,0	1,77	113,5 %	90,0	22,5	18,0	0,24	107,9 %
Modelo 5*	45,0	22,5	9,0	2,01		90,0	22,5	18,0	0,26	
Modelo 5	45,0	30,0	9,0	2,04	110,9 %	90,0	30,0	18,0	0,34	110,1 %
Modelo 5*	45,0	30,0	9,0	2,27		90,0	30,0	18,0	0,37	
Modelo 5	135,0	15,0	27,0	0,04	104,5 %	180,0	15,0	36,0	0,04	102,1 %
Modelo 5*	135,0	15,0	27,0	0,04		180,0	15,0	36,0	0,04	
Modelo 5	135,0	22,5	27,0	0,08	104,4 %	180,0	22,5	36,0	0,07	102,0 %
Modelo 5*	135,0	22,5	27,0	0,08		180,0	22,5	36,0	0,07	
Modelo 5	135,0	30,0	27,0	0,09	106,3 %	180,0	30,0	36,0	0,08	102,8 %
Modelo 5*	135,0	30,0	27,0	0,10		180,0	30,0	36,0	0,08	
Modelo 6	45,0	15,0	9,0	0,53	106,9 %	90,0	15,0	18,0	0,18	116,2 %
Modelo 6*	45,0	15,0	9,0	0,56		90,0	15,0	18,0	0,21	
Modelo 6	45,0	22,5	9,0	0,67	123,6 %	90,0	22,5	18,0	0,31	117,7 %
Modelo 6*	45,0	22,5	9,0	0,83		90,0	22,5	18,0	0,37	
Modelo 6	45,0	30,0	9,0	0,73	122,2 %	90,0	30,0	18,0	0,43	118,7 %
Modelo 6*	45,0	30,0	9,0	0,89		90,0	30,0	18,0	0,51	
Modelo 6	135,0	15,0	27,0	0,04	109,7 %	180,0	15,0	36,0	0,03	104,9 %
Modelo 6*	135,0	15,0	27,0	0,04		180,0	15,0	36,0	0,04	
Modelo 6	135,0	22,5	27,0	0,07	114,9 %	180,0	22,5	36,0	0,06	109,9 %
Modelo 6*	135,0	22,5	27,0	0,08		180,0	22,5	36,0	0,07	
Modelo 6	135,0	30,0	27,0	0,09	109,9 %	180,0	30,0	36,0	0,08	105,2 %
Modelo 6*	135,0	30,0	27,0	0,10		180,0	30,0	36,0	0,08	

Tabla 5.6-3. Comparativo de los modelos 5 y 6 de base cuadrada (24 mallas convencionales y 24 mallas optimizadas\*) para las distintas esbelteces analizadas.

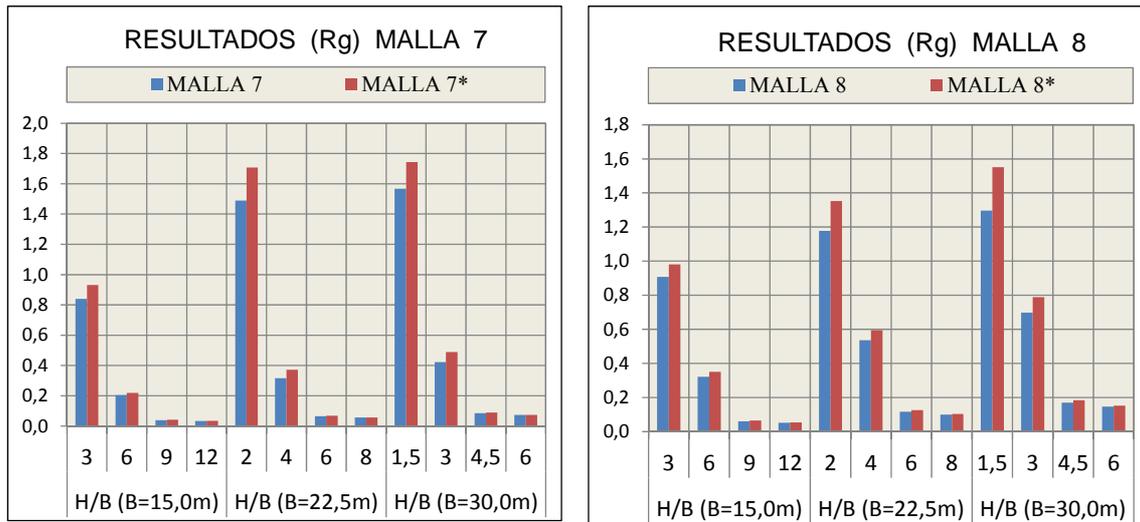


Figura 5.6-6. Comparativo de los modelos 7 y 8 de base cuadrada (24 mallas convencionales y 24 mallas optimizadas\*) para las distintas esbelteces analizadas.

Modelo	H (m)	B (m)	$\delta_{max}$ (cm)	$R_g$	%	H (m)	B (m)	$\delta_{max}$ (cm)	$R_g$	%
Modelo 7	45,0	15,0	9,0	0,84	<b>111,0</b>	90,0	15,0	18,0	0,20	<b>107,2</b>
Modelo 7*	45,0	15,0	9,0	0,93	%	90,0	15,0	18,0	0,22	%
Modelo 7	45,0	22,5	9,0	1,49	<b>114,7</b>	90,0	22,5	18,0	0,32	<b>117,8</b>
Modelo 7*	45,0	22,5	9,0	1,71	%	90,0	22,5	18,0	0,37	%
Modelo 7	45,0	30,0	9,0	1,00	<b>111,3</b>	90,0	30,0	18,0	0,42	<b>115,9</b>
Modelo 7*	45,0	30,0	9,0	1,12	%	90,0	30,0	18,0	0,49	%
Modelo 7	135,0	15,0	27,0	0,04	<b>106,2</b>	180,0	15,0	36,0	0,03	<b>101,6</b>
Modelo 7*	135,0	15,0	27,0	0,04	%	180,0	15,0	36,0	0,03	%
Modelo 7	135,0	22,5	27,0	0,07	<b>105,2</b>	180,0	22,5	36,0	0,06	<b>100,6</b>
Modelo 7*	135,0	22,5	27,0	0,07	%	180,0	22,5	36,0	0,06	%
Modelo 7	135,0	30,0	27,0	0,09	<b>105,8</b>	180,0	30,0	36,0	0,07	<b>101,2</b>
Modelo 7*	135,0	30,0	27,0	0,09	%	180,0	30,0	36,0	0,07	%
Modelo 8	45,0	15,0	9,0	0,91	<b>107,9</b>	90,0	15,0	18,0	0,32	<b>108,6</b>
Modelo 8*	45,0	15,0	9,0	0,98	%	90,0	15,0	18,0	0,35	%
Modelo 8	45,0	22,5	9,0	1,18	<b>114,9</b>	90,0	22,5	18,0	0,54	<b>111,0</b>
Modelo 8*	45,0	22,5	9,0	1,35	%	90,0	22,5	18,0	0,60	%
Modelo 8	45,0	30,0	9,0	1,30	<b>119,7</b>	90,0	30,0	18,0	0,70	<b>112,9</b>
Modelo 8*	45,0	30,0	9,0	1,55	%	90,0	30,0	18,0	0,79	<b>6%</b>
Modelo 8	135,0	15,0	27,0	0,06	<b>107,2</b>	180,0	15,0	36,0	0,05	<b>102,6</b>
Modelo 8*	135,0	15,0	27,0	0,06	%	180,0	15,0	36,0	0,05	%
Modelo 8	135,0	22,5	27,0	0,12	<b>107,8</b>	180,0	22,5	36,0	0,10	<b>103,1</b>
Modelo 8*	135,0	22,5	27,0	0,12	%	180,0	22,5	36,0	0,10	%
Modelo 8	135,0	30,0	27,0	0,17	<b>108,6</b>	180,0	30,0	36,0	0,15	<b>103,9</b>
Modelo 8*	135,0	30,0	27,0	0,18	%	180,0	30,0	36,0	0,15	%

Tabla 5.6-4. Comparativo de los modelos 7 y 8 de base cuadrada (24 mallas convencionales y 24 mallas optimizadas\*) para las distintas esbelteces analizadas.

### 5.6.1.2 Resultados comparativo de modelos de base rectangular

En el presente epígrafe se presentan los resultados del estudio comparativo en base a los modelos de base rectangular. En la figura 5.6-7, se muestran algunos de los modelos analizados de acuerdo al estudio comparativo realizado.

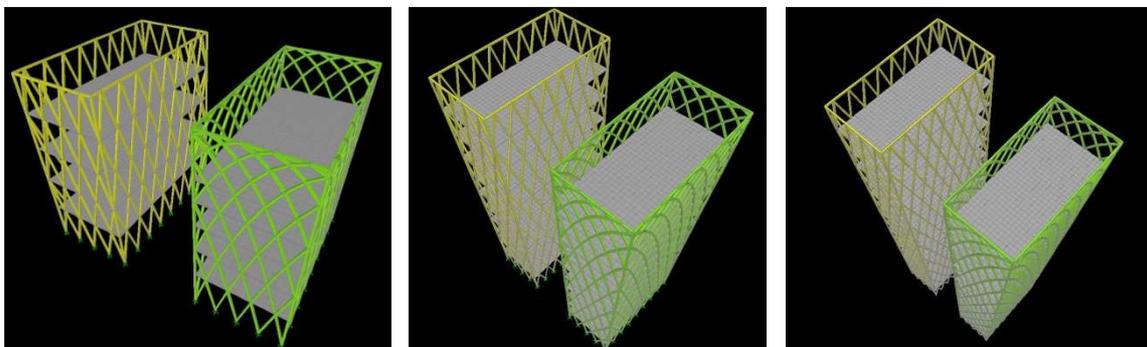


Figura 5.6-7. Geometrías de tres mallas convencionales y tres mallas optimizadas de base rectangular, teniendo en cuenta la trayectoria de las líneas isostáticas y el diseño arquitectónico.

En las figuras 5.6-8, 5.6-9, 5.6-10 y 5.6-11, así como en las tablas 5.6-5, 5.6-6, 5.6-7 y 5.6-8, se muestran los resultados del estudio comparativo de mallas envolventes de edificios en altura de acuerdo a las ocho triangulaciones, para los modelos de base rectangular.

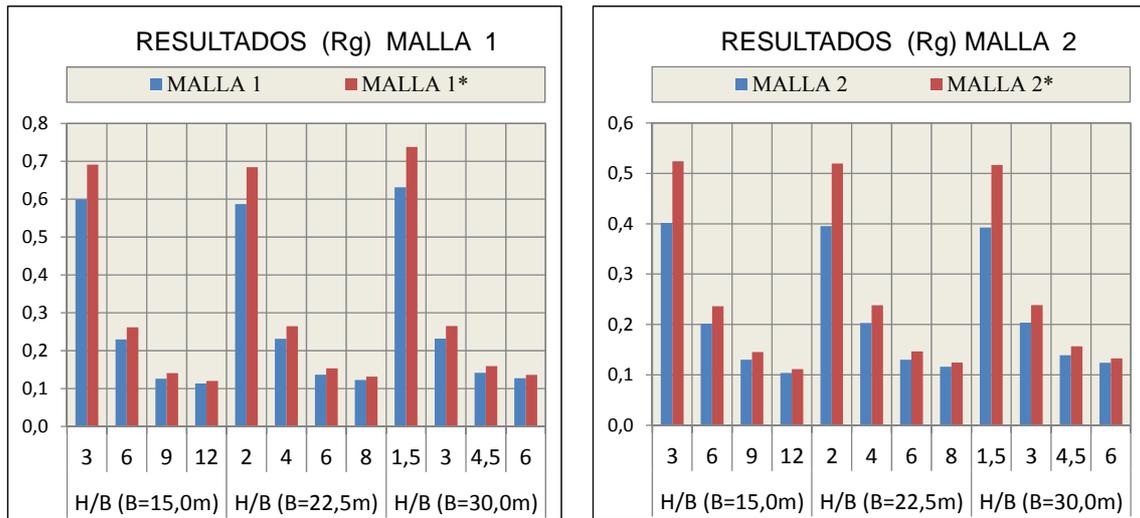


Figura 5.6-8. Comparativo de los modelos 1 y 2 de base rectangular (24 mallas convencionales y 24 mallas optimizadas\*) para las distintas esbelteces analizadas.

Modelo	H (m)	B (m)	$\delta_{max}$ (cm)	R <sub>g</sub>	%	H (m)	B (m)	$\delta_{max}$ (cm)	R <sub>g</sub>	%
Modelo 1	45,0	15,0	9,0	0,60	115,3 %	90,0	15,0	18,0	0,23	114,1 %
Modelo 1*	45,0	15,0	9,0	0,69		90,0	15,0	18,0	0,26	
Modelo 1	45,0	22,5	9,0	0,59	116,6 %	90,0	22,5	18,0	0,23	114,5 %
Modelo 1*	45,0	22,5	9,0	0,68		90,0	22,5	18,0	0,26	
Modelo 1	45,0	30,0	9,0	0,63	116,9 %	90,0	30,0	18,0	0,23	114,5 %
Modelo 1*	45,0	30,0	9,0	0,74		90,0	30,0	18,0	0,26	
Modelo 1	135,0	15,0	27,0	0,13	111,7 %	180,0	15,0	36,0	0,11	106,5 %
Modelo 1*	135,0	15,0	27,0	0,14		180,0	15,0	36,0	0,12	
Modelo 1	135,0	22,5	27,0	0,14	112,2 %	180,0	22,5	36,0	0,12	107,0 %
Modelo 1*	135,0	22,5	27,0	0,15		180,0	22,5	36,0	0,13	
Modelo 1	135,0	30,0	27,0	0,14	112,3 %	180,0	30,0	36,0	0,13	107,0 %
Modelo 1*	135,0	30,0	27,0	0,16		180,0	30,0	36,0	0,14	
Modelo 2	45,0	15,0	9,0	0,40	130,5 %	90,0	15,0	18,0	0,20	117,3 %
Modelo 2*	45,0	15,0	9,0	0,52		90,0	15,0	18,0	0,24	
Modelo 2	45,0	22,5	9,0	0,40	131,3 %	90,0	22,5	18,0	0,20	117,3 %
Modelo 2*	45,0	22,5	9,0	0,52		90,0	22,5	18,0	0,24	
Modelo 2	45,0	30,0	9,0	0,39	131,7 %	90,0	30,0	18,0	0,20	117,2 %
Modelo 2*	45,0	30,0	9,0	0,52		90,0	30,0	18,0	0,24	
Modelo 2	135,0	15,0	27,0	0,13	112,1 %	180,0	15,0	36,0	0,10	107,2 %
Modelo 2*	135,0	15,0	27,0	0,15		180,0	15,0	36,0	0,11	
Modelo 2	135,0	22,5	27,0	0,13	113,0 %	180,0	22,5	36,0	0,12	107,5 %
Modelo 2*	135,0	22,5	27,0	0,15		180,0	22,5	36,0	0,12	
Modelo 2	135,0	30,0	27,0	0,14	112,8 %	180,0	30,0	36,0	0,12	107,3 %
Modelo 2*	135,0	30,0	27,0	0,16		180,0	30,0	36,0	0,13	

Tabla 5.6-5. Comparativo de los modelos 1 y 2 de base rectangular (24 mallas convencionales y 24 mallas optimizadas\*) para las distintas esbelteces analizadas.

