

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 6 Conclusiones y perspectivas de desarrollo

En este capítulo se exponen las conclusiones finales atendiendo a las conclusiones parciales, algunas de ellas ya presentadas en los correspondientes capítulos, de las cuales es de interés destacar aquellas obtenidas en los capítulos 2 y 5. Con ello se pretende resumir sucintamente las distintas temáticas que se han abordado a lo largo del trabajo de investigación realizado. La búsqueda de la concepción y el diseño de las estructuras resistentes, desde el punto de vista de la influencia, la relevancia y la función estructural de la forma en el diseño, el comportamiento y el análisis de las estructuras, permite abordar el objetivo fundamental: establecer y proponer un procedimiento para la optimización de mallas estructurales de acero, envolventes de edificios en altura, como tipología estructural de entramado en tubo (mallas espaciales).

En esta línea procede destacar el recorrido formalmente conceptual realizado desde el inicio hasta la actualidad, por la historia de la Teoría de las Estructuras, constituyendo una sólida base justificativa para plantear los estudios básicos y finales realizados, en base a la eficiencia estructural de sistemas de entramado, los cuales han permitido abordar la temática que ha sido objeto de estudio del presente trabajo y cuyos resultados se resumen a continuación.

Así mismo, en la parte final del presente capítulo, se formularán las posibles perspectivas de desarrollo, que pueden derivar en líneas de investigación.

6.1 Conclusiones

Como se ha descrito previamente, se exponen en primer lugar las conclusiones parciales, las cuales se extraen de los correspondientes capítulos que conforman la Tesis, dando paso de forma natural, a posteriori, a las conclusiones finales y las perspectivas de desarrollo que se derivan.

6.1.1 Conclusiones parciales

Cp. 1.1 - La concepción y el diseño de la forma básica de un proyecto arquitectónico, definiendo así su geometría de acuerdo a las necesidades arquitectónicas y a las cargas que debe soportar la estructura, confieren un concepto clave en el momento de abordarlo. La relación del binomio función-forma es fundamental para resolver eficientemente el reto que supone abordar la ejecución de una construcción. Es por ello por lo que ya desde la antigüedad, a través de las primeras civilizaciones, se utilizaban los conocimientos de los que se disponían en la búsqueda para la comprensión del comportamiento estructural. Una búsqueda que inicialmente se abordó desde la geometría y matemática básicas, y posteriormente también desde una vertiente científica y analítica, como se desprende del primer capítulo.

Cp. 1.2 - El estudio y la definición de la línea de presiones establece una herramienta altamente utilizada a lo largo de la historia, para analizar el comportamiento estructural de los elementos resistentes desde la geometría y el equilibrio, configurando el cálculo tradicional de estructuras de fábrica. Esta herramienta fue utilizada de forma analítica en 1742, por Giovanni Poleni, quien analizó el comportamiento estructural de la cúpula de San Pedro de Roma, en base a los experimentos de Robert Hooke sobre el arco catenárico. Este planteamiento metodológico ha permitido abordar un número considerable de construcciones y proyectos, especialmente de fábrica, que posteriormente han dado lugar a la búsqueda de estructu-

ras que se basan en la identificación de las direcciones principales, en base a la aportación de Karl Culmann que dio lugar a la Estática Gráfica, que, junto con la aportación de Augustin Cauchy, introdujo el tensor de tensiones y el tensor de deformaciones, dando paso posteriormente a las líneas isostáticas, las cuales fueron desarrollado ampliamente por Otto Möhr.

Cp. 1.3 - En efecto, se estaban proponiendo conceptos de optimización, de acuerdo a la forma, que fueron y son utilizados por arquitectos, ingenieros y diseñadores de reconocido prestigio como por ejemplo Robert Maillart, Emil Mörsch, Eduardo Torroja, Pier Luigi Nervi, Ricardo Morandi, Félix Candela, Frei Otto, Mutsuro Sasaki, o Sergio Musmeci, entre otros, para el diseño y confección de sus obras, las cuales se caracterizan por la función resistente de su forma.

Dichos conceptos resultan relevantes, también en la actualidad, para el diseño de proyectos de distinta índole, como se desprende de las construcciones resistentes por su forma mencionadas en el primer capítulo, así como de los resultados concluyentes de la presente Tesis para la optimización de estructuras malladas consideradas el análisis de las líneas isostáticas, en función de sus solicitaciones.

Cp. 1.4 – La identificación y representación de las líneas isostáticas en base a las direcciones principales se convierte, pues, en una herramienta de gran utilidad para determinar el comportamiento resistente de los distintos elementos estructurales. Por ello el estudio de las líneas isostáticas se ha utilizado y se utiliza como criterio de diseño de los elementos resistentes, como es la definición del trazado más eficiente de las armaduras en hormigón armado o la disposición más eficiente de las barras en estructuras de entramado o de celosía, ya sean en dos o en tres dimensiones, de acuerdo a las cargas actuantes y a las condiciones de equilibrio.

Cp. 2.1 - De acuerdo a los resultados del estudio comparativo básico de vigas de celosía, en base a las opciones de cálculo consideradas (cargas puntuales en los nudos frente a cargas distribuidas en los cordones, así como uniones articuladas frente a uniones rígidas en los extremos de las barras de relleno), se desprende que dichas opciones de cálculo no influyen de forma relevante en el comportamiento estructural de las armaduras. Los resultados obtenidos para las distintas triangulaciones analizadas no difieren, de forma significativa, en cuanto al rendimiento estructural se refiere.

