

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 2 Contribución al análisis: estudio comparativo del rendimiento estructural de vigas de celosía planas según su geometría, en base a las direcciones principales identificadas por sus líneas isostáticas

De acuerdo a lo anteriormente expuesto en el capítulo precedente, acerca de la relación entre el diseño o la forma arquitectónica y la función estructural que desempeña, la estrecha relación del binomio que conforman ambas concepciones permite establecer una metodología de trabajo y de análisis conjunta, tendencia ésta que se conoce como «estética estructural», y que tiene como objetivo principal desarrollar estructuras resistentes por su forma.

En este sentido existen ejemplos de optimización como los de **Emil Mörsch** (1872-1950) como los que se han tratado anteriormente ^{[1][2]}, en los cuales, estudia la disposición más adecuada de las armaduras de refuerzo de las vigas de hormigón armado según las direcciones de las tensiones principales que se generan y se representan con las líneas isostáticas, como se reitera de la figura 2.0-1. De la esquematización de las vigas de hormigón armado, y de sus respectivas analogías en vigas de celosía, se obtiene una mayor eficiencia de las armaduras, de acuerdo a lo expuesto en el anterior capítulo.

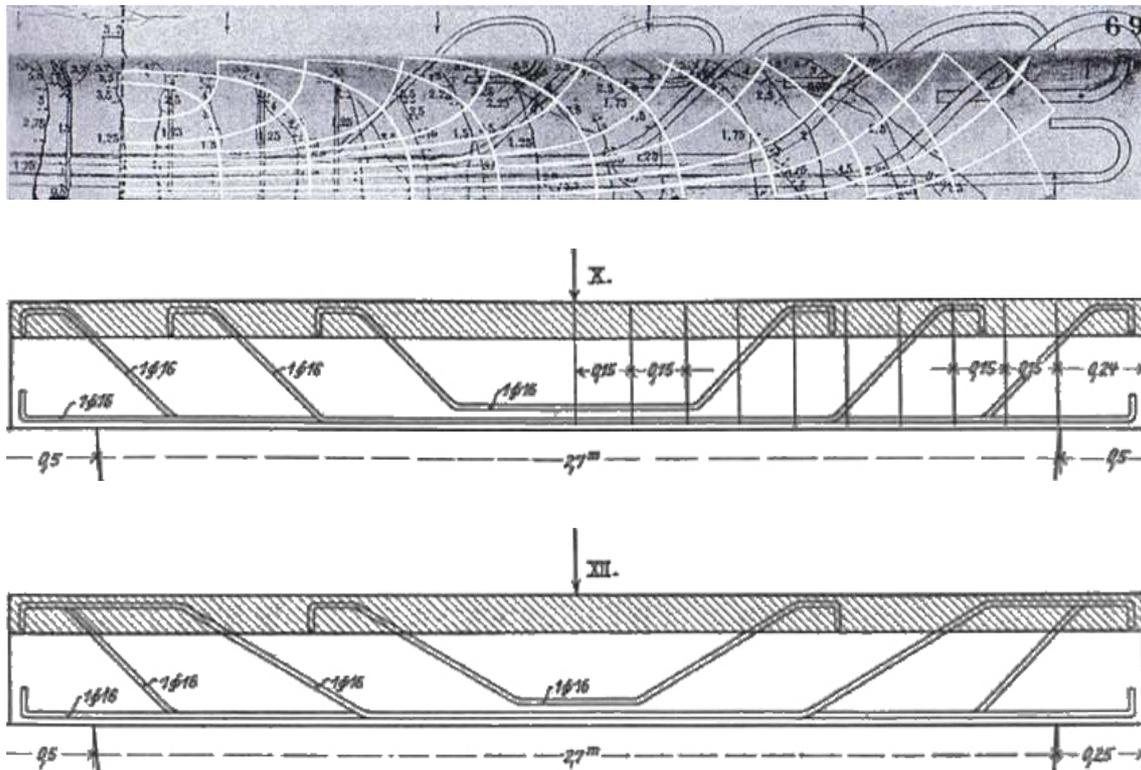


Figura 2.0-1. Disposición de las barras de refuerzo dobladas en base a la trayectoria de las líneas isostáticas según [Mörsch 1922, 5] y distintas formaciones (X y XII) de vigas de hormigón armado. (Imágenes tomadas de [Kurrer 2008, 565] y [Mörsch 1907, 242] respectivamente).

[1] Mörsch, E. (1907). *Versuche über die Schubwirkungen bei Eisenbetonträgern*.

[2] Mörsch, E. (1922). *Der Eisenbetonbau. Seine Theorie und Anwendung*.

En definitiva, dicha disposición de las armaduras de refuerzo de la viga de hormigón armado se realiza de acuerdo a las fuerzas internas distribuidas que se generan a través del material continuo en la zona media de las vigas, como indica Muttoni ^[3], las cuales se pueden representar de una forma simplificada con múltiples diagonales como se muestra en la figura 2.0-2.

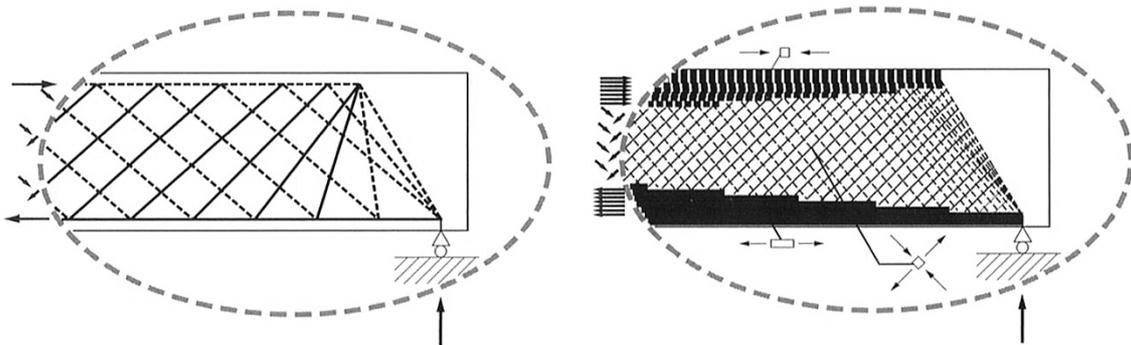


Figura 2.0-2. Esquema de diagonales superpuestas en la zona media de la viga y distribución de fuerzas internas de tracción y de compresión a través del material. (Imágenes tomadas de [Muttoni 2011, 163]).

Como argumenta Muttoni ^[3], en el caso de una viga de hormigón armado, las armaduras de refuerzo, por lo general, se colocan donde se prevén tensiones de tracción, siendo el hormigón el material que resiste las fuerzas internas de compresión. De acuerdo al esquema de la figura 2.0.2, que representa mediante diagonales las fuerzas internas de una viga de hormigón simplemente apoyada en los extremos bajo una carga gravitatoria uniformemente distribuida; dichas tensiones de tracción se generan en la parte inferior de la viga y en la zona media de acuerdo con la dirección de las diagonales de tracción. En la figura 2.0-3, se muestran dos posibles disposiciones de las armaduras de refuerzo en la zona media de la viga de acuerdo a dicha representación de fuerzas internas, de las cuales la segunda es menos usual en la práctica.