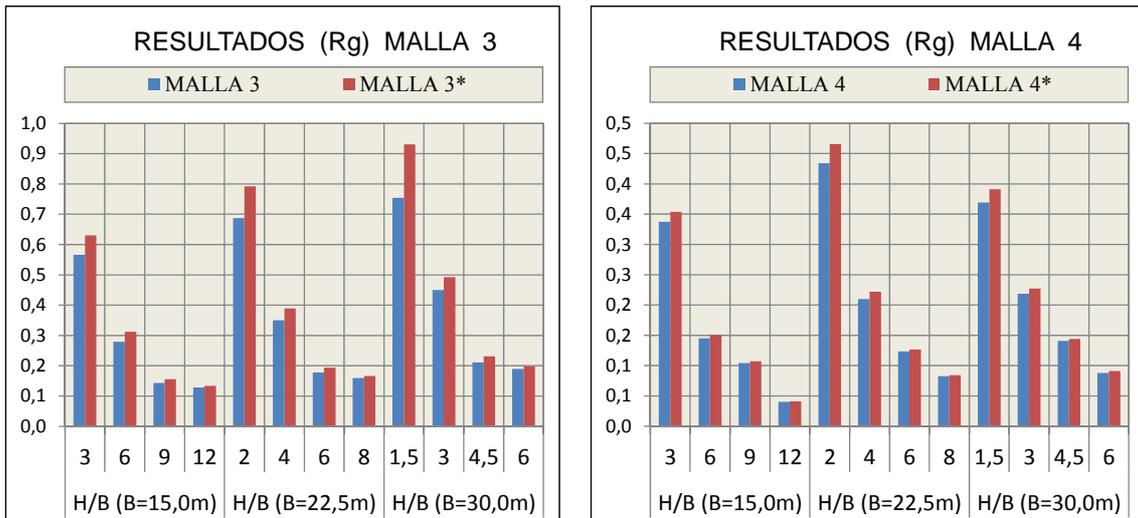


Figura 5.6-9. Comparativo de los modelos 3 y 4 de base rectangular (24 mallas convencionales y 24 mallas optimizadas\*) para las distintas esbelteces analizadas.

Modelo	H (m)	B (m)	$\delta_{max}$ (cm)	R <sub>g</sub>	%	H (m)	B (m)	$\delta_{max}$ (cm)	R <sub>g</sub>	%
Modelo 3	45,0	15,0	9,0	0,57	111,4 %	90,0	15,0	18,0	0,29	112,1 %
Modelo 3*	45,0	15,0	9,0	0,63		90,0	15,0	18,0	0,31	
Modelo 3	45,0	22,5	9,0	0,69	115,3 %	90,0	22,5	18,0	0,35	111,0 %
Modelo 3*	45,0	22,5	9,0	0,79		90,0	22,5	18,0	0,39	
Modelo 3	45,0	30,0	9,0	0,75	123,4 %	90,0	30,0	18,0	0,45	109,4 %
Modelo 3*	45,0	30,0	9,0	0,93		90,0	30,0	18,0	0,49	
Modelo 3	135,0	15,0	27,0	0,14	109,2 %	180,0	15,0	36,0	0,13	104,1 %
Modelo 3*	135,0	15,0	27,0	0,16		180,0	15,0	36,0	0,13	
Modelo 3	135,0	22,5	27,0	0,18	109,1 %	180,0	22,5	36,0	0,16	104,0 %
Modelo 3*	135,0	22,5	27,0	0,19		180,0	22,5	36,0	0,17	
Modelo 3	135,0	30,0	27,0	0,21	109,6 %	180,0	30,0	36,0	0,19	104,5 %
Modelo 3*	135,0	30,0	27,0	0,23		180,0	30,0	36,0	0,20	
Modelo 4	45,0	15,0	9,0	0,38	104,8 %	90,0	15,0	18,0	0,14	103,7 %
Modelo 4*	45,0	15,0	9,0	0,36		90,0	15,0	18,0	0,15	
Modelo 4	45,0	22,5	9,0	0,43	107,2 %	90,0	22,5	18,0	0,21	105,7 %
Modelo 4*	45,0	22,5	9,0	0,47		90,0	22,5	18,0	0,22	
Modelo 4	45,0	30,0	9,0	0,37	105,9 %	90,0	30,0	18,0	0,22	104,0 %
Modelo 4*	45,0	30,0	9,0	0,39		90,0	30,0	18,0	0,23	
Modelo 4	135,0	15,0	27,0	0,10	102,9 %	180,0	15,0	36,0	0,04	101,5 %
Modelo 4*	135,0	15,0	27,0	0,11		180,0	15,0	36,0	0,04	
Modelo 4	135,0	22,5	27,0	0,12	102,8 %	180,0	22,5	36,0	0,08	102,0 %
Modelo 4*	135,0	22,5	27,0	0,13		180,0	22,5	36,0	0,08	
Modelo 4	135,0	30,0	27,0	0,14	102,5 %	180,0	30,0	36,0	0,09	103,9 %
Modelo 4*	135,0	30,0	27,0	0,14		180,0	30,0	36,0	0,09	

Tabla 5.6-6. Comparativo de los modelos 3 y 4 de base rectangular (24 mallas convencionales y 24 mallas optimizadas\*) para las distintas esbelteces analizadas.

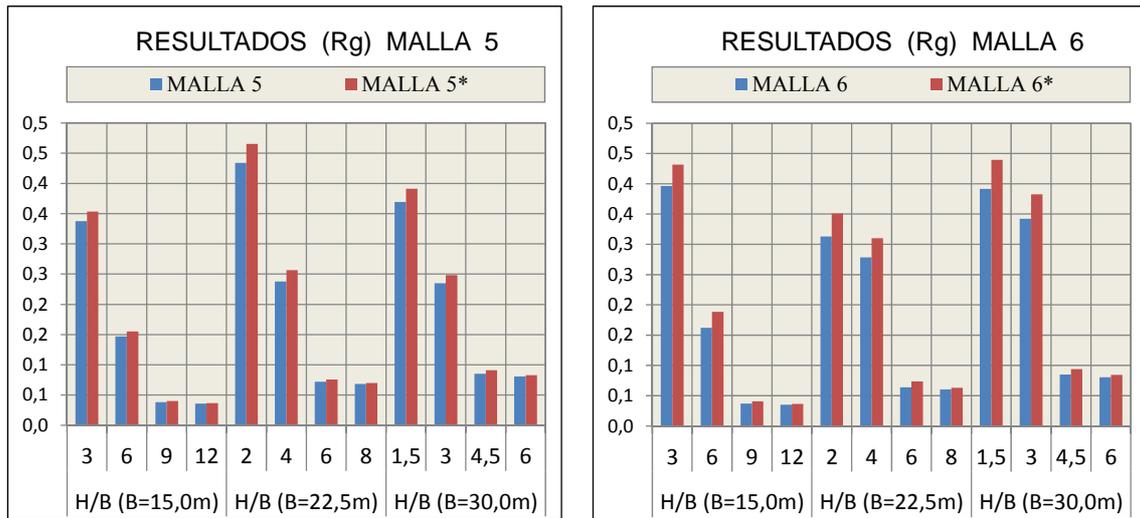


Figura 5.6-10. Comparativo de los modelos 5 y 6 de base rectangular (24 mallas convencionales y 24 mallas optimizadas\*) para las distintas esbelteces analizadas.

Modelo	H (m)	B (m)	$\delta_{max}$ (cm)	$R_g$	%	H (m)	B (m)	$\delta_{max}$ (cm)	$R_g$	%
Modelo 5	45,0	15,0	9,0	0,34	104,8 %	90,0	15,0	18,0	0,15	105,5 %
Modelo 5*	45,0	15,0	9,0	0,35		90,0	15,0	18,0	0,17	
Modelo 5	45,0	22,5	9,0	0,43	107,2 %	90,0	22,5	18,0	0,24	107,9 %
Modelo 5*	45,0	22,5	9,0	0,47		90,0	22,5	18,0	0,26	
Modelo 5	45,0	30,0	9,0	0,37	105,9 %	90,0	30,0	18,0	0,24	105,7 %
Modelo 5*	45,0	30,0	9,0	0,39		90,0	30,0	18,0	0,25	
Modelo 5	135,0	15,0	27,0	0,04	105,0 %	180,0	15,0	36,0	0,04	101,5 %
Modelo 5*	135,0	15,0	27,0	0,04		180,0	15,0	36,0	0,04	
Modelo 5	135,0	22,5	27,0	0,07	105,0 %	180,0	22,5	36,0	0,08	102,0 %
Modelo 5*	135,0	22,5	27,0	0,08		180,0	22,5	36,0	0,08	
Modelo 5	135,0	30,0	27,0	0,08	106,9 %	180,0	30,0	36,0	0,13	102,8 %
Modelo 5*	135,0	30,0	27,0	0,09		180,0	30,0	36,0	0,13	
Modelo 6	45,0	15,0	9,0	0,40	108,9 %	90,0	15,0	18,0	0,16	116,2 %
Modelo 6*	45,0	15,0	9,0	0,43		90,0	15,0	18,0	0,23	
Modelo 6	45,0	22,5	9,0	0,31	112,1 %	90,0	22,5	18,0	0,28	111,3 %
Modelo 6*	45,0	22,5	9,0	0,35		90,0	22,5	18,0	0,31	
Modelo 6	45,0	30,0	9,0	0,39	112,2 %	90,0	30,0	18,0	0,34	111,8 %
Modelo 6*	45,0	30,0	9,0	0,44		90,0	30,0	18,0	0,38	
Modelo 6	135,0	15,0	27,0	0,04	110,3 %	180,0	15,0	36,0	0,03	104,9 %
Modelo 6*	135,0	15,0	27,0	0,04		180,0	15,0	36,0	0,04	
Modelo 6	135,0	22,5	27,0	0,06	115,5 %	180,0	22,5	36,0	0,06	109,9 %
Modelo 6*	135,0	22,5	27,0	0,07		180,0	22,5	36,0	0,07	
Modelo 6	135,0	30,0	27,0	0,08	110,5 %	180,0	30,0	36,0	0,08	105,2 %
Modelo 6*	135,0	30,0	27,0	0,09		180,0	30,0	36,0	0,08	

Tabla 5.6-7. Comparativo de los modelos 5 y 6 de base rectangular (24 mallas convencionales y 24 mallas optimizadas\*) para las distintas esbelteces analizadas.

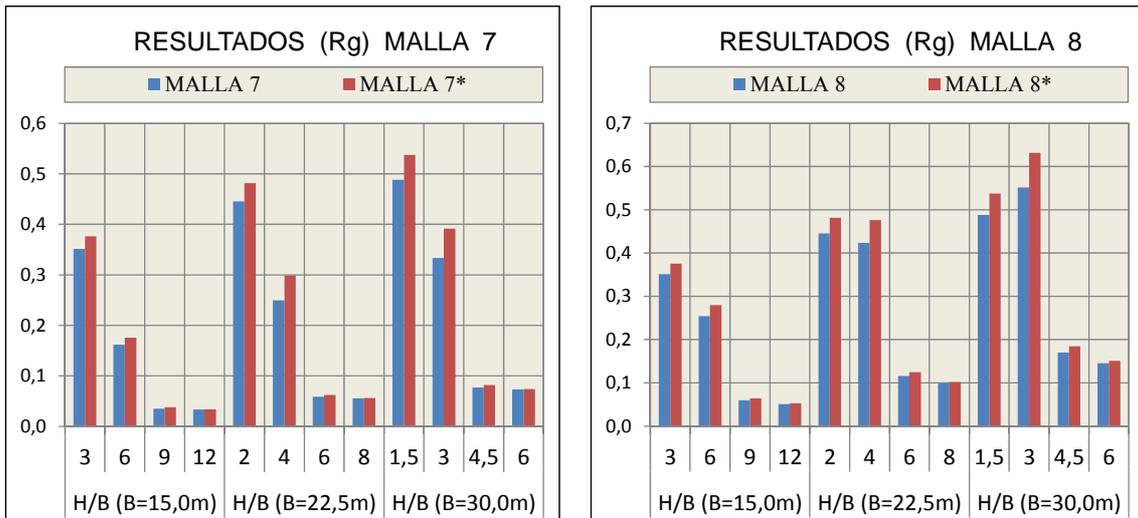


Figura 5.6-11. Comparativo de los modelos 7 y 8 de base rectangular (24 mallas convencionales y 24 mallas optimizadas\*) para las distintas esbelteces analizadas.

Modelo	H (m)	B (m)	$\delta_{max}$ (cm)	R <sub>g</sub>	%	H (m)	B (m)	$\delta_{max}$ (cm)	R <sub>g</sub>	%
Modelo 7	45,0	15,0	9,0	0,35	106,7 %	90,0	15,0	18,0	0,20	107,2 %
Modelo 7*	45,0	15,0	9,0	0,38		90,0	15,0	18,0	0,22	
Modelo 7	45,0	22,5	9,0	0,45	105,7 %	90,0	22,5	18,0	0,32	117,8 %
Modelo 7*	45,0	22,5	9,0	0,48		90,0	22,5	18,0	0,37	
Modelo 7	45,0	30,0	9,0	0,49	106,4 %	90,0	30,0	18,0	0,42	115,9 %
Modelo 7*	45,0	30,0	9,0	0,54		90,0	30,0	18,0	0,49	
Modelo 7	135,0	15,0	27,0	0,04	106,2 %	180,0	15,0	36,0	0,03	104,9 %
Modelo 7*	135,0	15,0	27,0	0,04		180,0	15,0	36,0	0,04	
Modelo 7	135,0	22,5	27,0	0,06	105,2 %	180,0	22,5	36,0	0,06	104,2 %
Modelo 7*	135,0	22,5	27,0	0,06		180,0	22,5	36,0	0,06	
Modelo 7	135,0	30,0	27,0	0,08	105,8 %	180,0	30,0	36,0	0,08	105,2 %
Modelo 7*	135,0	30,0	27,0	0,08		180,0	30,0	36,0	0,08	
Modelo 8	45,0	15,0	9,0	0,35	106,9 %	90,0	15,0	18,0	0,25	110,1 %
Modelo 8*	45,0	15,0	9,0	0,38		90,0	15,0	18,0	0,28	
Modelo 8	45,0	22,5	9,0	0,45	108,1 %	90,0	22,5	18,0	0,42	112,5 %
Modelo 8*	45,0	22,5	9,0	0,48		90,0	22,5	18,0	0,48	
Modelo 8	45,0	30,0	9,0	0,49	110,1 %	90,0	30,0	18,0	0,55	114,5 %
Modelo 8*	45,0	30,0	9,0	0,54		90,0	30,0	18,0	0,63	
Modelo 8	135,0	15,0	27,0	0,06	107,1 %	180,0	15,0	36,0	0,04	102,8 %
Modelo 8*	135,0	15,0	27,0	0,06		180,0	15,0	36,0	0,04	
Modelo 8	135,0	22,5	27,0	0,12	106,3 %	180,0	22,5	36,0	0,09	103,1 %
Modelo 8*	135,0	22,5	27,0	0,12		180,0	22,5	36,0	0,09	
Modelo 8	135,0	30,0	27,0	0,17	107,6 %	180,0	30,0	36,0	0,14	102,9 %
Modelo 8*	135,0	30,0	27,0	0,18		180,0	30,0	36,0	0,14	

Tabla 5.6-8. Comparativo de los modelos 7 y 8 de base rectangular (24 mallas convencionales y 24 mallas optimizadas\*) para las distintas esbelteces analizadas.