Cp. 2.2 - En esta línea, se debe mencionar que las distintas dimensiones de los recuadros (separación entre los montantes verticales) es un parámetro de diseño que influye de forma significativa en el rendimiento y la eficiencia de las vigas de celosía. Resulta relevante que dicha influencia en el comportamiento estructural se produce de una forma prácticamente proporcional a la configuración dimensional de los recuadros, disminuyendo la eficiencia de las armaduras a mayor separación entre los montantes. Sin embargo, cabe destacar que este parámetro de diseño influye de una forma similar en todas las triangulaciones analizadas, y, por lo tanto, se considera que es un parámetro de menor relevancia en cuanto a los estudios comparativos finales de armaduras.

Cp. 2.3 - En cuanto a los «parámetros de control» considerados, destacar que tanto la limitación de deformaciones (ELS), como la resistencia equivalente, (dimensionado estricto) para estados límite últimos (ELU), de las barras de las vigas de celosía analizadas en los estudios de modelos en dos dimensiones, son válidos para determinar el rendimiento de estructuras de entramado, comparando los resultados obtenidos según las distintas triangulaciones.

Cp. 2.4 - Atendiendo a los estudios comparativos de vigas en celosía realizados, se desprende que aquellas triangulaciones, cuyas diagonales asemejan o identifican las líneas isostáticas del elemento resistente equivalente bajo las acciones actuantes, ofrecen resultados de mayor eficiencia. Consecuentemente, la viga Warren y la viga “en X” se caracterizan por obtener rendimientos estructurales significativos.

Cp. 2.5 - En este sentido, resulta relevante destacar el comportamiento totalmente opuesto de las vigas “en K” y “en K invertida”, como se muestra en la figura 6.1-1, ejemplificando la influencia, en el rendimiento estructura de las armaduras, de la disposición de las barras de relleno según su orientación, o no, con respecto la estructura arco-tirante.

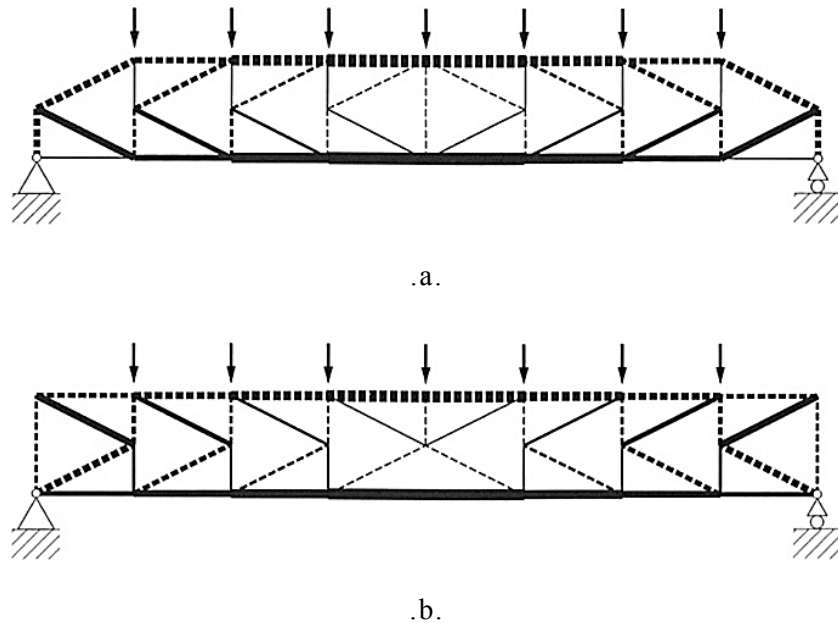


Figura 6.1-1. a) Viga “en K” con orientación de las diagonales similar a la forma de la estructura arco-tirante, b) Viga “en K” con orientación invertida de las diagonales con respecto a la estructura arco-tirante. (Imagen tomada de (Muttoni 2011, 144)).

La viga “en K” que se muestra en la figura 6.1-1a, ofrece el mayor rendimiento estructural de todas las triangulaciones analizadas, en base a todos los estudios comparativos de armaduras realizados. En el sentido opuesto, es de relevancia destacar el comportamiento de la viga “K invertida”, la cual dispone las diagonales con orientación invertida con respecto a la estructura arco-tirante, como se aprecia en la figura 6.1-1b, ofreciendo, de forma clara, los resultados de menor eficiencia estructural.

Cp. 2.6 - Comparando los resultados obtenidos de ambas armaduras “en K”, de acuerdo a los estudios comparativos realizados sobre el rendimiento estructural de vigas de celosía, cuyos resultados se muestran de forma representativa en las figuras 6.1-2 y 6.1-3, correspondientes al estudio comparativo 1, la eficiencia estructural de la viga “en K” es superior al de la viga “en K invertida”, generalmente hasta un valor del orden del 25-35%. Cabe destacar la relevancia de este aspecto, ya que se trata de geometrías en las que, para un mismo estado de cargas y de condiciones de equilibrio, únicamente con la variación de la disposición de las diagonales se obtienen rendimientos estructurales muy distintos, claro está, para una misma cantidad de material resistente.