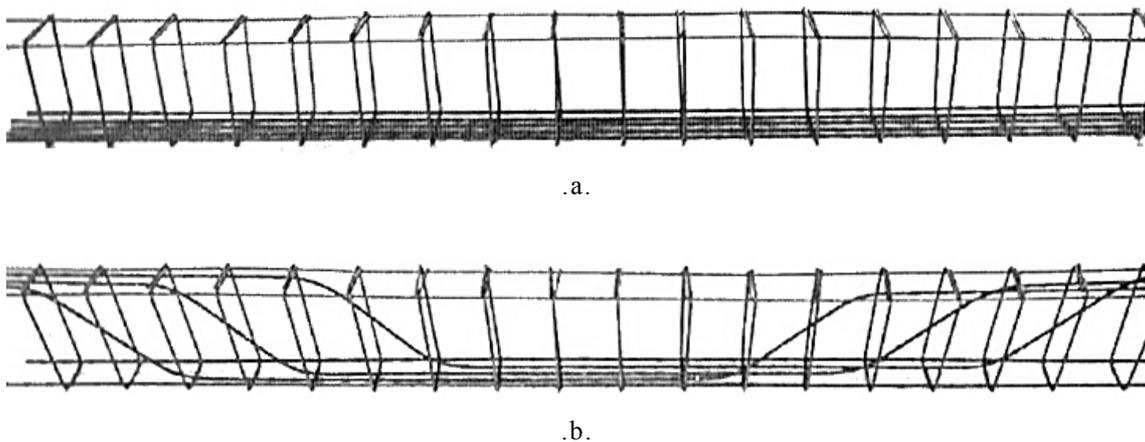


Figura 2.0-3. Dos posibles disposiciones de las barras de refuerzo en base a las fuerzas internas de tracción en la zona media de una viga de hormigón armado simplemente apoyada en los extremos bajo una carga gravitatoria uniformemente distribuida. (Imágenes tomadas de [Muttoni 2011, 164]).

^[3] Muttoni, A. (2011). *The Art of Structures. Introduction to the Functioning of Structures in Architecture*, pp. 163 y 164.

En la figura 2.0-3a, la disposición de las armaduras en la zona media de la viga se coloca en posición vertical, conforme a la analogía de la celosía equivalente ideal tipo Howe (o viga “en N” de diagonales comprimidas), en la cual los montantes están solicitados a esfuerzos de tracción. Mientras que en la figura 2.0-3b, además de los estribos transversales, la disposición inclinada de las armaduras de refuerzo en la zona media de la viga se ajusta a la geometría de la celosía equivalente ideal tipo Warren (o viga “en W”), concentrando, así, la armadura en la parte inferior del tramo medio de la viga donde las fuerzas interiores de tracción de la viga son mayores [4]. En acepción a la argumentación de Mörsch [5], la disposición de las armaduras de refuerzo se puede definir considerando la viga de hormigón como una viga de celosía:

“De acuerdo a esta disposición (refiriéndose a la colocación de barras de refuerzo dobladas según las fuerzas internas de tracción de la viga), la viga de hormigón armado también se puede considerar como una viga de celosía con un sistema simple o doble de barras (como se muestra en las figuras 2.0-4ab), donde las tiras rayadas representan las diagonales de compresión del hormigón. Se obtiene una fuerza tracción igual en las barras dobladas independientemente de si una resuelve el esfuerzo cortante en la dirección de las diagonales, similar a la situación de una viga de celosía con cordones paralelos de sistemas simple o múltiple, o si uno de ellos se calcula a partir la tensión tangente τ_0 ”.

Emil Mörsch (1907), citado por [Kurrer 2008, 564].

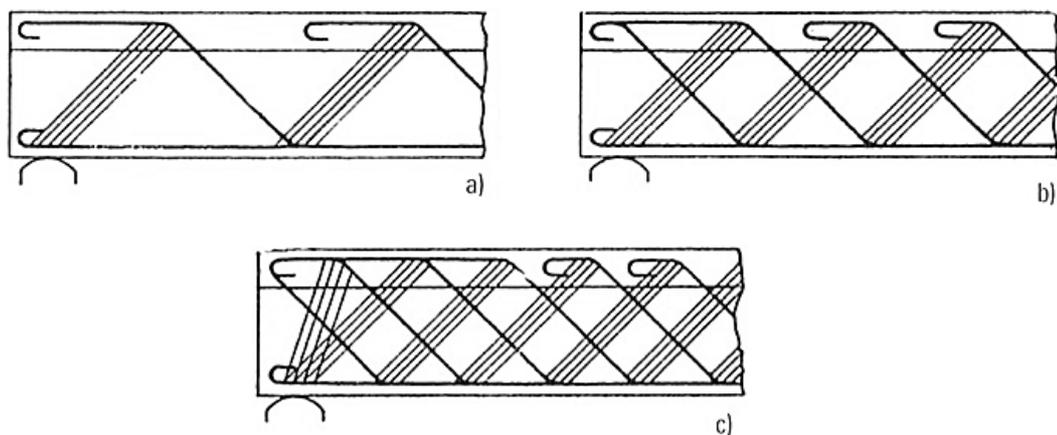


Figura 2.0-4. Modelos de estructuras de entramado para sistemas de diagonales: a) Simple, b) Doble y c) Triple, en busca de vigas de hormigón armado según [Mörsch 1922, 34]. (Imágenes tomadas de [Kurrer 2008, 564]).

Por consiguiente, se está tomando como punto básico de partida el planteamiento de optimización definido por Mörsch [5][6] para obtener estructuras más eficientes en base a las direcciones de las tensiones principales y la trayectoria de las líneas isostáticas, que Mörsch también aplicó en sus esquematizaciones de vigas de hormigón, de acuerdo a su célebre «analogía de la celosía» equivalente ideal de barras articuladas entre sí, como describe Brufau [7] y se infiere de las figuras 2.0.5 y 2.0-6, constituida por:

[4] Muttoni, A. (2011). *The Art of Structures. Introduction to the Functioning of Structures in Architecture*, p. 164.

[5] Mörsch, E. (1907). *Versuche über die Schubwirkungen bei Eisenbetonträgern*, p. 224.

[6] Mörsch, E. (1922). *Der Eisenbetonbau. Seine Theorie und Anwendung*.

[7] Brufau Niubó, R. (1988). *Análisis crítico y propuesta de un método de estudio de vigas de hormigón armado, con especial atención a su comportamiento ante solicitaciones de corte, para cualquier configuración de su armadura, de su forma y de sus condiciones de enlace*, p. 127.

- Un cordón comprimido de hormigón no fisurado.
- Un cordón traccionado formado por las armaduras longitudinales principales.
- Unos montantes traccionados, definidos por las barras transversales verticales.
- Unas diagonales ideales comprimidas de hormigón no fisurado, definidas por las zonas entre fisuras (bielas teóricas), que pueden considerarse rectas, por serlo de forma aproximada las fisuras.

Según se utilicen, para la esquematización de las vigas de hormigón, estribos transversales verticales o barras inclinadas levantadas, la estructura se comporta y se asemeja a una estructura triangulada distinta. En la figura 2.0-5 se aprecia la armadura tipo Howe (también conocida como viga “en N” de diagonales comprimidas), mientras que en la figura 2.0-6 se muestra la viga triangulada tipo Warren (también conocida como viga conformada en diagonales “en W”), correspondientes a las analogías de las celosías equivalentes ideales de Mörsch de una viga de estribos verticales y una viga con barras levantadas inclinadas ^[8], respectivamente.

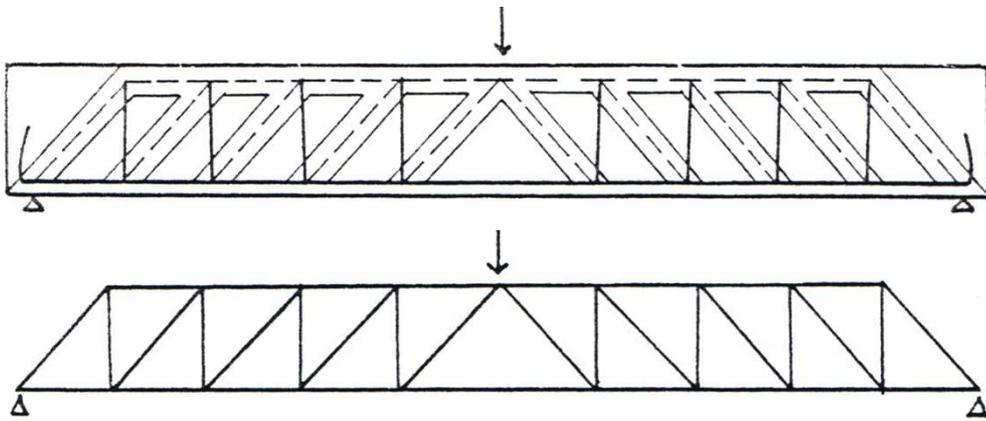


Figura 2.0-5. Esquematización de viga de hormigón armado, y celosía simple equivalente ideal tipo Howe para analogía de una viga de estribos verticales según Mörsch. (Imagen tomada de [Brufau Niubó 1988, 128]).