### 5.6.1.3 *Resultados comparativo de modelos de base triangular*

En el presente epígrafe se presentan los resultados del estudio comparativo en base a los modelos de base triangular. En la figura 5.6-12, se muestran algunos de los modelos analizados de acuerdo al estudio comparativo realizado.

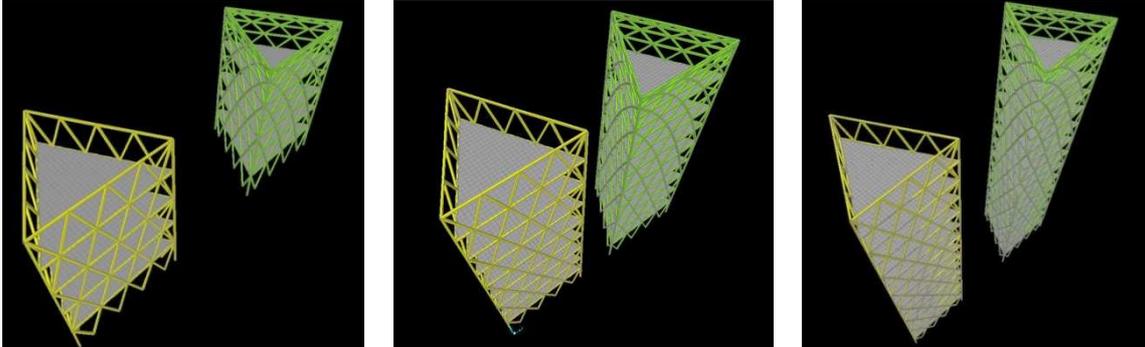


Figura 5.6-12. Geometrías de tres mallas convencionales y tres mallas optimizadas de base triangular, teniendo en cuenta la trayectoria de las líneas isostáticas y el diseño arquitectónico.

En las figuras 5.6-13, 5.6-14, 5.6-15 y 5.6-16, así como en las tablas 5.6-9, 5.6-10, 5.6-11 y 5.6-12, se muestran los resultados del estudio comparativo de mallas envolventes de edificios en altura de acuerdo a las ocho triangulaciones, para los modelos de base triangular.

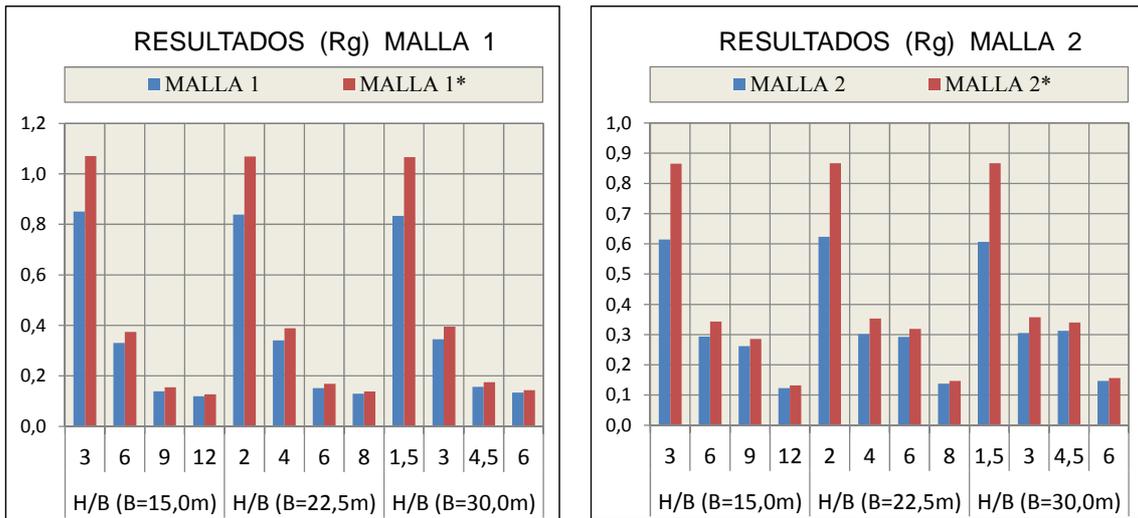


Figura 5.6-13. Comparativo de los modelos 1 y 2 de base triangular (24 mallas convencionales y 24 mallas optimizadas\*) para las distintas esbelteces analizadas.

Modelo	H (m)	B (m)	$\delta_{max}$ (cm)	$R_g$	%	H (m)	B (m)	$\delta_{max}$ (cm)	$R_g$	%
Modelo 1	45,0	15,0	9,0	0,85	<b>125,8</b>	90,0	15,0	18,0	0,33	<b>113,2</b>
Modelo 1*	45,0	15,0	9,0	1,07	%	90,0	15,0	18,0	0,37	<b>5</b>
Modelo 1	45,0	22,5	9,0	0,84	<b>127,4</b>	90,0	22,5	18,0	0,34	<b>114,2</b>
Modelo 1*	45,0	22,5	9,0	1,07	%	90,0	22,5	18,0	0,39	%
Modelo 1	45,0	30,0	9,0	0,84	<b>127,9</b>	90,0	30,0	18,0	0,35	<b>114,3</b>
Modelo 1*	45,0	30,0	9,0	1,07	%	90,0	30,0	18,0	0,39	%
Modelo 1	135,0	15,0	27,0	0,14	<b>111,2</b>	180,0	15,0	36,0	0,12	<b>106,2</b>
Modelo 1*	135,0	15,0	27,0	0,16	%	180,0	15,0	36,0	0,13	%
Modelo 1	135,0	22,5	27,0	0,15	<b>111,8</b>	180,0	22,5	36,0	0,13	<b>106,9</b>
Modelo 1*	135,0	22,5	27,0	0,17	%	180,0	22,5	36,0	0,14	%
Modelo 1	135,0	30,0	27,0	0,16	<b>111,6</b>	180,0	30,0	36,0	0,13	<b>107,0</b>
Modelo 1*	135,0	30,0	27,0	0,18	%	180,0	30,0	36,0	0,14	%
Modelo 2	45,0	15,0	9,0	0,615	<b>140,8</b>	90,0	15,0	18,0	0,29	<b>116,8</b>
Modelo 2*	45,0	15,0	9,0	0,87	%	90,0	15,0	18,0	0,34	%
Modelo 2	45,0	22,5	9,0	0,62	<b>139,0</b>	90,0	22,5	18,0	0,30	<b>117,1</b>
Modelo 2*	45,0	22,5	9,0	0,87	%	90,0	22,5	18,0	0,35	%
Modelo 2	45,0	30,0	9,0	0,61	<b>142,8</b>	90,0	30,0	18,0	0,31	<b>117,1</b>
Modelo 2*	45,0	30,0	9,0	0,87	%	90,0	30,0	18,0	0,36	%
Modelo 2	135,0	15,0	27,0	0,26	<b>108,6</b>	180,0	15,0	36,0	0,12	<b>106,5</b>
Modelo 2*	135,0	15,0	27,0	0,29	%	180,0	15,0	36,0	0,13	%
Modelo 2	135,0	22,5	27,0	0,29	<b>109,0</b>	180,0	22,5	36,0	0,14	<b>107,0</b>
Modelo 2*	135,0	22,5	27,0	0,32	%	180,0	22,5	36,0	0,15	%
Modelo 2	135,0	30,0	27,0	0,31	<b>108,8</b>	180,0	30,0	36,0	0,15	<b>107,1</b>
Modelo 2*	135,0	30,0	27,0	0,34	%	180,0	30,0	36,0	0,16	%

Tabla 5.6-9. Comparativo de los modelos 1 y 2 de base triangular (24 mallas convencionales y 24 mallas optimizadas\*) para las distintas esbelteces analizadas.

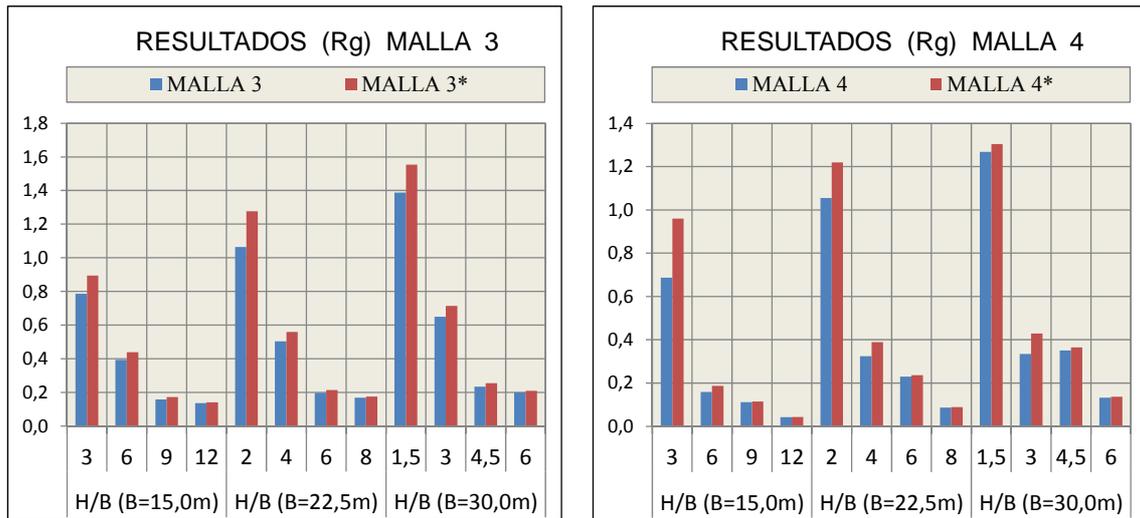


Figura 5.6-14. Comparativo de los modelos 3 y 4 de base triangular (24 mallas convencionales y 24 mallas optimizadas\*) para las distintas esbelteces analizadas.

Modelo	H (m)	B (m)	$\delta_{max}$ (cm)	$R_g$	%	H (m)	B (m)	$\delta_{max}$ (cm)	$R_g$	%
Modelo 3	45,0	15,0	9,0	0,77	<b>113,9 %</b>	90,0	15,0	18,0	0,39	<b>111,9 %</b>
Modelo 3*	45,0	15,0	9,0	0,89		90,0	15,0	18,0	0,44	
Modelo 3	45,0	22,5	9,0	1,06	<b>120,0 %</b>	90,0	22,5	18,0	0,50	<b>111,3 %</b>
Modelo 3*	45,0	22,5	9,0	1,28		90,0	22,5	18,0	0,56	
Modelo 3	45,0	30,0	9,0	1,39	<b>112,0 %</b>	90,0	30,0	18,0	0,65	<b>109,7 %</b>
Modelo 3*	45,0	30,0	9,0	1,55		90,0	30,0	18,0	0,71	
Modelo 3	135,0	15,0	27,0	0,16	<b>108,6 %</b>	180,0	15,0	36,0	0,14	<b>103,7 %</b>
Modelo 3*	135,0	15,0	27,0	0,17		180,0	15,0	36,0	0,14	
Modelo 3	135,0	22,5	27,0	0,20	<b>108,4 %</b>	180,0	22,5	36,0	0,17	<b>103,7 %</b>
Modelo 3*	135,0	22,5	27,0	0,21		180,0	22,5	36,0	0,18	
Modelo 3	135,0	30,0	27,0	0,23	<b>109,2 %</b>	180,0	30,0	36,0	0,20	<b>104,5 %</b>
Modelo 3*	135,0	30,0	27,0	0,25		180,0	30,0	36,0	0,21	
Modelo 4	45,0	15,0	9,0	0,69	<b>139,6 %</b>	90,0	15,0	18,0	0,16	<b>117,4 %</b>
Modelo 4*	45,0	15,0	9,0	0,96		90,0	15,0	18,0	0,19	
Modelo 4	45,0	22,5	9,0	1,06	<b>115,6 %</b>	90,0	22,5	18,0	0,31	<b>120,1 %</b>
Modelo 4*	45,0	22,5	9,0	1,22		90,0	22,5	18,0	0,39	
Modelo 4	45,0	30,0	9,0	1,27	<b>121,2 %</b>	90,0	30,0	18,0	0,33	<b>128,5 %</b>
Modelo 4*	45,0	30,0	9,0	1,30		90,0	30,0	18,0	0,43	
Modelo 4	135,0	15,0	27,0	0,11	<b>102,8 %</b>	180,0	15,0	36,0	0,04	<b>101,5 %</b>
Modelo 4*	135,0	15,0	27,0	0,11		180,0	15,0	36,0	0,04	
Modelo 4	135,0	22,5	27,0	0,23	<b>102,9 %</b>	180,0	22,5	36,0	0,09	<b>101,9 %</b>
Modelo 4*	135,0	22,5	27,0	0,24		180,0	22,5	36,0	0,09	
Modelo 4	135,0	30,0	27,0	0,35	<b>104,2 %</b>	180,0	30,0	36,0	0,13	<b>102,9 %</b>
Modelo 4*	135,0	30,0	27,0	0,36		180,0	30,0	36,0	0,14	

Tabla 5.6-10. Comparativo de los modelos 3 y 4 de base triangular (24 mallas convencionales y 24 mallas optimizadas\*) para las distintas esbelteces analizadas.

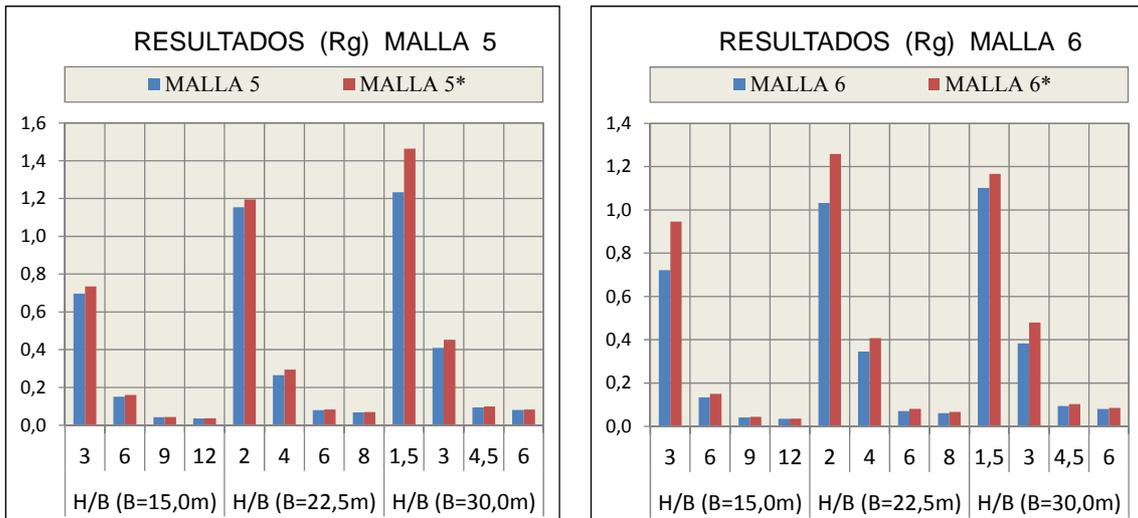


Figura 5.6-15. Comparativo de los modelos 5 y 6 de base triangular (24 mallas convencionales y 24 mallas optimizadas\*) para las distintas esbelteces analizadas.