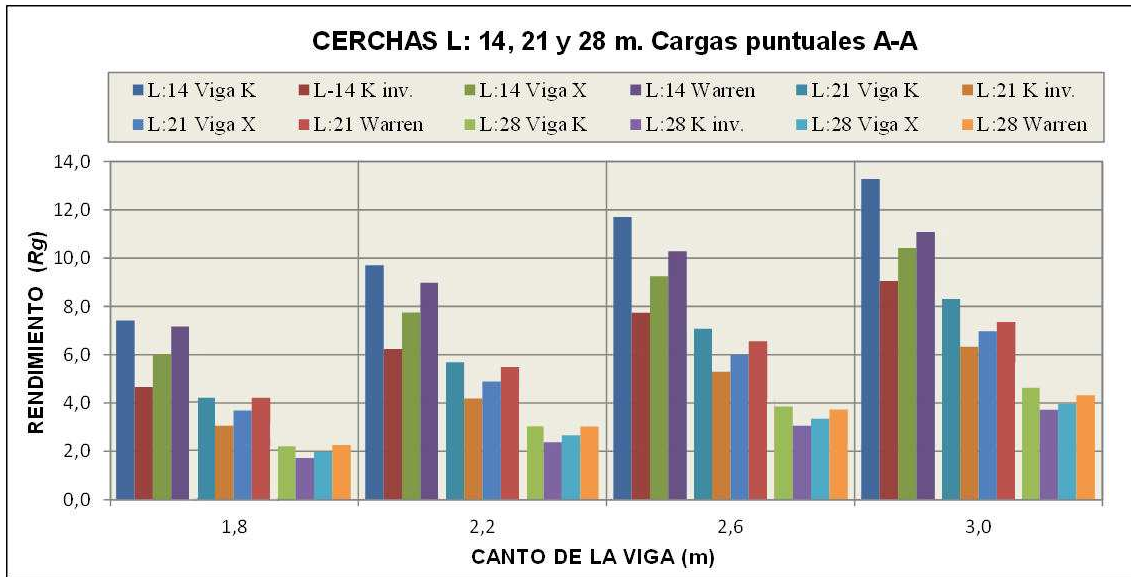


Figura 6.1-2. Rendimiento comparativo 1. Resumen resultados con 4 tipologías de celosías biapoyadas en los extremos para unas luces de 14.0, 21.0 y 28.0 m con cargas puntuales en los nudos del cordón superior.

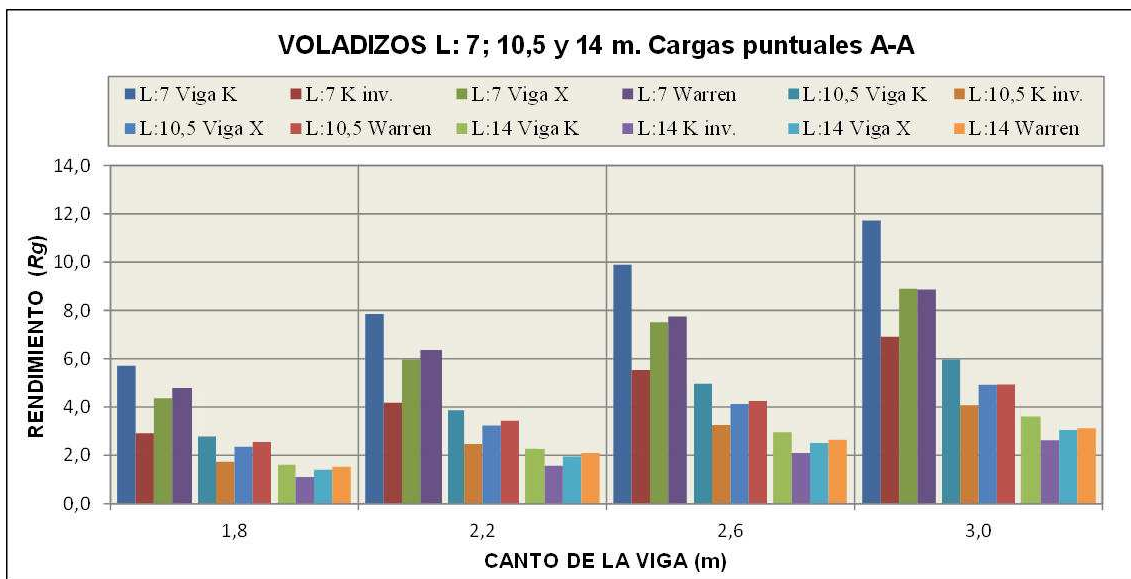


Figura 6.1-3. Rendimiento comparativo 1. Resumen resultados con 4 tipologías de celosías con un voladizo de 7.0, 10.5 y 14.0 m con cargas puntuales en los nudos del cordón superior.

Cp. 2.7 - Es oportuno hacer una mención especial a la viga Warren por su elevado rendimiento estructural, ya que sus resultados se aproximan, considerablemente, a los resultados de la viga de mayor eficiencia estructural: la viga “en K”. Cabe destacar que la viga Warren se caracteriza, además, por su ligereza y agradable aspecto visual, que le confieren unas prestaciones arquitectónicas destacables.

En este mismo sentido, la viga Warren es la triangulación que requiere un número menor de uniones lo cual, implica que si se analizara también atendiendo el coste económico en base a su ejecución y la eficiencia de dicha geometría considerando todos aspectos estructurales y constructivos, ofrecería incluso un rendimiento superior al de la viga “en K”. También es oportuno destacar el rendimiento de la viga “en X” puesto que podría ser interpretada, desde el punto de vista del comporta-

miento estructural, como una “doble viga Warren”. Sólo el considerable número de uniones con respecto a la viga Warren merman su eficiencia con respecto a dicha triangulación.

Cp. 3.1 - Las mallas estructurales conforman un sistema resistente, utilizado de forma amplia en construcciones espaciales de grandes dimensiones dadas sus elevadas prestaciones arquitectónico-estructurales. Este esquema estructural conforma una solución constructiva que se caracteriza, entre otras propiedades, por su ligereza y rigidez global como sistema resistente.

Cp. 4.1 - Las estructuras espaciales conforman una tipología estructural utilizada de forma asidua en edificaciones en altura como sistema resistente de entramado en tubo, dadas sus elevadas prestaciones frente a las solicitaciones que caracterizan este tipo de construcción, básicamente, bajo la acción de esfuerzos de flexión y cortante, así como de torsión. Son especialmente eficientes 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.