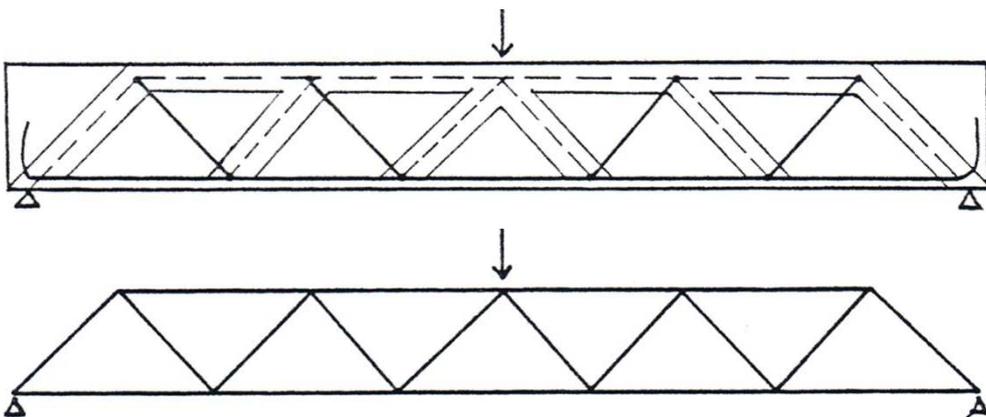


Figura 2.0-6. Esquematización de vigas de hormigón armado y celosía simple equivalente ideal tipo Warren para analogía de una viga con barras levantadas inclinadas según Mörsch. (Imagen tomada de [Brufau Niubó 1988, 129]).

[8] Brufau Niubó, R. (1988). *Análisis crítico y propuesta de un método de estudio de vigas de hormigón armado, con especial atención a su comportamiento ante solicitaciones de corte, para cualquier configuración de su armadura, de su forma y de sus condiciones de enlace*, pp. 128 y 129.

De acuerdo a los modelos de sistemas de la figura 2.0-4, es posible realizar las esquematizaciones de vigas de hormigón como celosías múltiples equivalentes, las cuales se definen geoméricamente y se analizan considerando que están formadas por la superposición de varias celosías simples ^[9]. Con la esquematización en celosías múltiples equivalentes, se aprovecha una mayor parte del hormigón de la viga.

A este concepto de esquematización de las vigas de hormigón hace referencia Torroja ^[10] para exponer que “la viga puede considerarse como una especie de triangulación en la que los estribos trabajan como montantes en tracción, y el hormigón como diagonales en compresión”, en el caso que los estribos sean necesarios al no disponer de barras levantadas para evitar que el elemento resistente no se rompa aunque el hormigón se agriete a 45° debido al efecto de tracción producida por el esfuerzo de cortante, a pesar de que los estribos no acusan alargamiento, debido a dicho esfuerzo cortante, en la dirección normal a la directriz. La adecuación de las armaduras del hormigón armado en base a las sollicitaciones tensionales de la pieza permite una distribución “lógica” de las armaduras y que **Eduardo Torroja Miret** (1899-1961) argumenta de la siguiente manera:

“Gracias a esta posibilidad, puede darse a la pieza de hormigón armado, en cada sección, la armadura y la resistencia longitudinal y transversal que necesite, dosificando en cada zona, la armadura, tanto longitudinal como transversal, con gran economía.”

[Torroja Miret 1957, 2010, 127].

De igual forma, es posible estudiar vigas en voladizo a través del esquema de una viga de celosía equivalente ideal, a la vez que se puede analizar el comportamiento de la correspondiente estructura arco-tirante como se muestra en la figura 2.0-7.

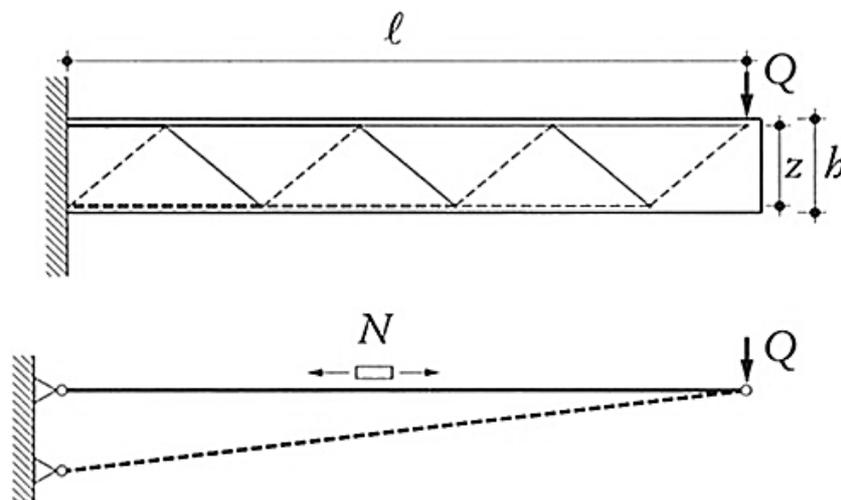


Figura 2.0-7. Vigas de celosía equivalentes ideales y estructura arco-tirante para vigas en voladizo con carga puntual Q en el extremo. (Imagen tomada de [Muttoni 2011, 175]).

Para estructuras en voladizo el tirante se genera en la parte superior, mientras que el arco lo hace en la parte inferior. La simplificación y esquematización en vigas

^[9] Brufau Niubó, R. (1988). *Análisis crítico y propuesta de un método de estudio de vigas de hormigón armado, con especial atención a su comportamiento ante sollicitaciones de corte, para cualquier configuración de su armadura, de su forma y de sus condiciones de enlace*, p. 130.

^[10] Torroja Miret, E. (1957). *Razón y ser de los tipos estructurales*. Reimpreso en 2010, p. 127.

de celosía equivalentes permite, de acuerdo a las condiciones de equilibrio, determinar las fuerzas interiores de las vigas en voladizos y predecir también las deformaciones. Ello permite obtener las fuerzas máximas de tracción y de compresión de la celosía equivalente ideal y, en definitiva, de la viga de hormigón en voladizo analizada ^[11].

Este concepto, o principio de optimización estructural desde la geometría, también se puede utilizar para diseñar vigas de entramado o vigas de celosía dado que se pueden entender las armaduras como el resultado de la esquematización y simplificación, como se muestra en la figura 2.0-8, de las vigas de hormigón armado equivalentes considerando las bielas y los tirantes. En definitiva, se pueden obtener las armaduras en base a las direcciones principales de tensiones, representadas por las líneas isostáticas, que se generan en el interior de las vigas de alma llena de acuerdo a las cargas actuantes y las condiciones de equilibrio correspondientes.