Modelo	H (m)	B (m)	$\delta_{max}$ (cm)	$R_g$	%	H (m)	B (m)	$\delta_{max}$ (cm)	$R_g$	%
Modelo 5	45,0	15,0	9,0	0,67	105,6 %	90,0	15,0	18,0	0,15	105,6 %
Modelo 5*	45,0	15,0	9,0	0,74		90,0	15,0	18,0	0,16	
Modelo 5	45,0	22,5	9,0	1,15	103,7 %	90,0	22,5	18,0	0,27	111,0 %
Modelo 5*	45,0	22,5	9,0	1,19		90,0	22,5	18,0	0,30	
Modelo 5	45,0	30,0	9,0	1,23	118,7 %	90,0	30,0	18,0	0,41	110,4 %
Modelo 5*	45,0	30,0	9,0	1,46		90,0	30,0	18,0	0,45	
Modelo 5	135,0	15,0	27,0	0,04	104,7 %	180,0	15,0	36,0	0,04	102,3 %
Modelo 5*	135,0	15,0	27,0	0,04		180,0	15,0	36,0	0,04	
Modelo 5	135,0	22,5	27,0	0,08	104,4 %	180,0	22,5	36,0	0,07	102,2 %
Modelo 5*	135,0	22,5	27,0	0,08		180,0	22,5	36,0	0,07	
Modelo 5	135,0	30,0	27,0	0,09	106,3 %	180,0	30,0	36,0	0,08	103,0 %
Modelo 5*	135,0	30,0	27,0	0,10		180,0	30,0	36,0	0,08	
Modelo 6	45,0	15,0	9,0	0,72	130,9 %	90,0	15,0	18,0	0,13	112,6 %
Modelo 6*	45,0	15,0	9,0	0,95		90,0	15,0	18,0	0,15	
Modelo 6	45,0	22,5	9,0	1,03	121,8 %	90,0	22,5	18,0	0,35	117,8 %
Modelo 6*	45,0	22,5	9,0	1,26		90,0	22,5	18,0	0,41	
Modelo 6	45,0	30,0	9,0	1,10	105,9 %	90,0	30,0	18,0	0,38	125,2 %
Modelo 6*	45,0	30,0	9,0	1,17		90,0	30,0	18,0	0,48	
Modelo 6	135,0	15,0	27,0	0,04	109,8 %	180,0	15,0	36,0	0,03	104,9 %
Modelo 6*	135,0	15,0	27,0	0,04		180,0	15,0	36,0	0,04	
Modelo 6	135,0	22,5	27,0	0,07	114,7 %	180,0	22,5	36,0	0,06	109,8 %
Modelo 6*	135,0	22,5	27,0	0,08		180,0	22,5	36,0	0,07	
Modelo 6	135,0	30,0	27,0	0,09	109,9 %	180,0	30,0	36,0	0,08	105,1 %
Modelo 6*	135,0	30,0	27,0	0,10		180,0	30,0	36,0	0,08	

Tabla 5.6-11. Comparativo de los modelos 5 y 6 de base triangular (24 mallas convencionales y 24 mallas optimizadas\*) para las distintas esbelteces analizadas.

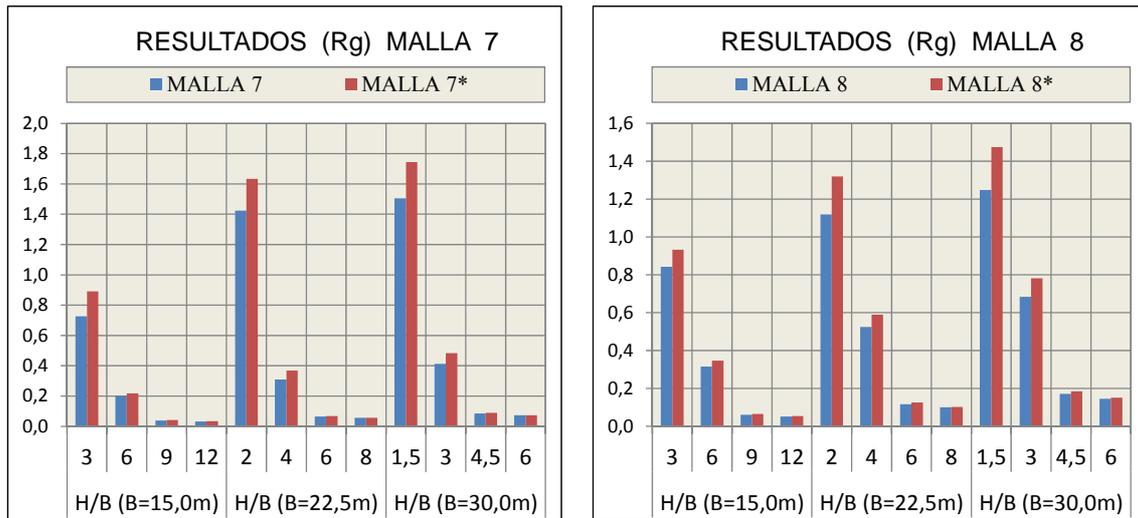


Figura 5.6-16. Comparativo de los modelos 7 y 8 de base triangular (24 mallas convencionales y 24 mallas optimizadas\*) para las distintas esbelteces analizadas.

Modelo	H (m)	B (m)	$\delta_{max}$ (cm)	$R_g$	%	H (m)	B (m)	$\delta_{max}$ (cm)	$R_g$	%
Modelo 7	45,0	15,0	9,0	0,73	<b>122,7 %</b>	90,0	15,0	18,0	0,20	<b>108,5 %</b>
Modelo 7*	45,0	15,0	9,0	0,89		90,0	15,0	18,0	0,22	
Modelo 7	45,0	22,5	9,0	1,42	<b>114,7 %</b>	90,0	22,5	18,0	0,31	<b>119,2 %</b>
Modelo 7*	45,0	22,5	9,0	1,63		90,0	22,5	18,0	0,37	
Modelo 7	45,0	30,0	9,0	1,51	<b>115,9 %</b>	90,0	30,0	18,0	0,41	<b>117,4 %</b>
Modelo 7*	45,0	30,0	9,0	1,74		90,0	30,0	18,0	0,48	
Modelo 7	135,0	15,0	27,0	0,04	<b>106,1 %</b>	180,0	15,0	36,0	0,03	<b>101,7 %</b>
Modelo 7*	135,0	15,0	27,0	0,04		180,0	15,0	36,0	0,03	
Modelo 7	135,0	22,5	27,0	0,07	<b>105,3 %</b>	180,0	22,5	36,0	0,06	<b>100,8 %</b>
Modelo 7*	135,0	22,5	27,0	0,07		180,0	22,5	36,0	0,06	
Modelo 7	135,0	30,0	27,0	0,09	<b>105,6 %</b>	180,0	30,0	36,0	0,07	<b>101,2 %</b>
Modelo 7*	135,0	30,0	27,0	0,09		180,0	30,0	36,0	0,07	
Modelo 8	45,0	15,0	9,0	0,84	<b>110,8 %</b>	90,0	15,0	18,0	0,31	<b>109,9 %</b>
Modelo 8*	45,0	15,0	9,0	0,93		90,0	15,0	18,0	0,35	
Modelo 8	45,0	22,5	9,0	1,12	<b>117,9 %</b>	90,0	22,5	18,0	0,52	<b>122,3 %</b>
Modelo 8*	45,0	22,5	9,0	1,32		90,0	22,5	18,0	0,59	
Modelo 8	45,0	30,0	9,0	1,25	<b>118,2 %</b>	90,0	30,0	18,0	0,68	<b>114,3 %</b>
Modelo 8*	45,0	30,0	9,0	1,47		90,0	30,0	18,0	0,78	
Modelo 8	135,0	15,0	27,0	0,06	<b>107,4 %</b>	180,0	15,0	36,0	0,05	<b>102,8 %</b>
Modelo 8*	135,0	15,0	27,0	0,06		180,0	15,0	36,0	0,05	
Modelo 8	135,0	22,5	27,0	0,12	<b>107,6 %</b>	180,0	22,5	36,0	0,10	<b>103,7 %</b>
Modelo 8*	135,0	22,5	27,0	0,12		180,0	22,5	36,0	0,10	
Modelo 8	135,0	30,0	27,0	0,17	<b>108,2 %</b>	180,0	30,0	36,0	0,15	<b>104,0 %</b>
Modelo 8*	135,0	30,0	27,0	0,18		180,0	30,0	36,0	0,15	

Tabla 5.6-12. Comparativo de los modelos 7 y 8 de base triangular (24 mallas convencionales y 24 mallas optimizadas\*) para las distintas esbelteces analizadas.

#### 5.6.1.4 Resultados comparativo de modelos de base circular/poligonal

En el presente epígrafe se presentan los resultados del estudio comparativo en base a los modelos de base circular/poligonal. En la figura 5.6-17, se muestran algunos de los modelos analizados de acuerdo al estudio comparativo realizado.

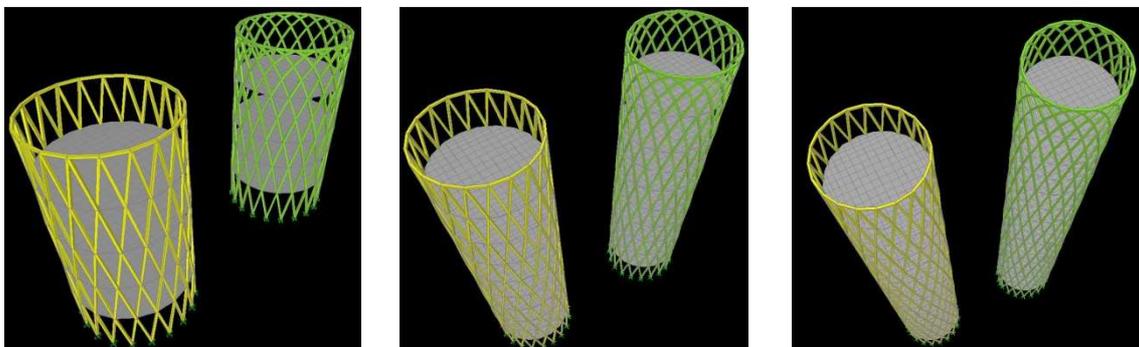


Figura 5.6-17. Geometrías de tres mallas convencionales y tres mallas optimizadas de base circular/poligonal, teniendo en cuenta la trayectoria de las líneas isostáticas y el diseño arquitectónico.

En las figuras 5.6-18, 5.6-19, 5.6-20 y 5.6-21, así como en las tablas 5.6-13, 5.6-14, 5.6-15 y 5.6-16, se muestran los resultados del estudio comparativo de mallas envolventes de edificios en altura de acuerdo a las ocho triangulaciones, para los modelos de base rectangular.

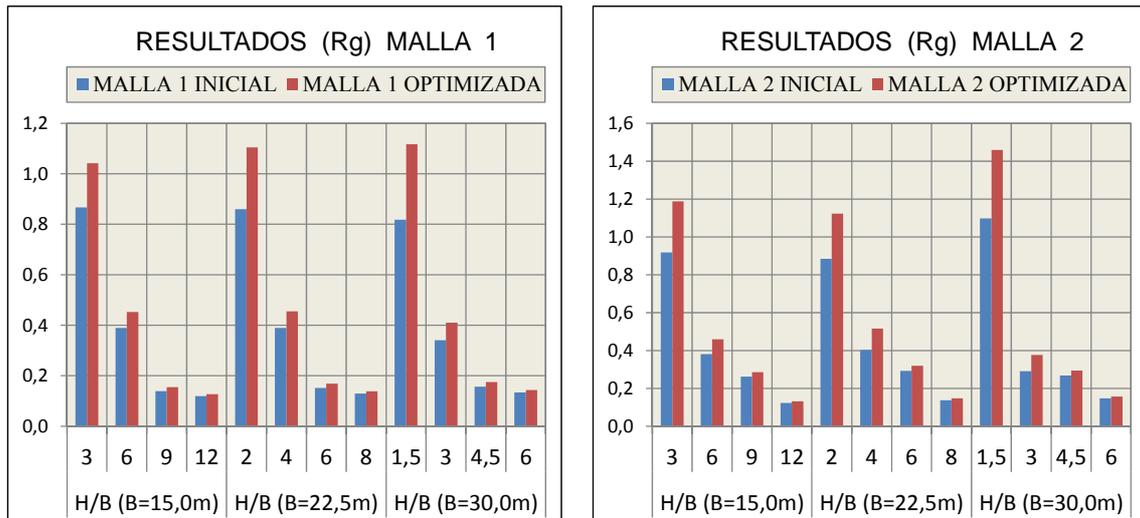


Figura 5.6-18. Comparativo de los modelos 1 y 2 de base circular/poligonal (24 mallas convencionales y 24 mallas optimizadas\*) para las distintas esbelteces analizadas.