Cp. 4.2 - Las geometrías de mayor complejidad requieren de un estudio aerodinámico para determinar las cargas actuantes sobre los edificios analizados, realizando ensayos con túnel de viento o túnel aerodinámico para edificios “romo”, por ejemplo, de base circular. También es frecuente el uso de simulación computacional de fluidos para el estudio aerodinámico de dichas geometrías.

Cp. 5.1 - En cuanto al estudio de edificios en altura se refiere, se observa que en general todos los modelos de mallas optimizadas presentan mejores resultados de rendimiento que la geometría de mallas convencionales o iniciales, dependiendo el aumento de rendimiento, básicamente, de la esbeltez geométrica de la estructura analizada en cada caso.

Cp. 5.3 - De acuerdo a lo estudios realizados de mallas espaciales de acero envolventes de edificios en altura (dentro de un orden máximo analizado de 180 m), 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.

Cp. 5.4 - 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. Todas ellas, se muestran en la figura 6.1-4.

Cp. 5.2 – Es relevante mencionar que las mallas 2, 4, 5 y 7, en general, ofrecen los mejores resultados 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 estudio básico en 2D realizado previamente. Los resultados de rendimiento estructural se muestran de forma representativa en la figura 6.1-5.

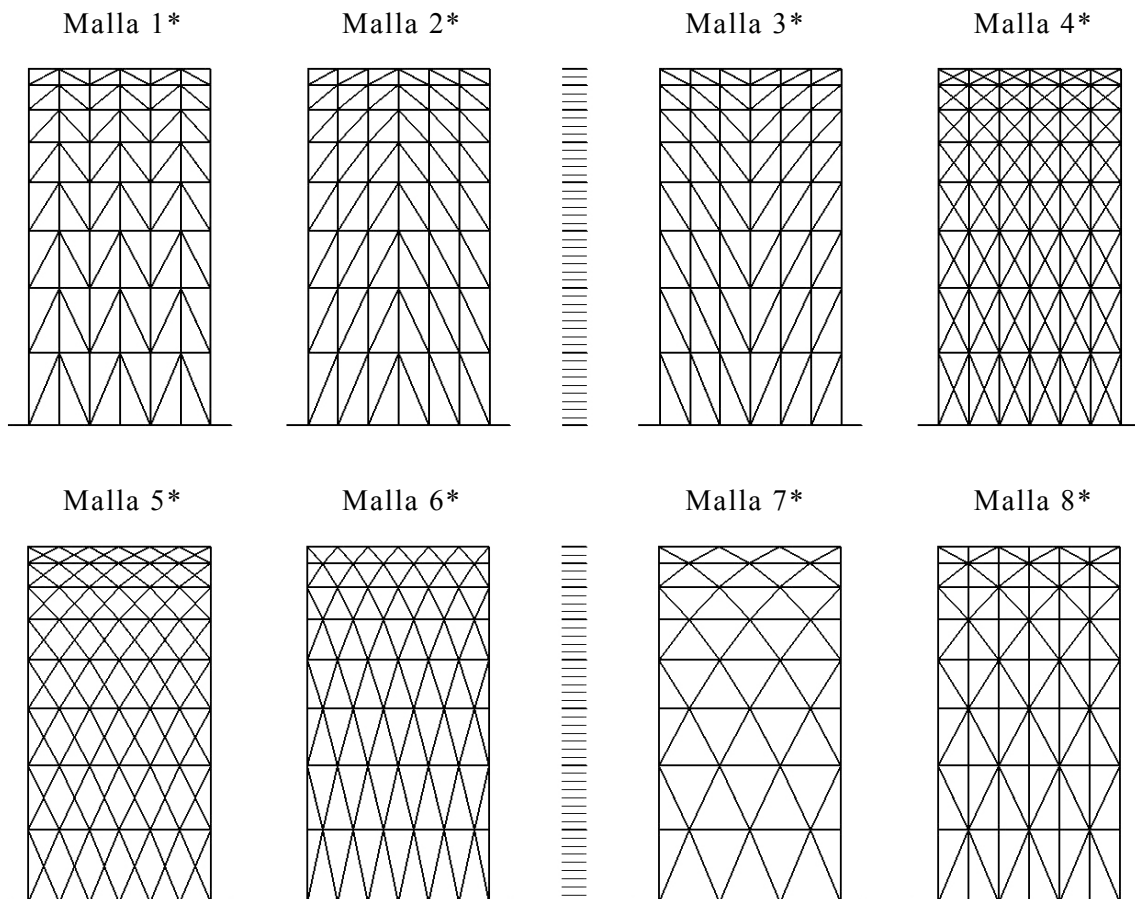


Figura 6.1-4. Geometrías de las ocho mallas optimizadas (indicadas con *) para el estudio comparativo de rendimiento estructural de mallas espaciales.