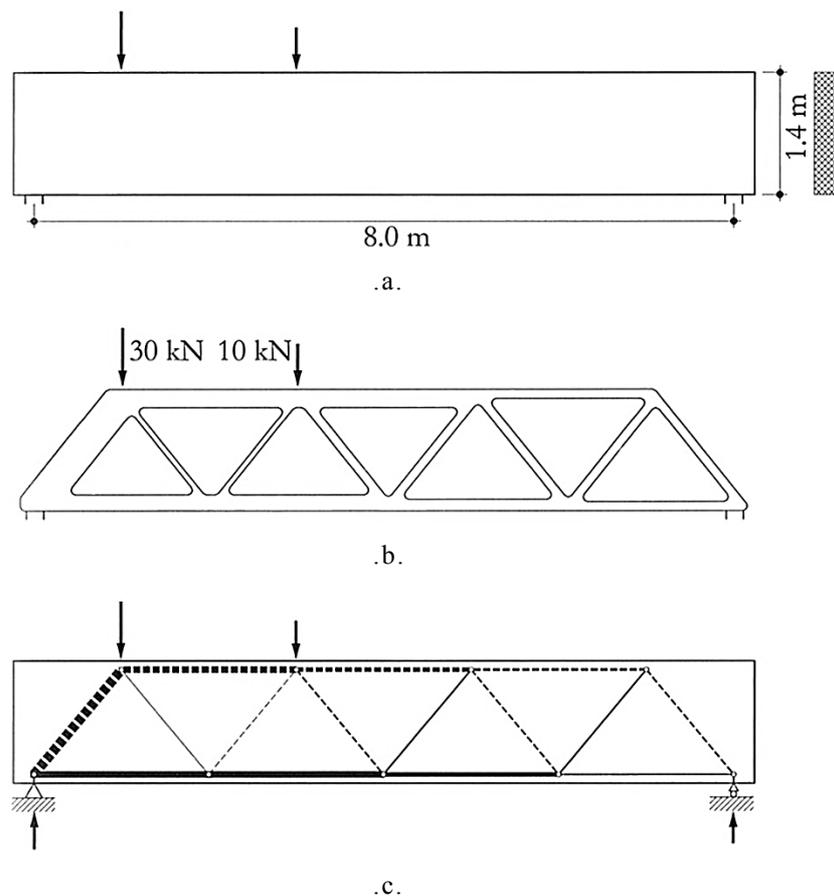


Figura 2.0-8. a) Viga maciza apoyada en los extremos, b) y c) Viga de celosía de «resistencia equivalente» y fuerzas en una viga definidas utilizando la analogía de la celosía equivalente ideal tipo Warren. (Imágenes tomadas de [Muttoni 2011, 163]).

De la figura 2.0-8b cabe destacar que el dimensionado de las barras de los cordones y de las diagonales, de la viga Warren, se ha realizado de acuerdo al concepto de «resistencia equivalente», ajustando la sección transversal de cada barra a los esfuerzos que debe soportar, para estados límite últimos. En la figura 2.0-8c, de acuerdo a la analogía de la celosía equivalente ideal tipo Warren, se describen las

^[11] Muttoni, A. (2011). *The Art of Structures. Introduction to the Functioning of Structures in Architecture*, pp. 175 y 176.

fuerzas internas grafiando con el grosor de las líneas el gradiente de dichas fuerzas, indicando en línea continua las fuerzas de tracción y en línea discontinua las fuerzas de compresión que se generan en el interior de la viga maciza.

En este contexto, es posible pensar que el mismo planteamiento y análisis de optimización realizados por Mörsch ^{[12][13]} en vigas de hormigón armado, atendiendo a las direcciones de las tensiones principales y, en síntesis, en base al análisis de las líneas isostáticas de tensiones, permiten diseñar estructuras de entramado más eficientes, de acuerdo con lo anteriormente expuesto, siendo el análisis de este fundamento el objetivo principal en el presente capítulo, en la tipología estructural objeto de esta Tesis, vigas de celosía y armaduras metálicas, para el posterior análisis de mallas espaciales envolventes de edificios en altura como sistema estructural.

Por esta razón, como se representa en la figura 2.0-9, las vigas de celosías o armaduras pueden entenderse como el resultado de la optimización estructural, mediante la desmaterialización o vaciado de las zonas menos solicitadas de las vigas macizas o de alma llena equivalentes. Los valores de rigidez a flexión y de capacidad resistente obtenidos en las vigas de entramado son similares y/o equivalentes a la estructura inicial, pero con un peso propio menor y, en consecuencia, un coste económico inferior al elemento resistente de alma llena equivalente. De esta forma, aligerando la zona de baja eficiencia del alma, se optimiza el rendimiento estructural, obteniendo una mayor rentabilidad, implicando a su vez un mejor comportamiento de la estructura con respecto a la sección de alma llena inicial, para un mismo estado de cargas y condiciones de equilibrio.

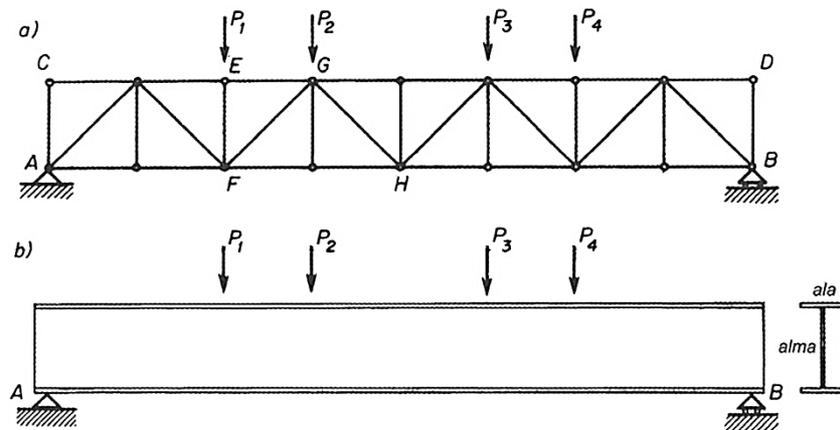


Figura 2.0-9. Viga de alma llena (b) y su geometría equivalente en celosía (a) para un mismo estado de cargas y condiciones de equilibrio. (Imagen tomada de [Argüelles Álvarez et al. 2007, 10.2]).

En base a lo descrito con anterioridad es posible concluir que el principal aspecto que permite la optimización de las estructuras de entramado o de celosía con respecto a las vigas de alma llena, reside en el ahorro de material en la sección del elemento resistente derivado de que, en las estructuras trianguladas, las barras trabajan principalmente a esfuerzos axiales mientras que las vigas de alma llena están sometidas, esencialmente, a esfuerzos de flexión y corte. De esta forma, en las vigas de entramado la característica mecánica de mayor relevancia reside en el producto $E \cdot A$ (rigidez axial) de sus barras, mientras que en las vigas de alma llena

[12] Mörsch, E. (1907). *Versuche über die Schubwirkungen bei Eisenbetonträgern*.

[13] Mörsch, E. (1922). *Der Eisenbetonbau. Seine Theorie und Anwendung*.

equivalentes, el factor determinante es el producto $E \cdot I$ (rigidez a flexión) de la barra, como se muestra en la figura 2.0-10.

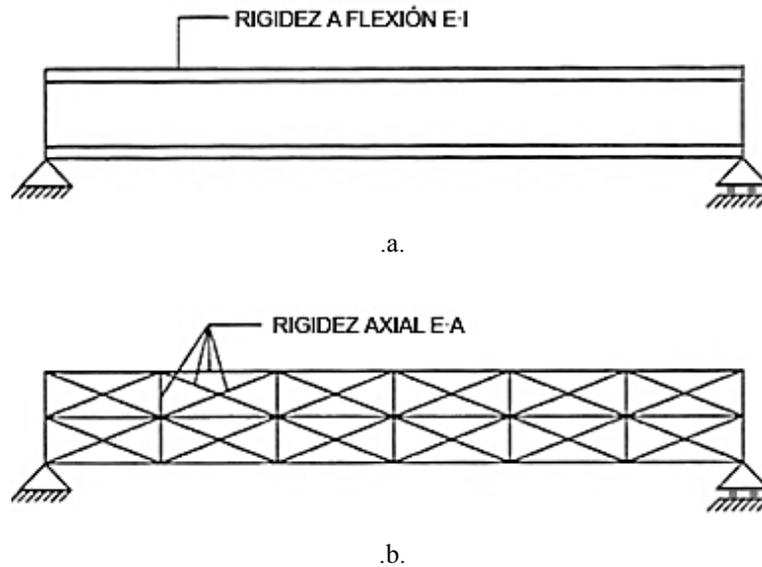


Figura 2.0-10. Modelos de vigas: a) Modelo de viga de alma llena, b) Viga de celosía equivalente. (Notación adaptada de [Kurrer 2008, 364]).

La importancia de la forma y la geometría de la viga o de la estructura que corresponde, reside en que son unas variables de diseño que influyen sustancialmente en la eficiencia de dicha estructura, como se desprende en las figuras 2.0-11 y 2.0-12, en las cuales se compara el rendimiento estructural de distintas tipologías estructurales de sección constante y sección variable, relacionando el peso propio (cantidad de material) y las deformaciones (flechas) en el punto medio de las vigas con la esbeltez geométrica horizontal (l/h), respectivamente.