Modelo	H (m)	B (m)	$\delta_{max}$ (cm)	R <sub>g</sub>	%	H (m)	B (m)	$\delta_{max}$ (cm)	R <sub>g</sub>	%
Modelo 1	45,0	15,0	9,0	0,87	<b>120,3</b>	90,0	15,0	18,0	0,39	<b>116,2</b>
Modelo 1*	45,0	15,0	9,0	1,04	%	90,0	15,0	18,0	0,45	%
Modelo 1	45,0	22,5	9,0	0,86	<b>128,5</b>	90,0	22,5	18,0	0,39	<b>116,8</b>
Modelo 1*	45,0	22,5	9,0	1,10	%	90,0	22,5	18,0	0,46	%
Modelo 1	45,0	30,0	9,0	0,82	<b>136,5</b>	90,0	30,0	18,0	0,34	<b>120,4</b>
Modelo 1*	45,0	30,0	9,0	1,12	%	90,0	30,0	18,0	0,41	%
Modelo 1	135,0	15,0	27,0	0,13	<b>111,5</b>	180,0	15,0	36,0	0,11	<b>106,8</b>
Modelo 1*	135,0	15,0	27,0	0,14	%	180,0	15,0	36,0	0,12	%
Modelo 1	135,0	22,5	27,0	0,14	<b>112,5</b>	180,0	22,5	36,0	0,12	<b>106,8</b>
Modelo 1*	135,0	22,5	27,0	0,15	%	180,0	22,5	36,0	0,13	%
Modelo 1	135,0	30,0	27,0	0,14	<b>112,7</b>	180,0	30,0	36,0	0,13	<b>107,4</b>
Modelo 1*	135,0	30,0	27,0	0,16	%	180,0	30,0	36,0	0,14	%
Modelo 2	45,0	15,0	9,0	0,92	<b>129,4</b>	90,0	15,0	18,0	0,38	<b>120,6</b>
Modelo 2*	45,0	15,0	9,0	1,19	%	90,0	15,0	18,0	0,46	%
Modelo 2	45,0	22,5	9,0	0,88	<b>127,1</b>	90,0	22,5	18,0	0,40	<b>127,8</b>
Modelo 2*	45,0	22,5	9,0	1,12	%	90,0	22,5	18,0	0,52	%
Modelo 2	45,0	30,0	9,0	1,10	<b>132,9</b>	90,0	30,0	18,0	0,29	<b>129,7</b>
Modelo 2*	45,0	30,0	9,0	1,46	%	90,0	30,0	18,0	0,38	%
Modelo 2	135,0	15,0	27,0	0,24	<b>109,3</b>	180,0	15,0	36,0	0,12	<b>106,4</b>
Modelo 2*	135,0	15,0	27,0	0,27	%	180,0	15,0	36,0	0,12	%
Modelo 2	135,0	22,5	27,0	0,27	<b>109,9</b>	180,0	22,5	36,0	0,13	<b>107,2</b>
Modelo 2*	135,0	22,5	27,0	0,30	%	180,0	22,5	36,0	0,14	%
Modelo 2	135,0	30,0	27,0	0,29	<b>109,5</b>	180,0	30,0	36,0	0,14	<b>107,0</b>
Modelo 2*	135,0	30,0	27,0	0,32	%	180,0	30,0	36,0	0,15	%

Tabla 5.6-13. Comparativo de los modelos 1 y 2 de base circular/poligonal (24 mallas convencionales y 24 mallas optimizadas\*) para las distintas esbelteces analizadas.

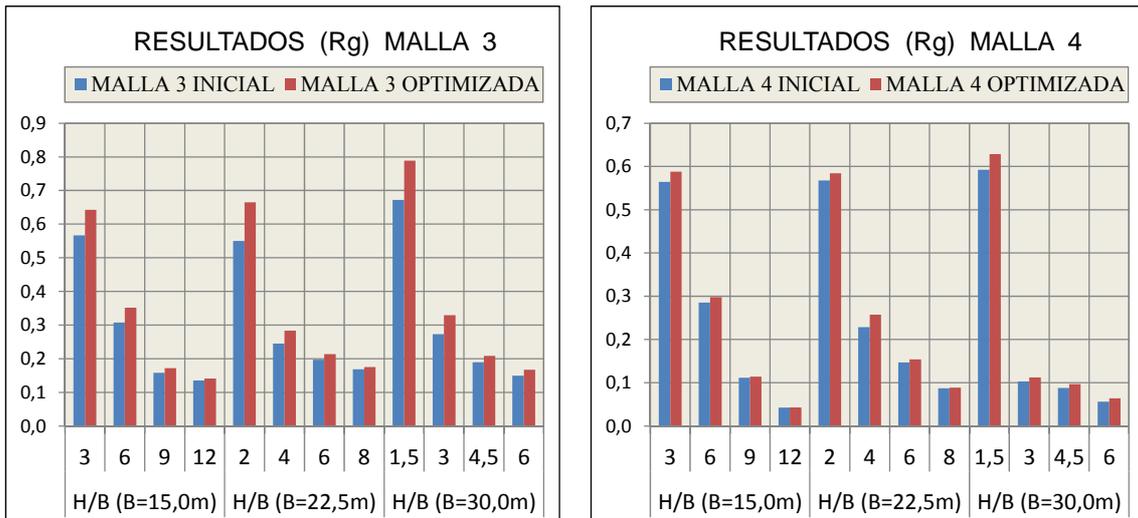


Figura 5.6-19. Comparativo de los modelos 3 y 4 de base circular/poligonal (24 mallas convencionales y 24 mallas optimizadas\*) para las distintas esbelteces analizadas.

Modelo	H (m)	B (m)	$\delta_{max}$ (cm)	R <sub>g</sub>	%	H (m)	B (m)	$\delta_{max}$ (cm)	R <sub>g</sub>	%
Modelo 3	45,0	15,0	9,0	0,57	113,4 %	90,0	15,0	18,0	0,31	114,3 %
Modelo 3*	45,0	15,0	9,0	0,64		90,0	15,0	18,0	0,35	
Modelo 3	45,0	22,5	9,0	0,55	120,9 %	90,0	22,5	18,0	0,28	115,7 %
Modelo 3*	45,0	22,5	9,0	0,66		90,0	22,5	18,0	0,32	
Modelo 3	45,0	30,0	9,0	0,67	117,4 %	90,0	30,0	18,0	0,27	120,6 %
Modelo 3*	45,0	30,0	9,0	0,79		90,0	30,0	18,0	0,33	
Modelo 3	135,0	15,0	27,0	0,14	109,5 %	180,0	15,0	36,0	0,13	104,0 %
Modelo 3*	135,0	15,0	27,0	0,16		180,0	15,0	36,0	0,13	
Modelo 3	135,0	22,5	27,0	0,18	109,8 %	180,0	22,5	36,0	0,16	105,0 %
Modelo 3*	135,0	22,5	27,0	0,19		180,0	22,5	36,0	0,17	
Modelo 3	135,0	30,0	27,0	0,21	109,6 %	180,0	30,0	36,0	0,19	104,8 %
Modelo 3*	135,0	30,0	27,0	0,23		180,0	30,0	36,0	0,20	
Modelo 4	45,0	15,0	9,0	0,57	104,1 %	90,0	15,0	18,0	0,29	104,4 %
Modelo 4*	45,0	15,0	9,0	0,59		90,0	15,0	18,0	0,30	
Modelo 4	45,0	22,5	9,0	0,57	103,0 %	90,0	22,5	18,0	0,23	112,4 %
Modelo 4*	45,0	22,5	9,0	0,59		90,0	22,5	18,0	0,26	
Modelo 4	45,0	30,0	9,0	0,59	106,0 %	90,0	30,0	18,0	0,10	108,8 %
Modelo 4*	45,0	30,0	9,0	0,63		90,0	30,0	18,0	0,11	
Modelo 4	135,0	15,0	27,0	0,10	103,1 %	180,0	15,0	36,0	0,04	101,8 %
Modelo 4*	135,0	15,0	27,0	0,11		180,0	15,0	36,0	0,04	
Modelo 4	135,0	22,5	27,0	0,21	103,7 %	180,0	22,5	36,0	0,08	102,0 %
Modelo 4*	135,0	22,5	27,0	0,22		180,0	22,5	36,0	0,08	
Modelo 4	135,0	30,0	27,0	0,33	104,8 %	180,0	30,0	36,0	0,13	103,4 %
Modelo 4*	135,0	30,0	27,0	0,34		180,0	30,0	36,0	0,13	

Tabla 5.6-14. Comparativo de los modelos 3 y 4 de base circular/poligonal (24 mallas convencionales y 24 mallas optimizadas\*) para las distintas esbelteces analizadas.

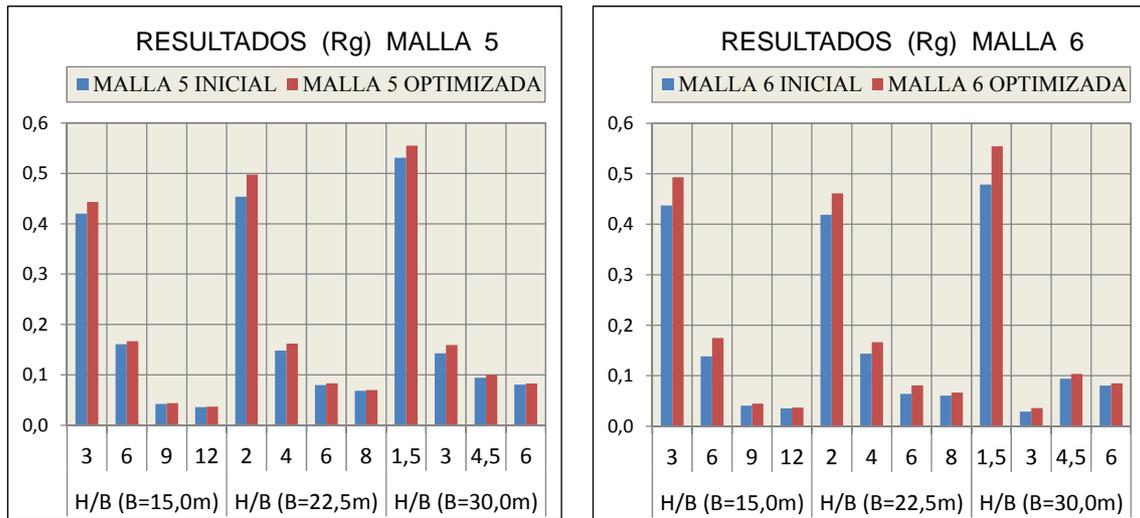


Figura 5.6-20. Comparativo de los modelos 5 y 6 de circular/poligonal (24 mallas convencionales y 24 mallas optimizadas\*) para las distintas esbelteces analizadas.

Modelo	H (m)	B (m)	$\delta_{max}$ (cm)	$R_g$	%	H (m)	B (m)	$\delta_{max}$ (cm)	$R_g$	%
Modelo 5	45,0	15,0	9,0	0,42	<b>105,5 %</b>	90,0	15,0	18,0	0,16	<b>103,9 %</b>
Modelo 5*	45,0	15,0	9,0	0,44		90,0	15,0	18,0	0,17	
Modelo 5	45,0	22,5	9,0	0,45	<b>109,8 %</b>	90,0	22,5	18,0	0,15	<b>109,5 %</b>
Modelo 5*	45,0	22,5	9,0	0,50		90,0	22,5	18,0	0,16	
Modelo 5	45,0	30,0	9,0	0,53	<b>104,5 %</b>	90,0	30,0	18,0	0,14	<b>111,6 %</b>
Modelo 5*	45,0	30,0	9,0	0,56		90,0	30,0	18,0	0,16	
Modelo 5	135,0	15,0	27,0	0,04	<b>105,5 %</b>	180,0	15,0	36,0	0,04	<b>101,3 %</b>
Modelo 5*	135,0	15,0	27,0	0,04		180,0	15,0	36,0	0,04	
Modelo 5	135,0	22,5	27,0	0,07	<b>105,8 %</b>	180,0	22,5	36,0	0,08	<b>101,0 %</b>
Modelo 5*	135,0	22,5	27,0	0,08		180,0	22,5	36,0	0,08	
Modelo 5	135,0	30,0	27,0	0,08	<b>106,9 %</b>	180,0	30,0	36,0	0,13	<b>102,5 %</b>
Modelo 5*	135,0	30,0	27,0	0,09		180,0	30,0	36,0	0,13	
Modelo 6	45,0	15,0	9,0	0,44	<b>112,8 %</b>	90,0	15,0	18,0	0,14	<b>116,7 %</b>
Modelo 6*	45,0	15,0	9,0	0,49		90,0	15,0	18,0	0,18	
Modelo 6	45,0	22,5	9,0	0,42	<b>110,1 %</b>	90,0	22,5	18,0	0,14	<b>115,7 %</b>
Modelo 6*	45,0	22,5	9,0	0,46		90,0	22,5	18,0	0,17	
Modelo 6	45,0	30,0	9,0	0,43	<b>104,2 %</b>	90,0	30,0	18,0	0,11	<b>105,5 %</b>
Modelo 6*	45,0	30,0	9,0	0,45		90,0	30,0	18,0	0,12	
Modelo 6	135,0	15,0	27,0	0,04	<b>110,7 %</b>	180,0	15,0	36,0	0,03	<b>104,3 %</b>
Modelo 6*	135,0	15,0	27,0	0,04		180,0	15,0	36,0	0,04	
Modelo 6	135,0	22,5	27,0	0,06	<b>115,1 %</b>	180,0	22,5	36,0	0,06	<b>110,2 %</b>
Modelo 6*	135,0	22,5	27,0	0,07		180,0	22,5	36,0	0,07	
Modelo 6	135,0	30,0	27,0	0,08	<b>110,8 %</b>	180,0	30,0	36,0	0,08	<b>105,5 %</b>
Modelo 6*	135,0	30,0	27,0	0,09		180,0	30,0	36,0	0,08	

Tabla 5.6-15. Comparativo de los modelos 5 y 6 de base circular/poligonal (24 mallas convencionales y 24 mallas optimizadas\*) para las distintas esbelteces analizadas.

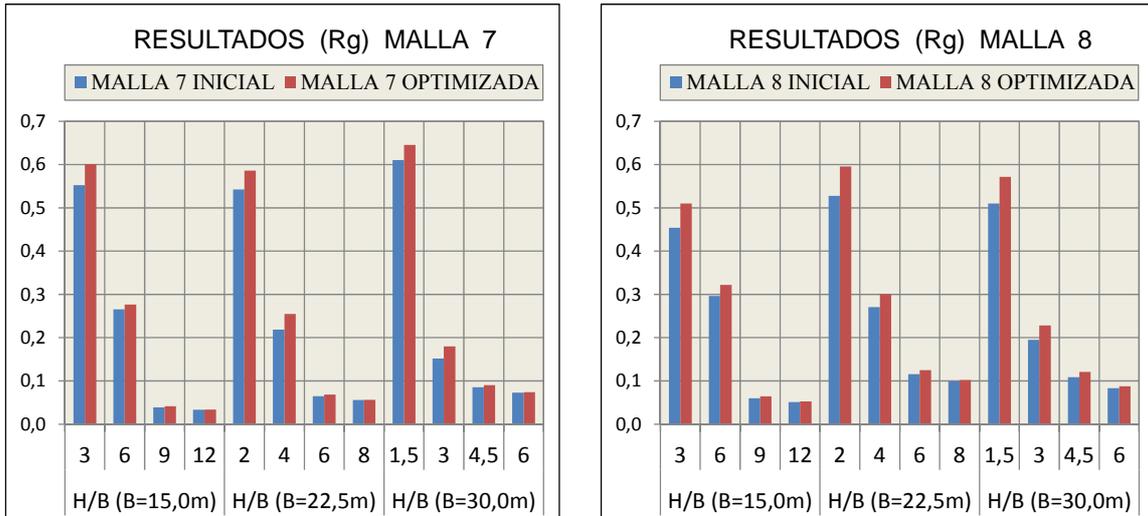


Figura 5.6-21. Comparativo de los modelos 7 y 8 de base circular/poligonal (24 mallas convencionales y 24 mallas optimizadas\*) para las distintas esbelteces analizadas.