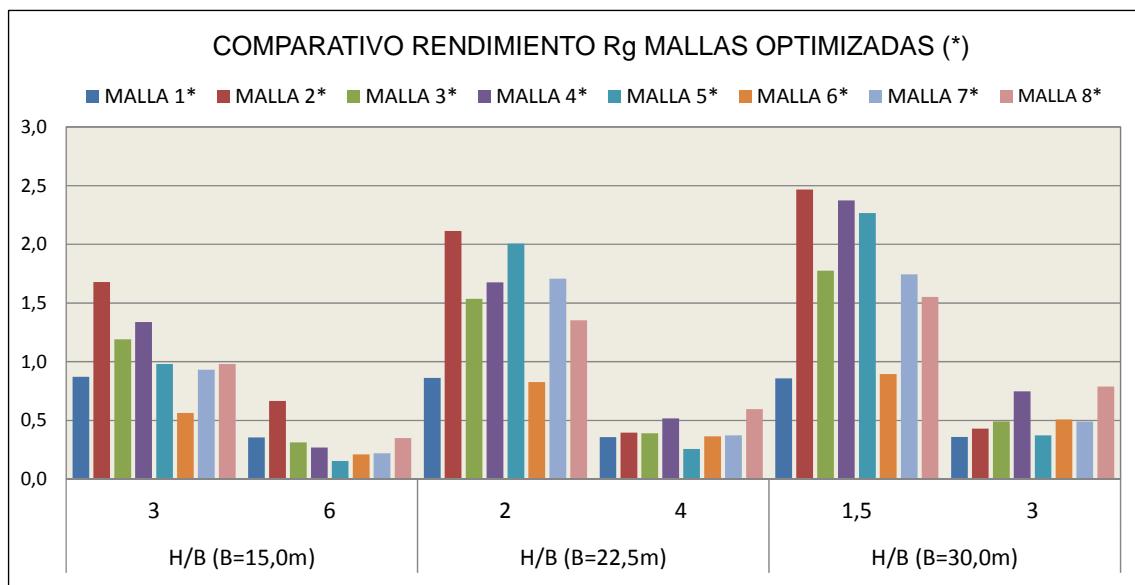


Figura 6.1-5. Comparativo de los ocho modelos de base cuadrada para las distintas esbelteces las correspondientes a la estructuras de 45 y 90 m de altura.

Cp. 5.5 - 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 preponde-

rante 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. Esta característica se debe, en parte, a la dificultad que presentan algunas geometrías básicas en poder adaptar su forma, para identificar así la trayectoria de las líneas isostáticas, cuanto mayor es la altura del edificio.

Cp. 5.6 - 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 del 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.

Cp. 5.7 - Las mallas espaciales confieren un sistema resistente adecuado para edificios en altura, dadas sus elevadas prestaciones arquitectónicas y estructurales, permitiendo la resolución de esta tipología edificatoria, atendiendo a los distintos requisitos de este tipo de edificaciones, considerando la viabilidad de análisis de edificios distintos en situaciones de mayor complejidad para aquellas geometrías más eficientes.

6.1.2 Conclusiones finales

En el presente epígrafe, se exponen de forma concluyente, en base a las conclusiones parciales previamente expuestas, las conclusiones finales del trabajo de investigación realizado:

Cf. 1 - Los edificios en altura o rascacielos establecen una tipología edificatoria en constante auge constructivo, respondiendo, a las necesidades y motivaciones sociales, económicas, así como a las culturales de los países con mayor crecimiento económico y/o que confieren las principales potencias económicas mundiales. Esta tendencia constructiva se fundamenta con mayor intensidad en la actualidad en el concepto de la eficiencia energética, donde la estructura resistente tiene un papel determinante para la concepción de edificios más rentables y eficientes. Ello requiere que la forma y geometría tengan un papel relevante, no sólo en el diseño arquitectónico sino también en la función estructural.

Cf. 2 - La metodología propuesta para la optimización de estructuras desde la concepción y el 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 o de celosía ya se consideren en dos dimensiones o tridimensionalmente, en base al análisis de las direcciones de las tensiones principales según sus sollicitaciones, son altamente satisfactorios con un aumento del rendimiento estructural de hasta un orden del 25-40%, cuando su geometría se adapta o asemeja a las líneas isostáticas del elemento resistente equivalente de alma llena.

Cf. 3 - Las mallas espaciales, envolventes de edificios en altura, de acuerdo a la metodología propuesta son óptimas y, por lo tanto, mejoran su eficiencia cuando su diseño identifica las direcciones de las tensiones principales de los elementos estructurales de alma llena equivalentes, generadas por las cargas actuantes que sollicitan la estructura. En la figura 6.1-6, se aprecian las geometrías del estudio comparativo final del presente trabajo de investigación.

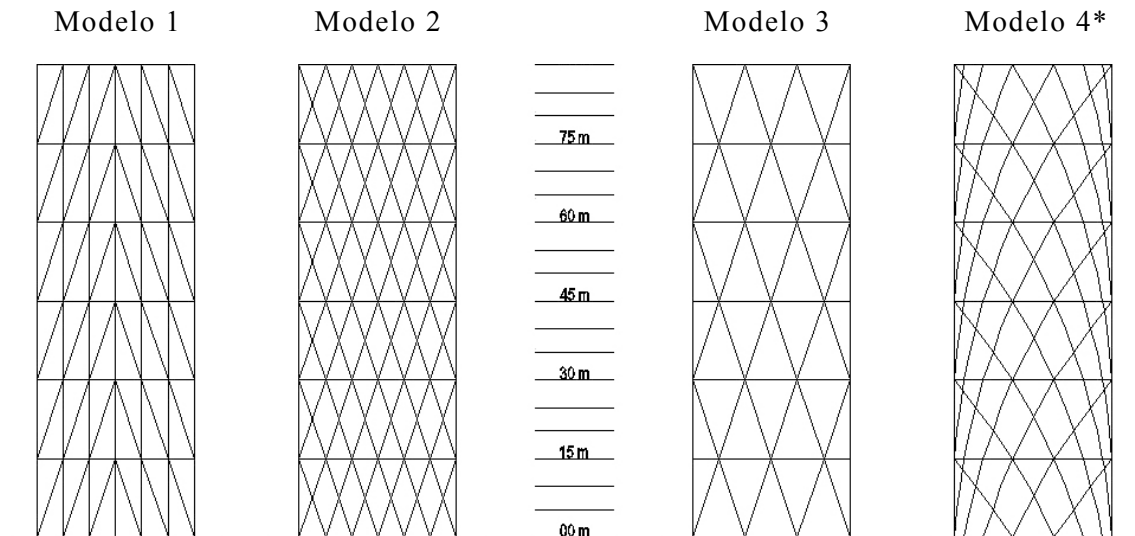


Figura 6.1-6. Geometrías de las tres mallas convencionales de doble diagonal (*diagrid*) y la malla optimizada*, teniendo en cuenta la trayectoria de las líneas isostáticas y el diseño arquitectónico.