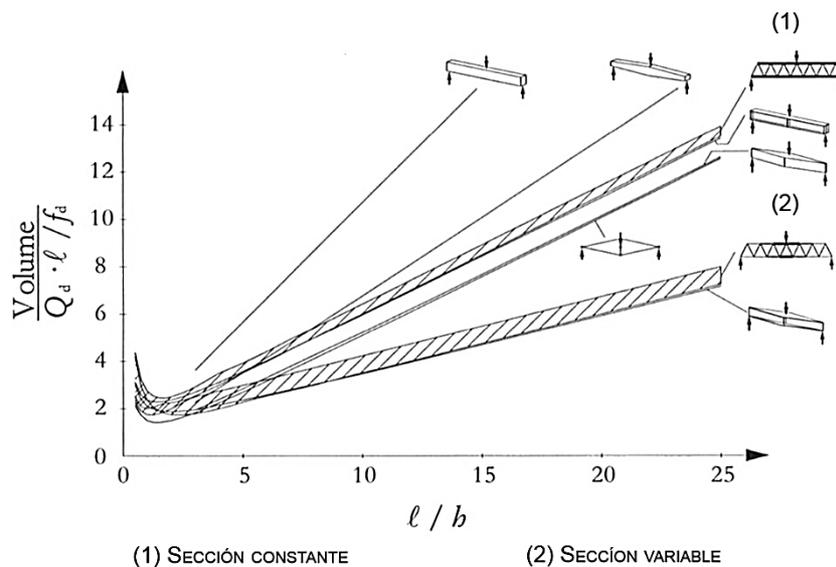


Figura 2.0-11. Relación entre el peso propio de las estructuras y la esbeltez geométrica horizontal (l/h) para una misma luz l , carga Q_d y resistencia del material f_d . (Imagen adaptada de [Muttoni 2011, 172]).

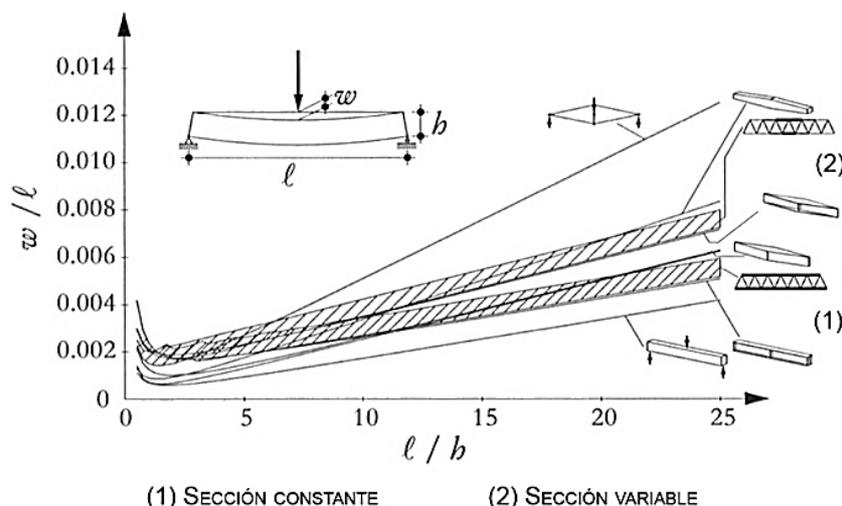


Figura 2.0-12. Flecha en el punto medio de la viga para carga puntual en relación con la esbeltez geométrica horizontal (l/h). Deformación máxima unitaria en el material de $\varepsilon = 0.001$. (Imagen adaptada de [Muttoni 2011, 173]).

En ambos comparativos se aprecia que en las geometrías de sección variable, de acuerdo a las solicitaciones, (mayor sección en la parte central de las vigas y los cordones de las celosías, donde los esfuerzos son mayores), se obtienen mejores rendimientos estructurales y, por lo tanto, estructuras más óptimas y eficientes.

En cuanto al rendimiento estructural de vigas de celosía se refiere, su estimación se basa en el estudio comparativo, atendiendo a los distintos parámetros de diseño que influyen en la eficiencia de dichas armaduras, como se desprende de los estudios, acerca de esta temática, realizados por Estévez y Martín ^{[14][15]}, en base al rendimiento resistente (R_r) y al rendimiento global (R_g) de las vigas de celosía analizadas, y que se aborda en el presente capítulo con una clara intención continuista, previo al tratamiento de la temática objeto de estudio de la presente Tesis.

La aplicación de la temática propia que se presenta, requiere de una breve reseña de la metodología adoptada. Se realiza un estudio comparativo de armaduras en base a los distintos parámetros de diseño, no sólo para determinar cuáles tienen un mejor rendimiento y comportamiento estructural y, en definitiva, cuantificar qué geometrías son más eficientes, sino que además se pretende determinar la relación de dicho rendimiento y comportamiento para cada una de las armaduras, con el principio de optimización expuesto y de mejora de la eficiencia de las estructuras de entramado, de acuerdo a las direcciones de las tensiones principales y, consecuentemente, a la trayectoria de las líneas isostáticas de los elementos resistentes de alma llena equivalentes analizados previamente con modelos de elementos finitos en 2D.

Al tratarse de un estudio de estructuras trianguladas en su mayoría (todas ellas, excepto el caso singular de la viga Vierendeel), es decir, geometrías con deformaciones propias pequeñas, como se expone en el apartado 2.2, se realiza un análisis lineal para determinar las deformaciones máximas (flechas) en estados límite de servicio (ELS), de las distintas armaduras analizadas en el estudio comparativo. De esta forma se limitan los efectos de segundo orden producidos por el pandeo, para realizar la comprobación tensional de los perfiles de dichas vigas de celosía, en

^[14] Estévez Cimadevila, F.J.; Martín Gutiérrez, E. (2002). *Influencia de los parámetros de diseño en el rendimiento estructural de vigas de celosía*.

^[15] Estévez Cimadevila, F.J.; Martín Gutiérrez, E. (2003). *Análisis del rendimiento estructural de vigas Vierendeel*.

estados límite últimos (ELU), tanto a nivel de barra como a nivel de sección, (considerando también las características geométricas y mecánicas de las secciones eficaces de los perfiles de clase 4), de acuerdo a la normativa utilizada. El análisis para el estudio comparativo se realiza con las distintas tipologías de vigas de celosía, considerando los distintos parámetros de diseño y opciones de cálculo. Por lo tanto es necesario un análisis paramétrico de las distintas geometrías de vigas de celosía comunes consideradas: la viga Pratt, la viga Howe, la viga Warren, la viga “en K”, y la viga “en X”. Asimismo, se consideran sus variantes geométricas (distintas disposiciones de montantes, la viga “en K invertida”, vigas en voladizo, etc.), distintos tipos de cargas (cargas puntuales/cargas distribuidas), o distintos tipos de uniones (barras de relleno articuladas A-A o rígidas R-R en los extremos) son algunas de las opciones consideradas en el comparativo realizado.

Tal y como se analiza en los siguientes apartados, en el momento de plantear la geometría de una viga de celosía son varios los parámetros que influyen en su diseño. Es por ello por lo que son diversas las posibilidades u opciones que hay que valorar y analizar en el momento de determinar las características de la geometría que se adecua mejor a las necesidades requeridas para, así, dar cumplimiento a las condiciones de dimensionado correcto para ELU, a la vez que se da una respuesta satisfactoria al cumplimiento de la normativa para ELS.

La importancia de este estudio comparativo reside en que las conclusiones obtenidas y presentadas al final del capítulo sirven para determinar unas pautas para el diseño y el análisis de vigas de celosía planas de mayor eficiencia, basando el análisis de acuerdo a los objetivos que se presentan a continuación. A la vez, se pretende que dichas conclusiones también sirvan para las estructuras de entramado en el espacio, las cuales se estudian y se analizan en los capítulos 3, 4 y 5, proponiendo un procedimiento de trabajo para el diseño y el análisis de mallas de acero estructurales envolventes de edificios en altura siendo, ésta, la temática principal de la Tesis y de las publicaciones ya presentadas ^{[16][17][18]}.