Modelo	H (m)	B (m)	$\delta_{max}$ (cm)	R <sub>g</sub>	%	H (m)	B (m)	$\delta_{max}$ (cm)	R <sub>g</sub>	%
Modelo 7	45,0	15,0	9,0	0,55	<b>108,8 %</b>	90,0	15,0	18,0	0,26	<b>104,2 %</b>
Modelo 7*	45,0	15,0	9,0	0,6		90,0	15,0	18,0	0,28	
Modelo 7	45,0	22,5	9,0	0,46	<b>110,1 %</b>	90,0	22,5	18,0	0,22	<b>116,6 %</b>
Modelo 7*	45,0	22,5	9,0	0,50		90,0	22,5	18,0	0,26	
Modelo 7	45,0	30,0	9,0	0,61	<b>105,7 %</b>	90,0	30,0	18,0	0,15	<b>118,3 %</b>
Modelo 7*	45,0	30,0	9,0	0,65		90,0	30,0	18,0	0,18	
Modelo 7	135,0	15,0	27,0	0,04	<b>106,6 %</b>	180,0	15,0	36,0	0,03	<b>104,5 %</b>
Modelo 7*	135,0	15,0	27,0	0,04		180,0	15,0	36,0	0,04	
Modelo 7	135,0	22,5	27,0	0,06	<b>105,3 %</b>	180,0	22,5	36,0	0,06	<b>104,2 %</b>
Modelo 7*	135,0	22,5	27,0	0,06		180,0	22,5	36,0	0,06	
Modelo 7	135,0	30,0	27,0	0,08	<b>105,9 %</b>	180,0	30,0	36,0	0,08	<b>105,9 %</b>
Modelo 7*	135,0	30,0	27,0	0,08		180,0	30,0	36,0	0,08	
Modelo 8	45,0	15,0	9,0	0,45	<b>112,4 %</b>	90,0	15,0	18,0	0,30	<b>108,6 %</b>
Modelo 8*	45,0	15,0	9,0	0,51		90,0	15,0	18,0	0,32	
Modelo 8	45,0	22,5	9,0	0,53	<b>112,9 %</b>	90,0	22,5	18,0	0,27	<b>111,1 %</b>
Modelo 8*	45,0	22,5	9,0	0,60		90,0	22,5	18,0	0,30	
Modelo 8	45,0	30,0	9,0	0,51	<b>112,1 %</b>	90,0	30,0	18,0	0,20	<b>116,9 %</b>
Modelo 8*	45,0	30,0	9,0	0,57		90,0	30,0	18,0	0,23	
Modelo 8	135,0	15,0	27,0	0,06	<b>107,8 %</b>	180,0	15,0	36,0	0,04	<b>102,2 %</b>
Modelo 8*	135,0	15,0	27,0	0,06		180,0	15,0	36,0	0,04	
Modelo 8	135,0	22,5	27,0	0,12	<b>106,0 %</b>	180,0	22,5	36,0	0,09	<b>103,8 %</b>
Modelo 8*	135,0	22,5	27,0	0,12		180,0	22,5	36,0	0,09	
Modelo 8	135,0	30,0	27,0	0,17	<b>107,3 %</b>	180,0	30,0	36,0	0,14	<b>102,0 %</b>
Modelo 8*	135,0	30,0	27,0	0,18		180,0	30,0	36,0	0,14	

Tabla 5.6-16. Comparativo de los modelos 7 y 8 de base circular/poligonal (24 mallas convencionales y 24 mallas optimizadas\*) para las distintas esbelteces analizadas.

*5.6.1.5 Conclusiones del estudio comparativo de mallas envolventes de edificios en altura en base al procedimiento de optimización propuesto*

De acuerdo a los resultados anteriormente presentados, en base a los distintos estudios de rendimiento estructural realizados, se observa que todos los modelos de mallas optimizadas presentan mejores resultados de rendimiento que la geometría de mallas convencionales, tal y como se especifica en los siguientes seis párrafos.

- Con el presente estudio comparativo de mallas espaciales de acero envolventes de edificios en altura (dentro de un orden máximo analizado de 180m), se demuestra que, para determinadas alturas o esbelteces geométricas, las tipologías de mallas propuestas son más eficientes cuando adoptan la trayectoria de las líneas isostáticas de acuerdo a sus solicitaciones.
- Cabe destacar que las mallas 2, 4, 5 y 7, en general ofrecen los resultados más elevados de rendimiento estructural global, mientras que las geometrías que ofrecen resultados de menor rendimiento son las mallas 1, 3, 6 y 8, confirmando la tendencia preponderante de acuerdo al segundo estudio básico en 2D.
- Es conveniente destacar que la optimización propuesta depende más de la geometría de las mallas analizadas que del hecho de que se optimice su diseño. En consecuencia, hay mallas más adecuadas para determinadas alturas o esbelteces como se puede observar en los resultados de las mallas 1, 3, 6 y 8. En las mallas 2, 4, 5 y 7, debido a sus características geométricas, la mejora en eficiencia es significativamente menor a los resultados obtenidos en las otras tipologías, que presentan resultados más satisfactorios de optimización.
- Se observa que para alturas próximas a los 135 m, la tendencia de optimización converge, siendo cada vez más pequeña la diferencia de rendimiento estructural entre las mallas convencionales y las mallas optimizadas. Aun así, se analizan los edificios de 180 m de altura con el fin de certificar la tendencia preponderante de este estudio. Se obtiene que para los edificios próximos a los 180 m el rendimiento estructural es prácticamente igual, no existiendo una optimización significativa. Ello se debe en parte a la dificultad que presentan las geometrías de las mallas convencionales en poder adaptar su forma para identificar, así, la trayectoria de las líneas isostáticas, cuanto mayor es la altura del edificio.
- Se aprecia, por lo general, que todos los resultados de optimización son muy similares para las distintas triangulaciones de malla y las distintas esbelteces geométricas analizadas. Los modelos de base rectangular presentan resultados muy parecidos en ambas direcciones (diferiendo en un orden del 5%), pero en ambos casos, los resultados de optimización (comparativo de los modelos convencionales con los modelos optimizados) son ligeramente de carácter inferior que los resultados obtenidos en el comparativo de estructuras de base cuadrada, triangular y circular/poligonal.
- A partir de este estudio se puede considerar que el análisis realizado para optimizar mallas envolventes de edificios en altura es factible, atendiendo a la relevancia de sus resultados de acuerdo a los criterios establecidos, considerando la viabilidad de análisis de edificios distintos en situaciones de mayor complejidad para aquellas geometrías más eficientes.

Cabe destacar que no todas las geometrías ofrecen un buen rendimiento a partir de cierta altura, dada la dificultad que supone adaptar la forma de las mallas, tan rígidas geométricamente, a la trayectoria de las líneas isostáticas o direcciones principales. Por ello, se propone un último estudio para la optimización de las mallas que ofrece los resultados de rendimiento y de comportamiento estructural, más elevados, mejorando así su eficiencia. Con este estudio, se pretende disponer de una geometría estructural específica que dé lugar a diseños de edificios en altura en base al concepto de la «estética estructural».

### 5.6.2 Optimización de las mallas más eficientes y propuesta de diseño de edificios en altura

En este epígrafe, de acuerdo con lo expuesto en las conclusiones del apartado anterior, se realiza un último estudio comparativo de rendimiento estructural en base a las mallas trianguladas más eficientes, modelos 2, 5 y 7, para optimizarlas, obteniendo así la geometría de una malla envolvente altamente eficiente, con un mejor comportamiento y mayor rendimiento estructural en base a la trayectoria de las líneas isostáticas, alcanzando de esta forma el objetivo principal de la presente Tesis.

Por lo tanto, se trata ahora de optimizar las geometrías más eficientes obtenidas en el estudio comparativo anterior, y que a su vez permitan adaptar mejor su geometría atendiendo a las necesidades y cuestiones arquitectónicas del proyecto, con lo que se obtenga una adecuada **relación entre la forma y la función estructural**. El mayor número de esbelteces estudiadas permite describir una tendencia con una mayor precisión, reafirmando de manera más preponderante, según los resultados del estudio de mallas espaciales analizadas en el anterior análisis.

El estudio se realiza con modelos de mallas espaciales, de acuerdo a diez esbelteces geométricas distintas, para una base B, de 30 m y las correspondientes alturas de coronación de las estructuras analizadas, H: 45, 60, 75, 90, 105, 120, 135, 150, 165, 180 m. Se limita los desplazamientos en la coronación de los edificios a H/500, de acuerdo a la normativa utilizada.

A continuación se comparan los resultados de rendimiento estructural global ( $R_g$ ) de los modelos más eficientes del estudio anterior, comparando los resultados con la geometría optimizada, de acuerdo con la trayectoria de las líneas isostáticas. En las figuras y tablas del presente apartado se presentan los resultados más relevantes del presente estudio. Se concluye este último análisis con una propuesta de diseño de edificio en altura con una malla envolvente como elemento estructural (entramado en tubo).

En la figura 5.6-22 se muestran las geometrías de hasta 180 m de altura en la coronación y una base de 30 m, ( $H/B = 6$ ) de las mallas convencionales de doble diagonal (modelos 1, 2 y 3) y la malla optimizada (modelo 4\*), según las líneas isostáticas, a la vez que se atienden las cuestiones arquitectónicas para una distribución uniforme de las distintas plantas en alzado. La altura de 5 m entre plantas permite cubrir la luz de 30 m sin la necesidad de una estructura vertical interior de pórticos o núcleo resistente.

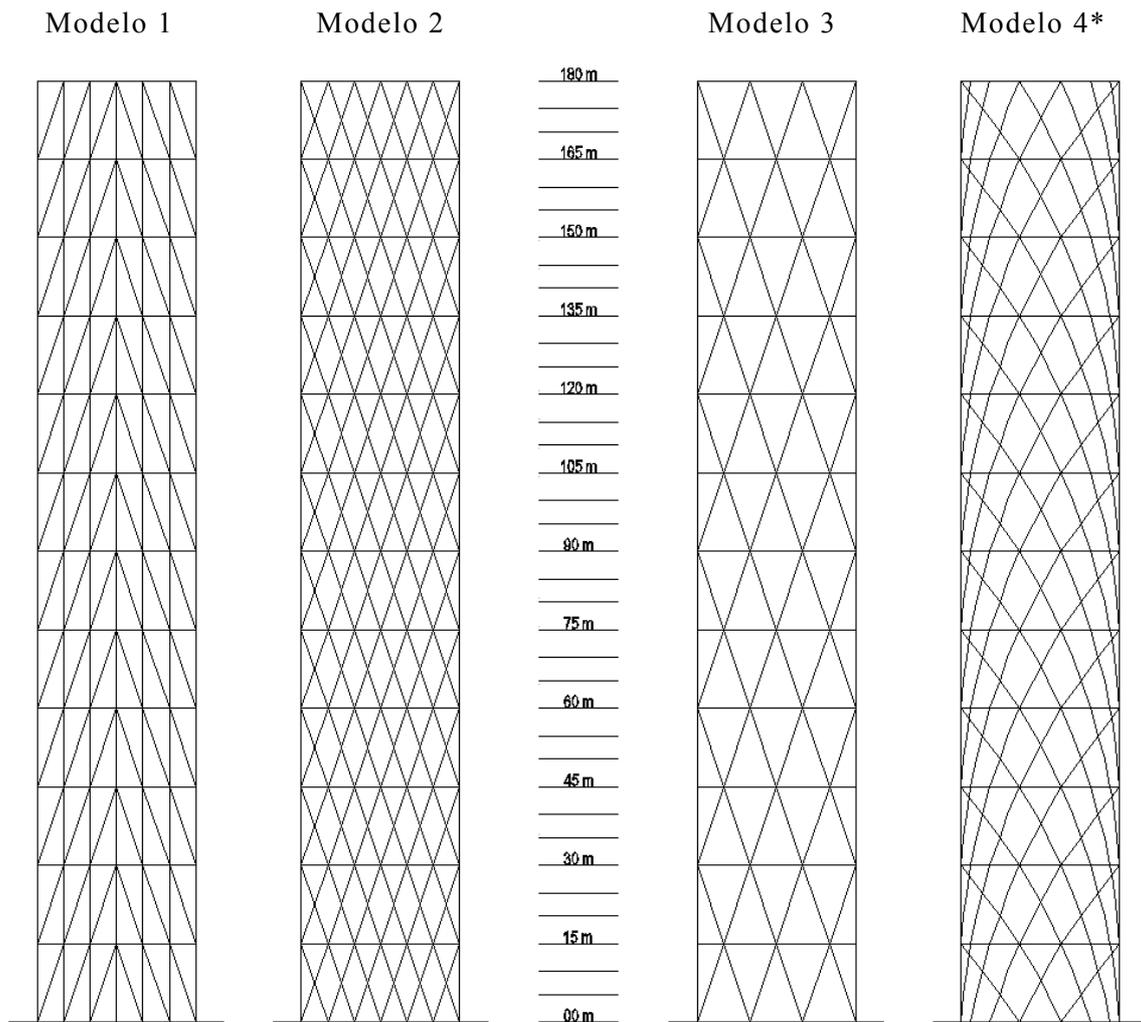


Figura 5.6-22. Geometrías de las tres mallas convencionales de doble diagonal y la malla optimizada \*, atendiendo a la trayectoria de las líneas isostáticas.

En la figura 5.6-23, se muestran los resultados del estudio comparativo realizado para edificios para las diez esbelteces geométricas de acuerdo a la tabla 5.6-17.

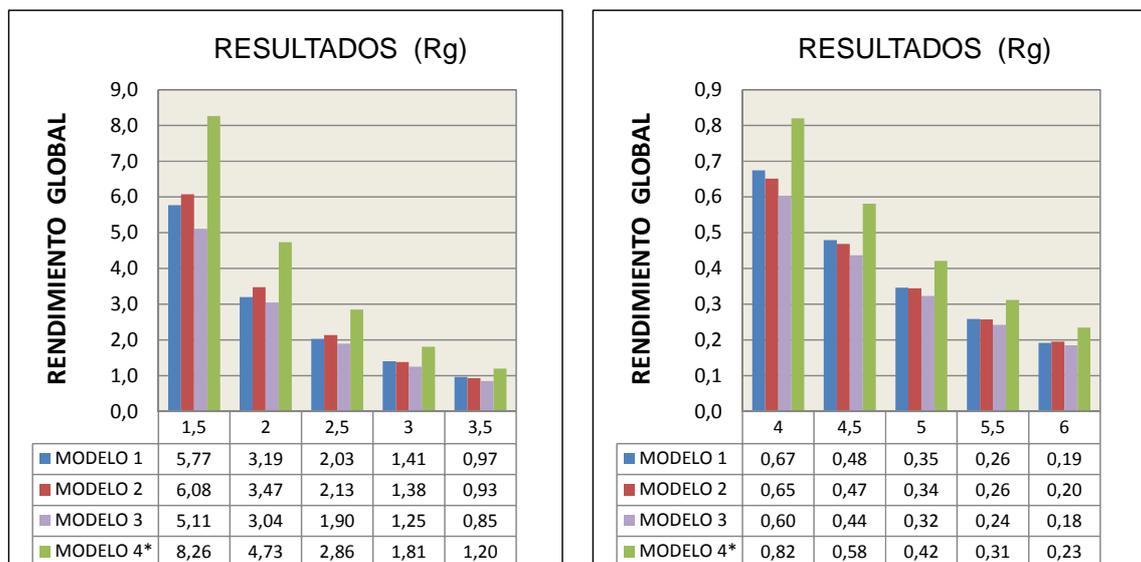


Figura 5.6-23. Resultados rendimiento estructural global de las geometrías analizadas.