En la figura 6.1-7, se aprecia el mayor rendimiento estructural del modelo 4* (optimizado) con respecto las otras geometrías del estudio comparativo final. Es oportuno mencionar que los modelos 1, 2 y 3, corresponden a las geometrías más eficientes de entre todas las analizadas en los estudios comparativos previos, secundando así la elevada eficiencia de la geometría propuesta, a la vez que se atienden a las cuestiones arquitectónicas y constructivas que requiere un proyecto de estas características.

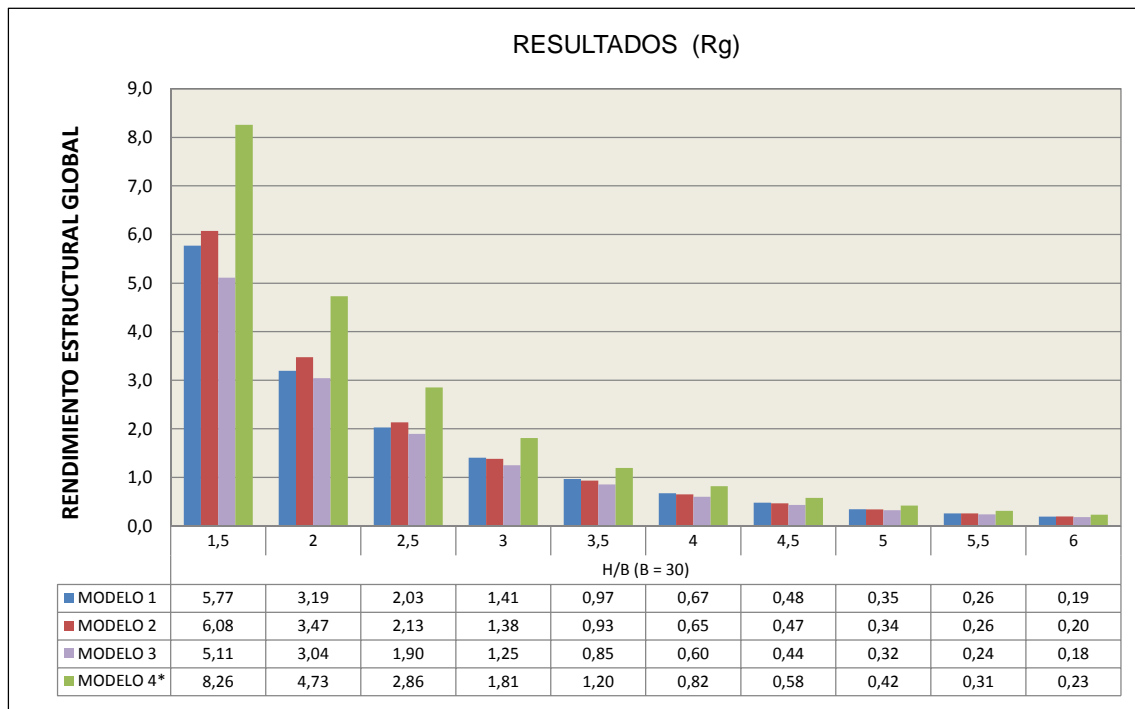


Figura 6.1-7. Resultados rendimiento estructural de las geometrías analizadas en el estudio final.

El rendimiento estructural obtenido de acuerdo a la geometría optimizada propuesta es superior hasta un valor del orden del 30-40%, según las esbelteces geométricas comparadas, con respecto al resto de geometrías de alta eficiencia. En la figura 6.1-8, se muestran los diagramas de esfuerzos axiales de las geometrías analizadas en el estudio comparativo final.