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

[17] Señis López, R. (2013/b). *Isostatic lines' study to optimize steel space grid envelope structures for tall buildings according to their solicitations.*

[18] Señis, 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]

2.1 Objetivos del estudio comparativo del rendimiento estructural de vigas de celosía planas según su geometría

Los objetivos del estudio comparativo de vigas de celosía que se lleva a cabo en el presente capítulo, se exponen a continuación. No se trata únicamente de un estudio acerca del rendimiento estructural de las distintas triangulaciones de vigas de celosía (objetivos generales), sino que se pretende obtener resultados válidos para del desarrollo final de la Tesis (objetivos específicos).

2.1.1 Objetivos generales del estudio comparativo de vigas de celosía planas

Los objetivos generales del presente estudio comparativo, necesarios para evaluar la influencia de las opciones de cálculo y de los parámetros de diseño en el rendimiento estructural de vigas de celosía planas, son:

- Determinar la influencia de las distintas opciones de cálculo en el rendimiento estructural de vigas de celosía. En este estudio preliminar se analizan las distintas triangulaciones consideradas para dos tipos de carga (acciones uniformemente distribuidas y acciones equivalentes en los nudos del cordón superior). Asimismo, se analiza la influencia de las condiciones de las barras de relleno en los extremos (barras articuladas A-A frente a barras con nudos rígidos R-R).
- Determinar la influencia de los distintos parámetros de diseño de las vigas de celosía: tipo de triangulación, longitud y canto de la celosía, así como las dimensiones de los recuadros. En la figura 2.1-1, se aprecia la influencia del canto de las celosías en los esfuerzos axiales de las barras.

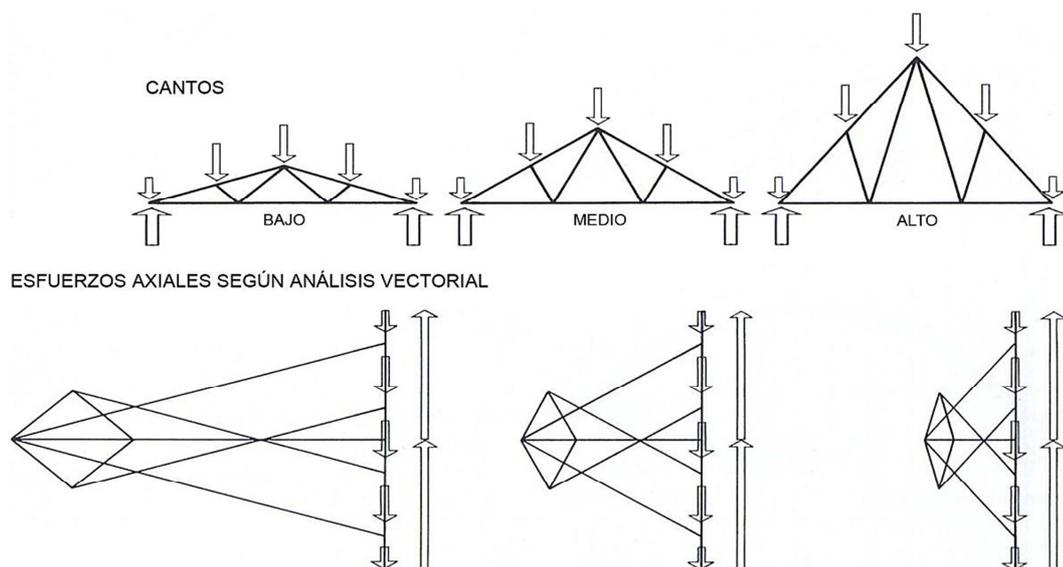


Figura 2.1-1. Influencia del canto en los esfuerzos resultantes sobre las barras para cargas puntuales en los nudos del cordón superior. (Imagen adaptada de [Engel 2001, 140]).

En la figura 2.1-1 se aprecia la influencia del canto h de las vigas de celosía en los esfuerzos axiales resultantes que solicitan las barras de dichas celosías y que se representan según análisis vectorial. Se observa, en la representación de las fuerzas para el equilibrio estructural que, para un mismo estado

de cargas y longitud de las celosías, los esfuerzos axiales de las barras de la celosía de menor canto (mayor esbeltez geométrica horizontal l/h) son mayores. De igual forma, para las estructuras de entramado de menor esbeltez geométrica horizontal (mayor canto), los esfuerzos resultantes son inferiores en comparación con los cantos de menor dimensión mostrando, así, la influencia de dicho parámetro en los resultados presentados.

2.1.2 Objetivos específicos del estudio comparativo de vigas de celosía planas

Los objetivos específicos del presente estudio comparativo del rendimiento estructural, para poder desarrollar la segunda parte de la Tesis, correspondiente al procedimiento de optimización de mallas espaciales estructurales de acero envolventes de edificios en altura, son:

- Establecer que «parámetros de control» utilizados, considerando las deformaciones para ELS (flecha máxima admisible) y la resistencia admisible para ELU (perfiles estrictos), son válidos para determinar el rendimiento estructural y la eficiencia de las estructuras de entramado o vigas de celosía.
- Determinar que triangulaciones o vigas de celosía ofrecen un mejor comportamiento o mayor rendimiento estructural y, en consecuencia, determinar que geometrías son más eficientes. Cabe destacar el especial interés en analizar las tipologías verticales en voladizo, de acuerdo a la figura 2.1-2, equivalentes a edificios en altura, las cuales se desarrollaran y serán objeto de estudio en la segunda parte de la Tesis.

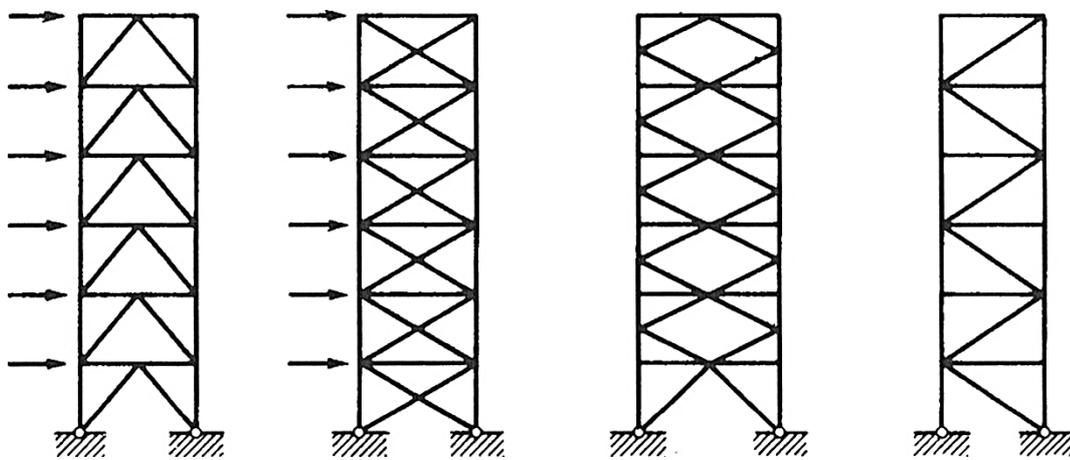


Figura 2.1-2. Triangulaciones de edificios en altura. (Imagen tomada de [Argüelles Álvarez et al. 2007, 10.6]).

- El último objetivo del presente estudio comparativo, y de alto grado de definición en la temática, es determinar y cuantificar el rendimiento estructural de las distintas tipologías de celosías, cuando su geometría se adapta o se asemeja a la trayectoria de las líneas isostáticas de tensiones del elemento estructural equivalente de alma llena. Se pretende establecer la relación entre el rendimiento de una viga de celosía y su geometría en base a la identificación de la dirección de los esfuerzos o tensiones principales. Este objetivo se plantea en base a los conceptos de optimización de estructuras estudiados en el capítulo anterior, de acuerdo a autores como Robert Maillart (1872-1940), Eduardo Torroja (1899-1961), Pier Luigi Nervi (1891-1979), Ricardo Morandi (1902-1989), Félix Candela (1910-1997), o el propio Morsch, entre otros.