En la tabla 5.6-17, se muestran los resultados del estudio comparativo realizado para edificios para las diez esbelteces geométricas consideradas ( $H/B = 1,5, 2, 2,5, 3, 3,5, 4, 4,5, 5, 5,5$  y  $6$ ), para una  $B = 30\text{m}$ .

Modelo	H (m)	H/B	$\delta_{\max}$ (cm)	$P_e$ (KN)	$R_g$	%
Modelo 1	45	1,5	9,0	468,02	5,77	
Modelo 2	45	1,5	9,0	444,41	6,08	
Modelo 3	45	1,5	9,0	528,17	5,11	
Modelo 4*	45	1,5	9,0	326,93	<b>8,26</b>	135,9%
Modelo 1	60	2,0	12,0	1126,79	3,19	
Modelo 2	60	2,0	12,0	1036,23	3,47	
Modelo 3	60	2,0	12,0	1182,66	3,04	
Modelo 4*	60	2,0	12,0	761,25	<b>4,73</b>	136,1%
Modelo 1	75	2,5	15,0	2220,25	2,03	
Modelo 2	75	2,5	15,0	2110,30	2,13	
Modelo 3	75	2,5	15,0	2373,49	1,90	
Modelo 4*	75	2,5	15,0	1576,08	<b>2,86</b>	133,9%
Modelo 1	90	3,0	18,0	3840,87	1,41	
Modelo 2	90	3,0	18,0	3903,17	1,38	
Modelo 3	90	3,0	18,0	4307,99	1,25	
Modelo 4*	90	3,0	18,0	2980,08	<b>1,81</b>	128,9%
Modelo 1	105	3,5	21,0	6508,25	0,97	
Modelo 2	105	3,5	21,0	6755,47	0,93	
Modelo 3	105	3,5	21,0	7375,63	0,85	
Modelo 4*	105	3,5	21,0	5267,22	<b>1,20</b>	123,6%
Modelo 1	120	4,0	24,0	10671,27	0,67	
Modelo 2	120	4,0	24,0	11058,05	0,65	
Modelo 3	120	4,0	24,0	11946,84	0,60	
Modelo 4*	120	4,0	24,0	8781,58	<b>0,82</b>	121,5%
Modelo 1	135	4,5	27,0	16908,90	0,48	
Modelo 2	135	4,5	27,0	17296,28	0,47	
Modelo 3	135	4,5	27,0	18557,73	0,44	
Modelo 4*	135	4,5	27,0	13948,10	<b>0,58</b>	121,2%
Modelo 1	150	5,0	30,0	26010,97	0,35	
Modelo 2	150	5,0	30,0	26141,69	0,34	
Modelo 3	150	5,0	30,0	27873,50	0,32	
Modelo 4*	150	5,0	30,0	21355,90	<b>0,42</b>	121,8
Modelo 1	165	5,5	33,0	38289,61	0,26	
Modelo 2	165	5,5	33,0	38488,57	0,26	
Modelo 3	165	5,5	33,0	40857,90	0,24	
Modelo 4*	165	5,5	33,0	31783,45	<b>0,31</b>	120,5%
Modelo 1	180	6,0	36,0	56415,16	0,19	
Modelo 2	180	6,0	36,0	55289,68	0,20	
Modelo 3	180	6,0	36,0	58457,25	0,18	
Modelo 4*	180	6,0	36,0	46068,46	<b>0,23</b>	120,0%

Tabla 5.6-17. Comparativo de los modelos 1, 2 y 3 de base cuadrada y modelo 4\* (30 mallas convencionales y 10 mallas optimizadas\*) para las distintas esbelteces analizadas.

El porcentaje definido en la última columna de la tabla 5.6-17, corresponde a la mejora de rendimiento de la geometría optimizada con respecto a la geometría convencional de mayor rendimiento.

En la figura 5.6-24, se muestran, de forma conjunta, los resultados del estudio comparativo realizado para edificios para las diez esbelteces geométricas, de acuerdo a la anterior tabla 5.6-17.

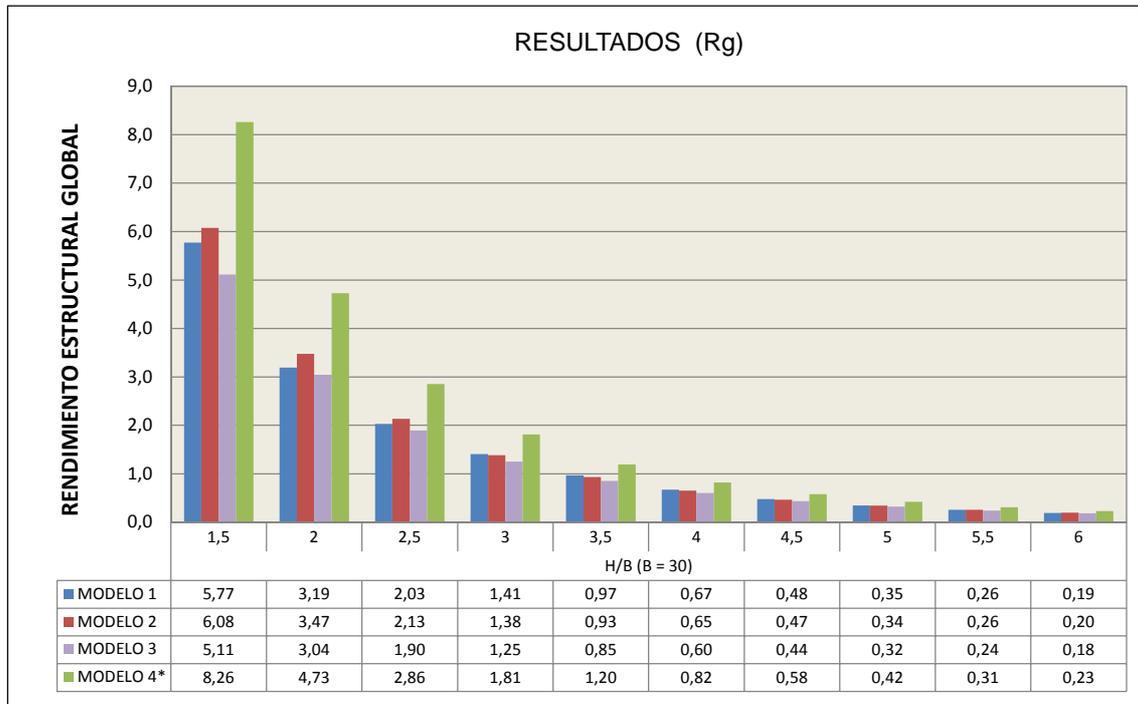


Figura 5.6-24. Resultados rendimiento estructural de las mallas analizadas 1, 2, 3 y 4\* para las distintas esbelteces geométricas consideradas.

De acuerdo a los resultados de la figura 5.6-24, la metodología propuesta para la optimización de estructuras desde la concepción y diseño arquitectónico es formalmente válida, a tenor de los resultados y las conclusiones que se extraen de los estudios comparativos de eficiencia estructural realizados. Los resultados obtenidos muestran que la optimización de las estructuras de entramado, en base al análisis de las direcciones de las tensiones principales, según sus solicitaciones, son altamente satisfactorios, con un **aumento del rendimiento estructural de hasta un orden del 30-40%**, cuando su geometría se adapta o asemeja a las líneas isostáticas del elemento resistente equivalente de alma llena, respecto con las geometrías convencionales más eficientes.

**Por lo tanto, las mallas espaciales envolventes de edificios en altura de acuerdo a la metodología propuesta son más óptimas, mejorando su eficiencia cuando su diseño se identifica a las direcciones de las tensiones principales de los elementos estructurales de alma llena equivalente, generada por las cargas actuantes que solicitan la estructura.**

En la figura 5.6-25 se muestran los diagramas de esfuerzos axiales de las geometrías analizadas en el presente estudio para una altura de 60 m ( $H/B = 2$ ).

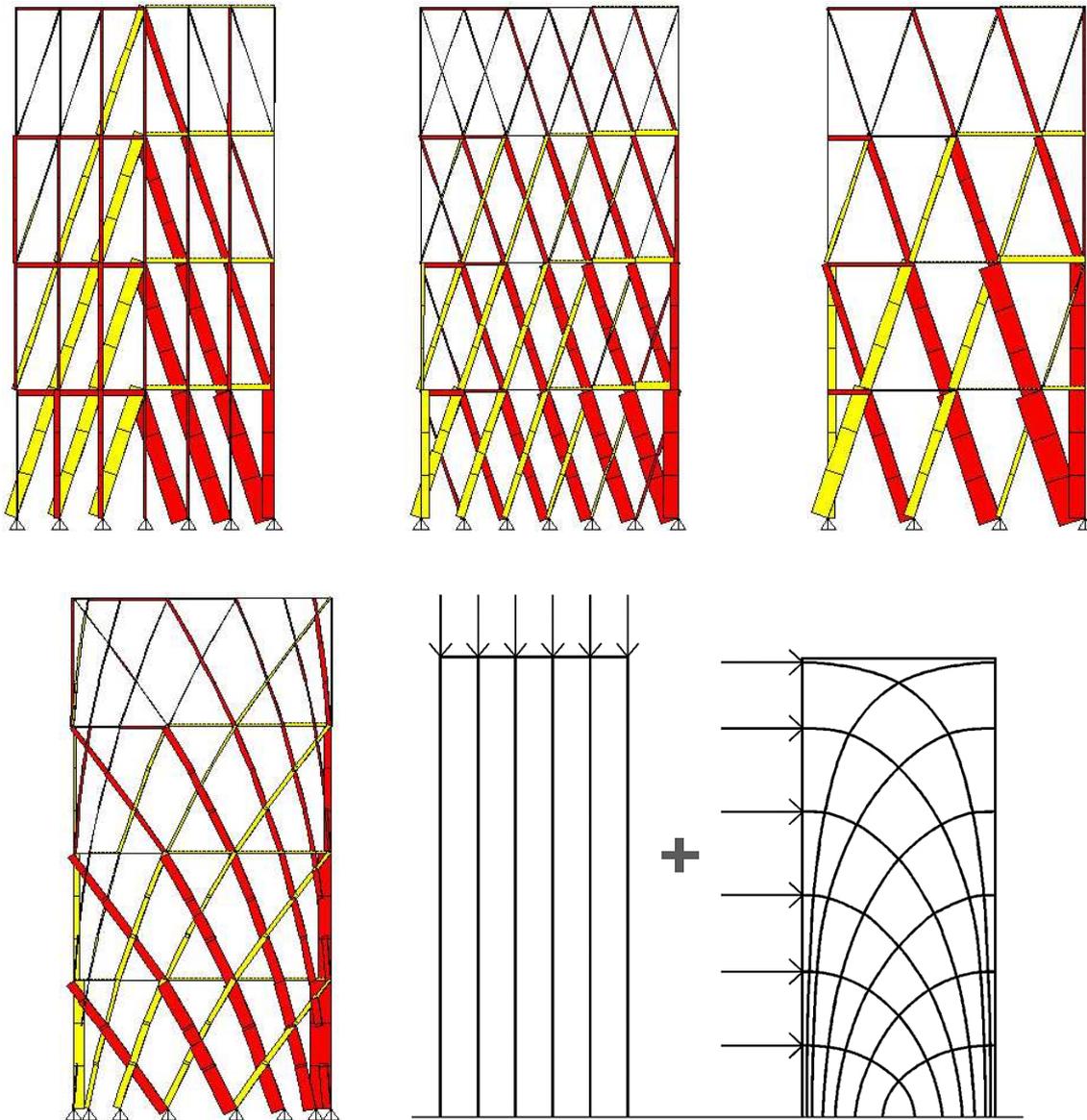


Figura 5.6-25. Diagramas de esfuerzos axiales de los modelos de mallas del estudio comparativo final para una esbeltez geométrica de  $H/B = 2$ , para una base de 30 m.

En base a los resultados de rendimiento estructural obtenidos se define la geometría correspondiente para mallas envolventes de edificios en altura, atendiendo a las cuestiones y necesidades arquitectónicas, como se muestra en las figuras 5.6-26, 5.6-27 y 5.6-28.

Es oportuno destacar que en la geometría propuesta, de acuerdo a los resultados obtenidos, las barras entre los nudos de intersección de la malla son rectas **definiendo una poligonal rectilínea**, en base a la trayectoria de las líneas isostáticas. De esta forma se atiende a las cuestiones constructivas, y económicas, ya que curvar los perfiles aumentaría, a priori, el coste de la ejecución de forma relevante, disminuyendo el rendimiento en términos globales de la estructura. Este aspecto requeriría de un análisis más exhaustivo.

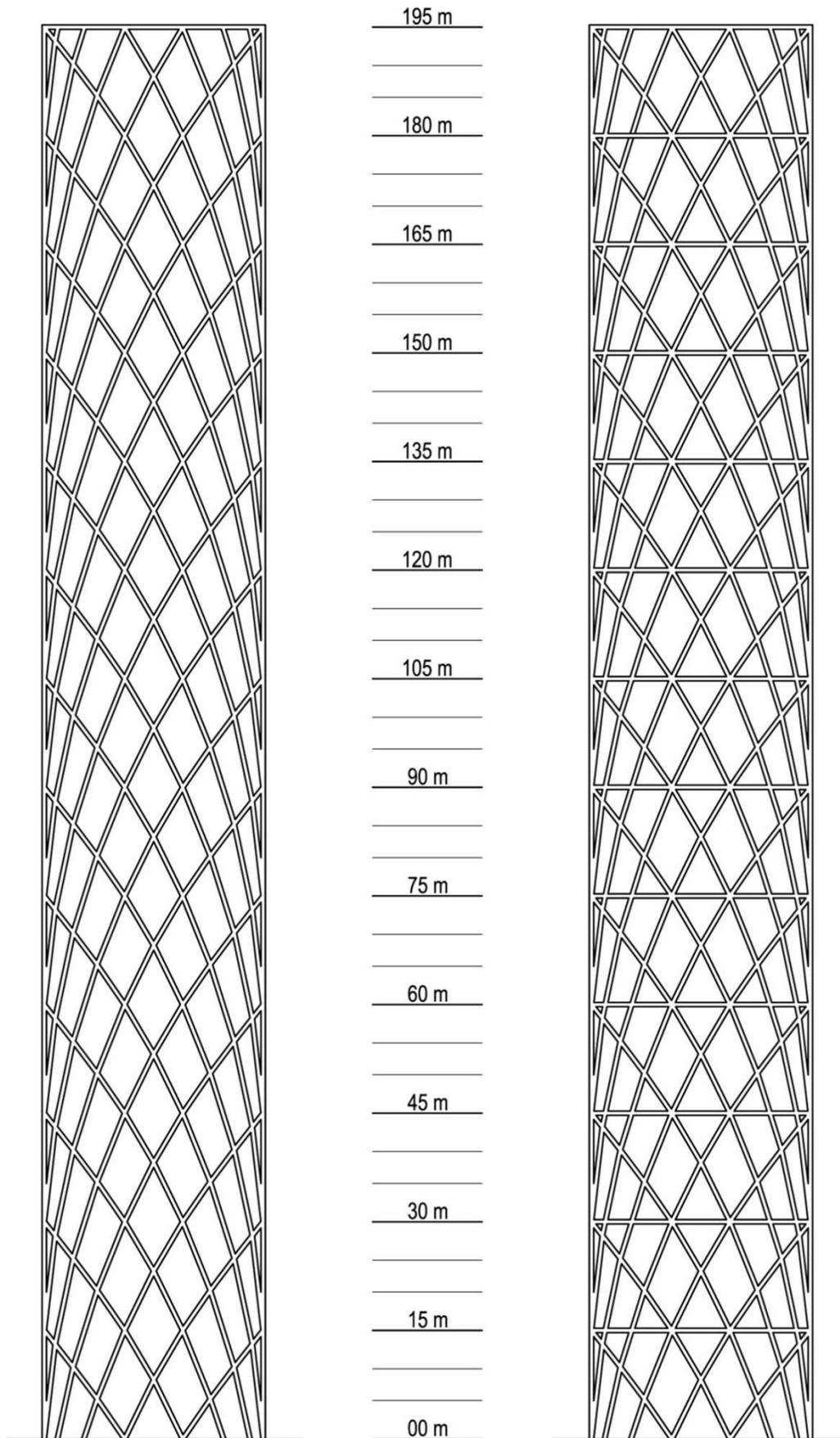


Figura 5.6-26. Propuesta de estructura envolvente de acuerdo a geometría optimizada de acuerdo los resultados del estudio comparativo final. (Imagen propia).