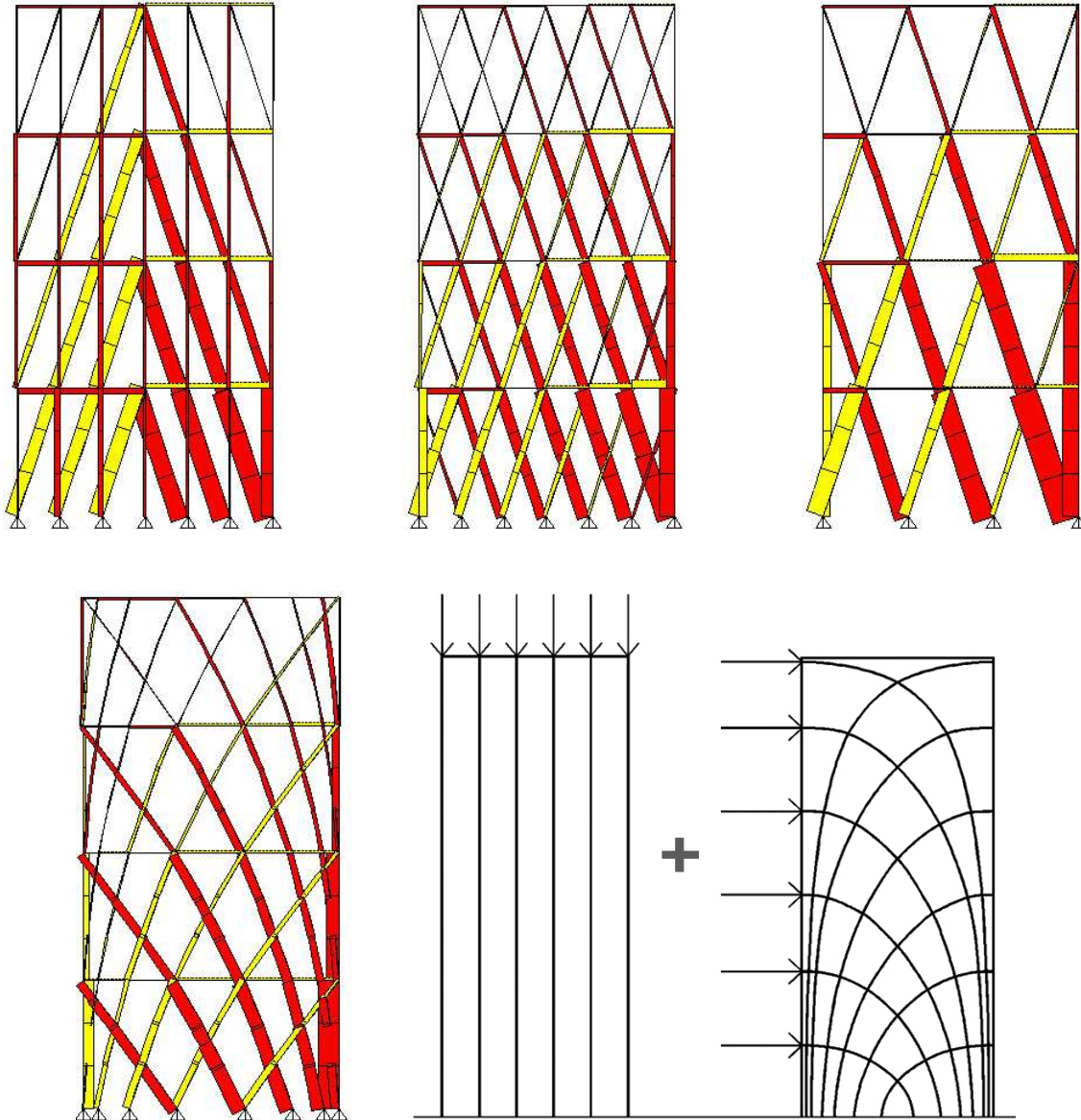


Figura 6.1-8. Diagramas de esfuerzos axiales de los modelos de mallas del estudio comparativo final para una esbeltez geométrica de $H/B = 2$, con una base de 30 m.

Cf. 4 - La concepción de proyectos arquitectónicos desde la estructura, en este caso edificios caracterizados por su esbeltez geométrica y sostenidos con sistemas estructurales envolventes, permite englobar el concepto de «estética estructural» conjugando de forma eficiente el diseño arquitectónico y el concepto estructural, evitando así los problemas que se derivan de la concepción de una geometría arquitectónica, ya sea compleja o no, cuando en el proceso proyectual se omite el planteamiento estructural quedando, éste, equívocamente relegando a una fase posterior con los agravantes que supone el frecuente conflicto arquitecto-ingeniero estructural.

6.2 Perspectivas de desarrollo

En el presente epígrafe, se formulan las perspectivas de desarrollo derivadas de las conclusiones que se han expuesto previamente, secundando el trabajo realizado, con una clara intención continuista de la temática expuesta. Las perspectivas de desarrollo propuestas se configuran en seis grandes campos, los cuales se enumeran y se exponen a continuación:

- Influencia de la acción sísmica en edificios en base a la geometría propuesta.
- Comportamiento y eficiencia estructural de sistemas resistentes tubo dentro de tubo con núcleo central de pantallas o muros de cortante.
- Estudio de la aerodinámica (simulación CFD y modelización con túnel de viento) de los edificios en altura para su optimización desde la forma.
- Influencia en el coste económico de la geometría optimizada
- Programación de nuevas herramientas avanzadas de diseño arquitectónico mediante el desarrollo de procedimientos paramétricos.
- Influencia de la geometría propuesta en la base del edificio y la cimentación con respecto a las geometrías convencionales.

6.2.1 Estudio del comportamiento estructural frente a acciones sísmicas en base a la geometría propuesta

Es de relevancia mencionar que la acción sísmica, en ocasiones, puede ser determinante en el diseño y el análisis de edificios en altura, dadas las características geométricas de este tipo edificatorio. El comportamiento estructural de los modelos propuestos frente a la acción sísmica se propone como una línea de desarrollo, como extensión natural a la temática desarrollada en la presente Tesis y de las publicaciones realizadas en actas de congresos y revistas ^{[1][2]}.

A tenor de la relevancia de este aspecto, además de las características geométricas y mecánicas de la tipología estructural utilizada, los modelos diseñados de entramado en tubo para los edificios prismáticos proyectados ofrecen un comportamiento estructural sencillo atendiendo, de la mejor manera posible, a las siguientes condiciones que describe el Eurocódigo 8 (Parte 1, 2011), en su referencia sismo-resistente:

- Resistencia lateral.
- Simetría mecánica en planta.
- 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.