2.2 La viga de celosía como tipología estructural de grandes luces

La viga de celosía, también conocida en el ámbito de la arquitectura y de la ingeniería estructural como armadura, es una estructura discontinua o reticular de barras lineales, sometidas mayoritariamente a esfuerzos axiales, que convergen en las uniones o nudos, generando en su mayoría formas trianguladas en el caso de celosías planas, y pirámides tridimensionales si se trata de celosías espaciales. La finalidad de las armaduras es salvar distancias de una cierta entidad entre los soportes (a partir de 15-20 m), resultando, las estructuras reticulares en celosía, una solución estructural y constructiva más económica que las vigas de alma llena equivalentes de gran canto, fruto de su discontinuidad en el plano y de elevada rigidez a flexión al tener los cordones o perfiles principales separados por un sistema de barras (montantes y diagonales) que definen la geometría triangulada en alzado, como indica Brufau ^[1]. Las armaduras dispuestas y diseñadas para sostener cubiertas o tejados a dos aguas, se denominan cerchas, a pesar de que en la mayoría de las ocasiones estas estructuras se suelen diseñar y ejecutar con el cordón superior plano.

En realidad la viga de celosía o armadura es un entramado compuesto por barras de longitudes pequeñas, donde la condición principal que debe cumplir es la de ser estructuras geoméricamente acordes al principio de las pequeñas deformaciones. El triángulo, como se muestra en la figura 2.2-1, es la forma geométrica más adecuada para ello y, por lo tanto, el elemento o unidad fundamental de las vigas de celosía, dándoles el nombre de estructuras trianguladas. Esta condición permite que los nudos puedan diseñarse como articulados obteniendo, así, que el comportamiento de las barras sea fundamentalmente axial frente a los reducidos esfuerzos de flexión, a la vez que se reducen los efectos de segundo orden producidos por la propia deformación del entramado (deformaciones muy pequeñas producidas por esfuerzos axiales, de acuerdo a la ley de Hooke, como se muestra en la figura 2.2-1). Mientras que en una estructura reticular no triangulada, y por lo tanto una estructura mucho más deformable que la anterior, (como es el caso de la viga Vierendeel), las deformaciones generales y los desplazamientos de los nudos, que se derivan de los esfuerzos de flexión como se muestra en la figura 2.2-1 referida, pueden generar esfuerzos de segundo orden, de una cierta entidad, que deben considerarse en el análisis dada su magnitud y su relevancia en el cálculo de esfuerzos y deformaciones ^[1].

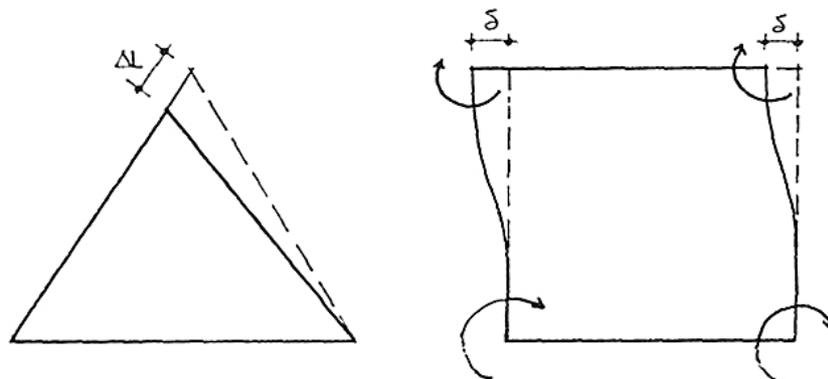


Figura 2.2-1. Deformación de un triángulo por acortamiento de las barras sometidas a esfuerzos axiales, y deformación de un cuadrado sometido a esfuerzos de flexión en los nudos. (Imagen tomada de [Brufau Niubó 2004/b, 9]).

[1] Brufau Niubó, R. (2004/b). *La flexión pura y la flexión simple*, pp. 7 y 9.

Las armaduras se pueden construir con la combinación de distintos elementos como pueden ser arcos, tirantes, cables, montantes, y barras complementarias que estabilizan la estructura y permiten que sean estáticamente determinadas, a la vez que es posible su construcción con distintos materiales (acero, hormigón, madera, aluminio, etc.).

Como ya se ha mostrado en la figura 2.0-9, la principal característica de las armaduras reside en el ahorro de material para un mismo estado de cargas y las mismas condiciones de contorno, si se compara con una viga de alma llena equivalente, reflejándose en una mayor eficiencia. Pero además, esta tipología estructural ofrece las siguientes ventajas, como describen Iglesias, Alonso y Chica ^[2]:

- Es la solución que permite cubrir las mayores luces.
- Constituye la solución más económica a partir de 22 m de luz.
- Constituye la tipología estructural más ligera y diáfana.
- Permite la integración de las instalaciones auxiliares en la estructura.
- Sus elementos, en general, trabajan únicamente a esfuerzos de tracción o de compresión, (frente a los esfuerzos principales de flexión y cortante propios de las vigas de alma llena o alveolar).

Como se ha descrito anteriormente, una de las principales ventajas de las vigas de celosía, como tipología estructural, reside en que las barras trabajan principalmente a esfuerzos axiales, mientras que los esfuerzos de flexión que se producen en las barras son comparativamente pequeños. Esta característica junto con su ligereza hace que las vigas de celosía o armaduras sean la solución más económica, como se ha expuesto, para cubrir grandes luces. De hecho, una estructura de celosía tiene un comportamiento estructural muy parecido al de una estructura arco-tirante, de acuerdo a la figura 2.2-2, con ciertos paralelismos en la funcionalidad de ambas tipologías estructurales ^[3].

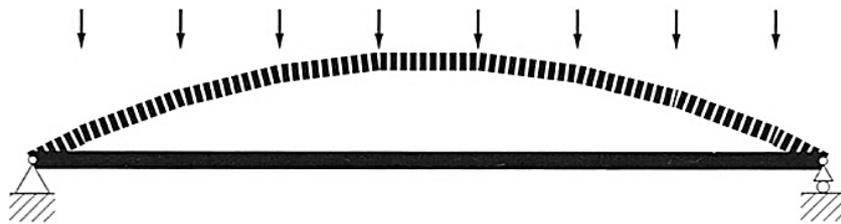


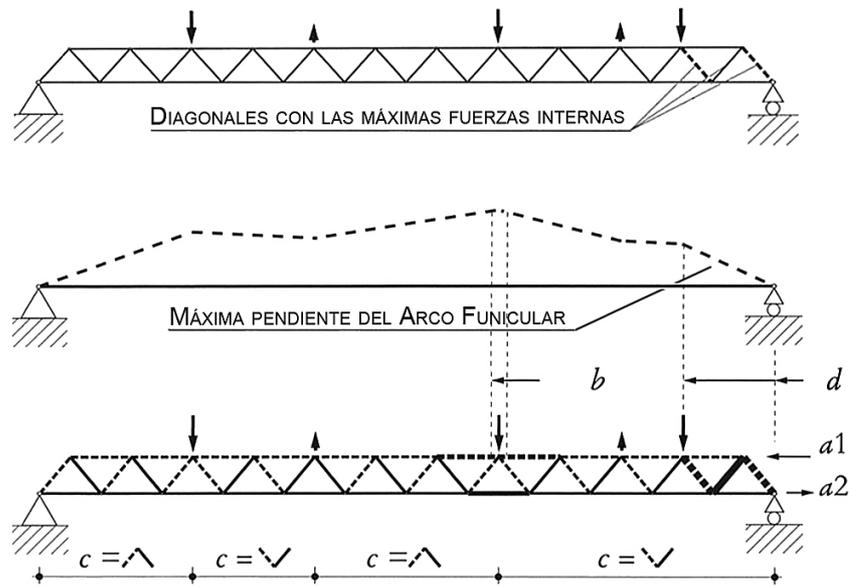
Figura 2.2-2. Esquema funcional de una estructura arco-tirante con apoyos en los extremos. (Imagen tomada de [Muttoni 2011, 143]).