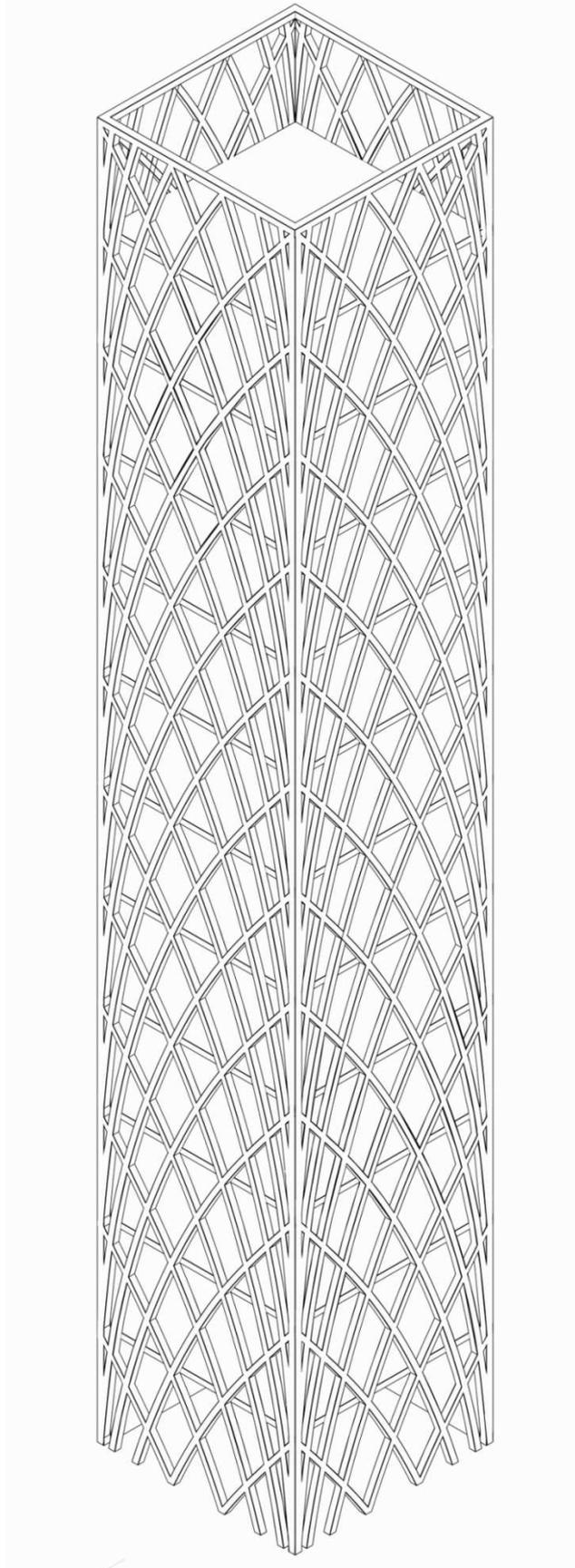


Figura 5.6-27. Axonometría de la propuesta de estructura envolvente de acuerdo a geometría optimizada según los resultados del estudio comparativo final. (Imagen propia).



Figura 5.6-28. Vista de la propuesta de estructura envolvente de acuerdo a geometría optimizada según a los resultados del estudio comparativo final. (Imagen propia).

La geometría propuesta de la malla envolvente de edificios en altura, en base a los estudios presentados, se caracteriza por conformarse a partir de la repetición secuencial de un módulo de 15 metros de altura para un total de tres plantas o niveles por módulo. El hecho de que se base en la repetición de un módulo geométrico, permite que se puedan proyectar edificios de distintas alturas según dicha modulación. Esta característica difiere de forma significativa de las referencias presentadas de acuerdo a la optimización de la estructura en base a la carga dominante (el viento) como son los estudios presentados de Moussavi <sup>[1]</sup>, Sarkisian <sup>[2]</sup> y SOM, este último de acuerdo al proyecto de *Lote Super Tower* en Seúl. Los proyectos de dichas propuestas se caracterizan por plantear una malla de geometría no uniforme en todo el alzado, con las consecuentes problemáticas que conlleva tanto en el diseño arquitectónico como la construcción del proyecto.

Este aspecto de vital relevancia permite, mediante la utilización de herramientas paramétricas como el *Grasshopper*, modelizar de una forma ciertamente rápida la malla envolvente.

---

[1] Moussavi, F. (2009). *The Function of Form*, pp. 104 y 105.

[2] Sarkisian, M.; Lee, P.; Long, E.; Shook, D. (2010). *Organic and Natural Forms in Building Design*, p. 2844

En base a la geometría optimizada propuesta es posible definir formas volumétricas alternativas, como el prisma torsionado se aprecia en la figura 5.6-29. En las figuras 5.6.30 y 5.6-31, se muestra la propuesta de un edificio en altura o torre torsionada, cuya concepción arquitectónica se basa en la función resistente de la forma, atendiendo al binomio función-forma, el cual se ha tratado ampliamente a lo largo de la presente Tesis.

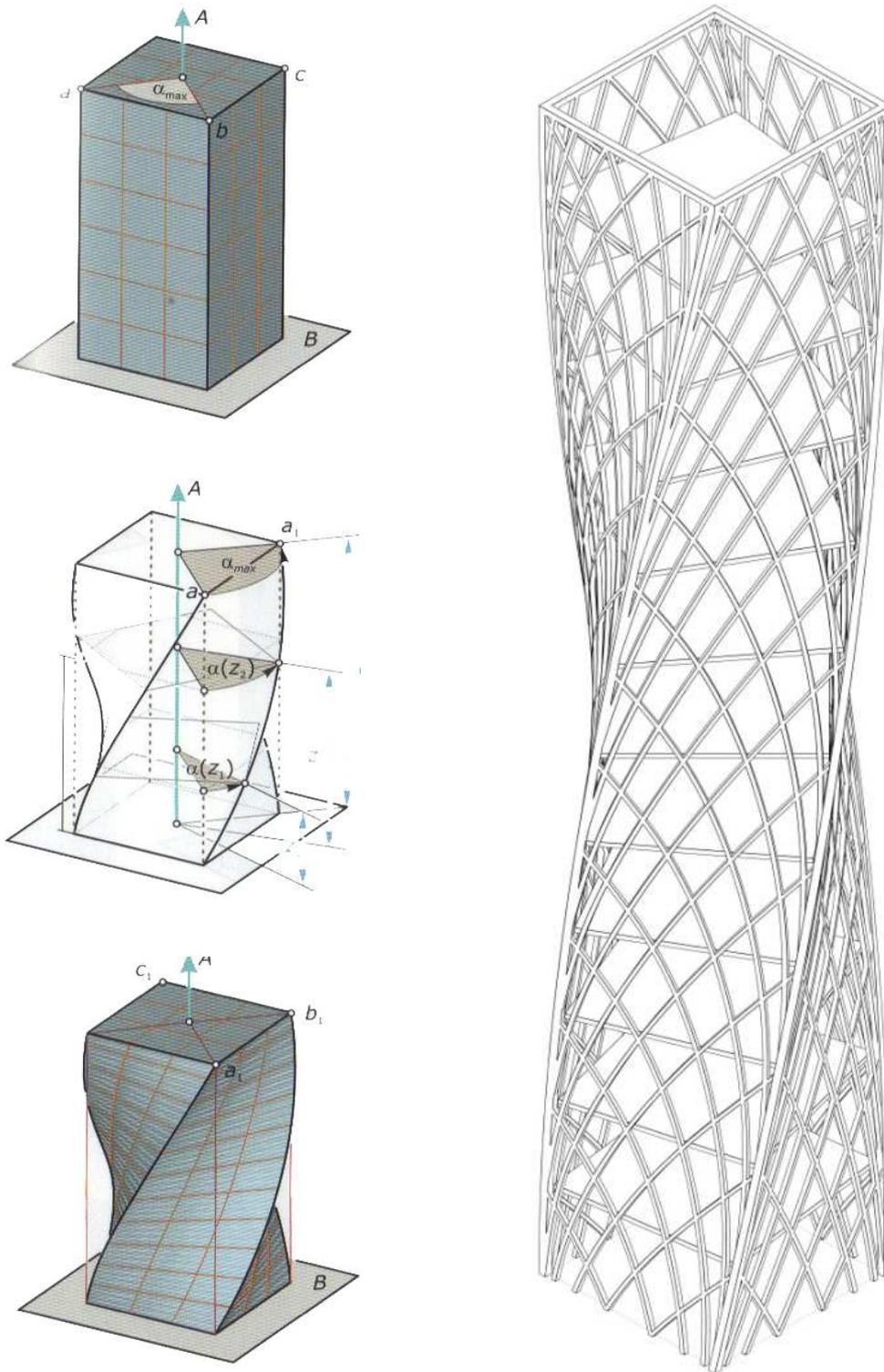


Figura 5.6-29. Volumetría prismática torsionada 90° y modelización de la torre torsionada de acuerdo en base a la geometría optimizada. (Imágenes de [Pottmann et al. 2007, 455] y propia, respectivamente).



Figura 5.6-30. Propuesta de geometría de torre torsionada en base a la geometría optimizada propuesta. (Imagen propia).

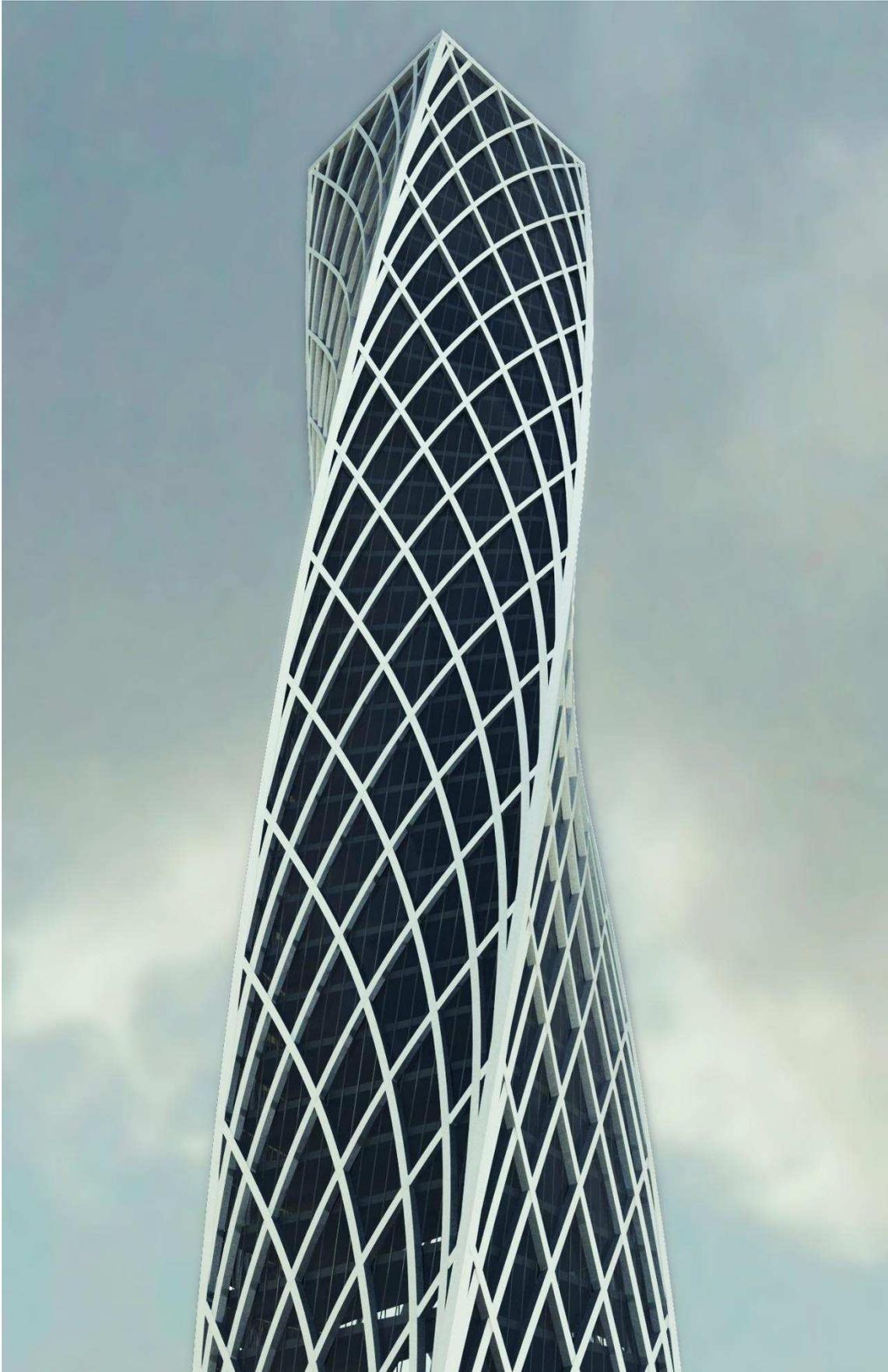


Figura 5.6-31. Propuesta de geometría de torre torsionada en base a la geometría optimizada. (Imagen propia).