[1] Señís López, R. (2013/a). *Estudio de las líneas isostáticas para optimizar mallas estructurales de acero envolventes de edificios en altura según sus solicitaciones.*

[2] 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.*

6.2.2 Comportamiento y eficiencia estructural de edificios en altura con pantallas de cortante

El uso de sistemas estructurales de tubo dentro de tubo como tipología resistente de edificios en altura es altamente recurrente ya que, al ser necesario un núcleo de comunicación y transporte vertical, es evidente la aparición de un núcleo habitualmente situado en la zona central del edificio. La configuración de dicho núcleo, con pantallas o muros de cortante, permite obtener una tipología estructural que conjuga las prestaciones de las estructuras de entramado en tubo, pero además las propiedades de un segundo sistema resistente cuya interacción, con el primero, se ha expuesto en el cuarto capítulo.

Por lo tanto, el sistema tubo dentro de tubo, es una tipología ampliamente utilizada en los edificios en altura por sus elevadas prestaciones arquitectónicas, pero sobre todo estructurales. Es por ello por lo que se considera conveniente abordar los estudios de mallas envolventes de edificios en altura, con estructuras de este tipo, para determinar la influencia del núcleo en el rendimiento global de la malla estructural optimizada propuesta.

Cabe destacar que en cuanto a la existencia de los muros de cortante, en el momento de realizar los estudios comparativos entre las geometrías de mallas convencionales y las geometrías optimizadas, los desplazamientos horizontales en la coronación de los edificios en altura serán ciertamente similares. Por ello, para determinar el rendimiento global estructural de los modelos analizados será suficiente con cuantificar la cantidad de material necesario para dar cumplimiento a la comprobación de ELU de los distintos perfiles. Es decir, en este caso, será suficiente el parámetro de control de resistencia equivalente.

6.2.3 Estudio aerodinámica de edificios de mayor altura («Super-altos» o «Mega-altos»)

Como se ha expuesto anteriormente en el capítulo 5, en concreto en el apartado 5.3.5 (método simplificado y efectos dinámicos del exceso de esbeltez), la altura máxima considerada se ha limitado a 200 metros, por lo tanto, dentro de la capa límite atmosférica o zona de influencia de la superficie terrestre, de acuerdo a dicho método. Para edificios de mayor altura, es necesario realizar estudios dinámicos en la modelización del viento. Para ello, se requiere la utilización de herramientas de simulación computacional de fluidos (CFD) o estudios de modelización con túnel de viento aerodinámico de capa límite para determinar las fuerzas de presión producidas por el flujo del aire.

Conocer dichas fuerzas de presión permite abordar el estudio de edificios de mayor altura en base a la metodología propuesta, la cual es de especial relevancia cuanto más esbelto es un edificio, ya que la influencia del viento es todavía más determinante. En este sentido es importante poder continuar el estudio realizado en edificios «Super-altos» (hasta 300 metros de altura) y «Mega-altos» (hasta 600 metros).

6.2.4 Influencia en el coste económico de la geometría de la estructura mallada propuesta

Como se ha expuesto en la metodología de trabajo, el procedimiento de diseño que se propone se basa en dos premisas fundamentales: menor cantidad de material y criterios de minimización de coste constructivo. Sin duda, confeccionar un proyecto adaptando su geometría, en la medida de lo posible, a la trayectoria de las líneas

isostáticas según las cargas actuantes, a la vez que se atiende a las cuestiones arquitectónicas lo que, proporciona un ajuste más óptimo del material, ya que las barras, por lo general y principalmente trabajan a esfuerzos axiales de tracción y de compresión, siendo la flexión y el cortante esfuerzos de menor relevancia en el dimensionado de los distintos elementos que conforman la estructura proyectada.

En esta misma línea, la geometría optimizada propuesta se caracteriza por su repetición en altura, lo cual favorece su construcción. No obstante se estima que, la geometría resultante, dadas sus características geométricas, tiene un coste económico superior con respecto a las geometrías convencionales que se han utilizado en los estudios comparativos de rendimiento y eficiencia estructural presentados. Consecuentemente, dicha eficiencia se verá disminuida desde un punto de vista global de la concepción de una estructura, diseño y ejecución, en caso que el coste de construcción sea superior.

En este contexto, determinar la influencia en el coste económico adicional que pueda suponer la geometría decreciente en altura, en comparación con las geometría de mallas uniformes o convencionales, es una cuestión de suma relevancia.

6.2.5 Programación de nuevas herramientas paramétricas

Como se ha expuesto anteriormente y se desprende de la metodología propuesta, las nuevas herramientas y los programas de modelado, así como el análisis estructural avanzado de proyectos de gran complejidad, se convierten en una sólida base para abordar uno de los temas de investigación de mayor auge en la actualidad: el diseño paramétrico.

En este contexto es oportuno proponer una línea de trabajo en busca de nuevas herramientas paramétricas que permitan incluir en el modelado la adaptación de la geometría de la malla como sistema estructural, de acuerdo a la metodología presentada para el diseño de edificios en altura.

6.2.6 Influencia de la geometría propuesta en la base y la cimentación con respecto a las geometrías convencionales

Otro aspecto de relevancia a considerar como futura perspectiva de desarrollo, es determinar la influencia de la geometría optimizada propuesta en el comportamiento y dimensionado de la cimentación y, derivado de ello, si supone un coste adicional con respecto a la cimentación necesaria para las geometrías convencionales. A pesar de que se considera que dicha influencia no es significativa, es necesario valorar qué aspectos o consideraciones previas se deben tener en cuenta en el momento de proyectar la cimentación de acuerdo a la geometría propuesta.

Así mismo, entendiendo los edificios en altura como una columna (base-fuste-capitel), es de suma relevancia estudiar y trabajar el encuentro y la integración de la base de éste con el entorno urbano que lo rodea, para así, permitir la adecuada transición arquitectónica del plano horizontal de la cota cero con el plano vertical del rascacielos, garantizando así, la funcionalidad de ambos ámbitos (espacio urbano/espacio edificado).