De acuerdo a esta simplificación o analogía, cuando se interpreta el comportamiento estructural en base a las características generales y particulares de la viga de celosía, se puede comparar o asemejar con una estructura de arco-tirante, la cual generalmente es fácil de analizar. De esta forma, es posible estudiar cualitativamente una celosía de cordones paralelos, para la comparación funcional de ambas estructuras, de acuerdo a las cuatro reglas básicas que describe Muttoni ^[3], y que se ejemplifican en la figura 2.2-3:

^[2] Iglesias, G.; Alonso, Á.; Chica, J.A. (2004). *Guía de diseño para estructuras en celosía resueltas con perfiles tubulares de acero*, p. 6.

^[3] Muttoni, A. (2011). *The Art of Structures. Introduction to the Functioning of Structures in Architecture*, p. 139.

- Cuando el arco de una estructura arco-tirante está encima del tirante, en la estructura de celosía el cordón superior está sometido a compresión, mientras que el cordón inferior está solicitado a tracción.
- Allí donde la distancia entre el arco y el tirante es mayor, las barras de los cordones de la celosía están sometidas a mayores fuerzas internas.
- Las diagonales de la celosía inclinadas en la misma dirección que el arco funicular, estarán sometidas a compresión, mientras que las otras diagonales más similares a la forma de una catenaria estarán sometidas a tracción.
- Para una misma inclinación, las diagonales de la celosía con las mayores fuerzas internas estarán ubicadas donde el arco funicular tiene mayor inclinación o pendiente.



a_1 = cordón superior comprimido (\equiv arco superior comprimido); a_2 = cordón inferior traccionado (\equiv tirante traccionado); b = máximas tensiones en los cordones (\equiv máxima separación entre el arco y el tirante); c = diagonales sometidas a esfuerzos de tracción o de compresión; d = diagonales más solicitadas tensionalmente (\equiv máxima pendiente del arco funicular).

Figura 2.2-3. Identificación de las diagonales con mayor fuerzas internas en base al arco funicular y análisis cualitativo de la celosía por analogía con el arco-tirante. (Notaciones adaptadas de [Muttoni 2011, 138 y 139] respectivamente).

De la figura 2.2-3, cabe destacar que las barras estarán comprimidas (indicadas en línea discontinua) o traccionadas (indicadas con línea continua), pudiendo invertir su esfuerzo axial de tracción-compresión, según la intensidad de las fuerzas exteriores representadas, mostrándose en la figura un esquema orientativo.

2.2.1 Teoría general de las vigas de celosía o armaduras planas

En primer lugar, de acuerdo a su ubicación en el espacio, las vigas de celosía o armaduras se clasifican en estructuras planas o simples y en estructuras tridimensionales. En la presente Tesis se abordan ambas disposiciones, las armaduras planas en el presente capítulo para el estudio comparativo de su rendimiento estructural, de acuerdo a lo expuesto anteriormente, y las celosías tridimensionales en los capítulos posteriores, utilizadas como mallas espaciales de acero envolventes de edificios en altura, analizando su rendimiento y eficiencia, de acuerdo a sus sollicitaciones en base a las líneas isostáticas. En el caso de las celosías o armaduras planas, si los nudos son articulados, pueden dividirse desde el punto de vista estructural en:

- **Celosías articuladas simples:** son celosías estáticamente determinadas que cumplen la relación $b + 3 = 2n$, entre el número de barras b , y el número de nudos n , de forma que se trata de una estructura isostática ^[4]. Es por ello por lo que, este tipo de estructuras planas se pueden resolver con las leyes de equilibrio de la Estática con cualquiera de los métodos de equilibrio como es, entre otros, el *método de los nudos* o diagrama de Cremona-Maxwell, definido en el capítulo anterior. Se trata, pues, de formular las condiciones de equilibrio en cada nudo planteando el equilibrio, una vez calculadas las reacciones externas, en un nudo en el que sólo existan dos incógnitas, y calcular a continuación los esfuerzos en todos los restantes nudos.

Es posible que, sin cambiar el número de barras ni el número de nudos, se pueda obtener una estructura compuesta, en lugar de una estructura simple, como se muestra en la figura 2.2-4.

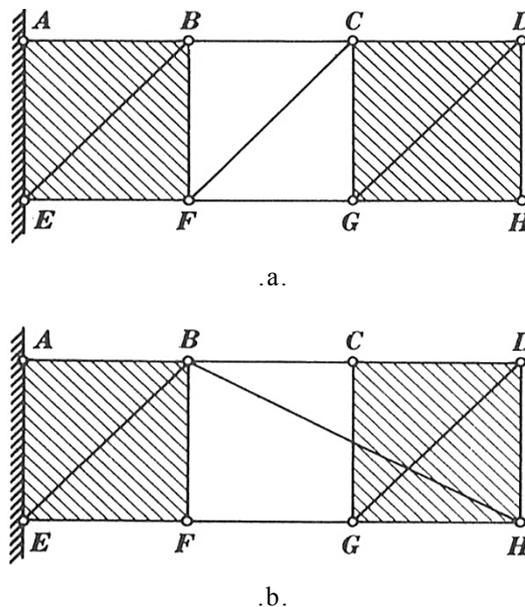


Figura 2.2-4. a) Celosía simple, b) Celosía compuesta. (Imagen tomada de [Timoshenko et al. 1965, 1981, 97]).

- **Celosías articuladas compuestas:** son celosías estáticamente determinadas que cumplen la relación $b + 3 = 2n$, entre el número de barras b , y el número de nudos n , de forma que se trata de una estructura isostática. No obstante,

^[4] Timoshenko, S.P.; Young, D.H. (1965). *Teoría de las estructuras*. Segunda edición traducida el 1981, p. 97.

no están incluidas en la categoría de estructuras planas simples, al ser su geometría resultado de unir dos o más celosías simples. Para su análisis, no se puede aplicar de forma directa y única el *método de los nudos*, ya que llega un momento en que en un nudo aparecen tres incógnitas, siendo habitual utilizar los siguientes procedimientos para resolverlas:

1. Aplicación el *método de los nudos* hasta llegar a un nudo con tres incógnitas, y aplicar el *método de las secciones*, propuesto inicialmente por Johann Wilhelm Schwedler (1823-1894) y tratado posteriormente por Karl Culmann (1821-1881) y August Ritter (1826-1908) como se ha expuesto en el capítulo 1, para obtener una de las incógnitas.
 2. Aplicación del *método de las estructuras secundarias*. Las estructuras compuestas se pueden descomponer en las estructuras simples que las constituyen, calculando las fuerzas de las barras y los nudos de las estructuras secundarias con los métodos de equilibrio anteriormente enunciados, siendo necesario la posterior superposición de las fuerzas en los nudos para obtener los resultados definitivos.
- **Celosías articuladas complejas:** son las celosías estáticamente indeterminadas, de forma que el número de barras es superior a $2n - 3$, para un determinado número de nudos n . Engloban cualquier tipo de celosía plana que no se incluya a las dos categorías anteriores, y se caracterizan por no poderse aplicar, para su resolución, ni el *método de los nudos* ni el *método de las secciones* ^[5], ya que en los nudos aparecen más de tres incógnitas, y no se puede realizar un corte que sólo aisle tres incógnitas. Se tratan de estructuras internamente hiperestáticas, como se muestra en la figura 2.2-5, que se deben resolver por el método de Henneberg ^[6] o por el método matricial de rigidez.

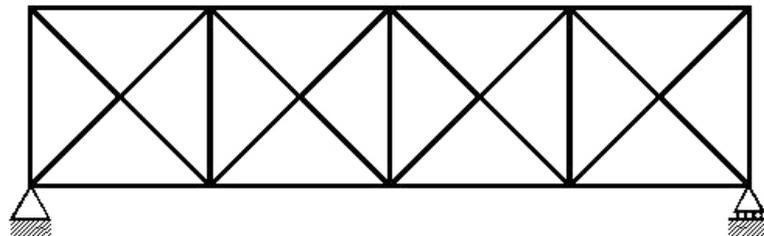


Figura 2.2-5. Geometría de una estructura internamente hiperestática. (Imagen propia).

El método de **Ernst Lebrecht Henneberg** (1850-1933) consiste en analizar una estructura simple equivalente a una compleja, como se muestra en la figura 2.2-6, que resulta de substituir las barras superfluas por otras barras y cargas para determinar así, las reacciones de la estructura y los esfuerzos de las barras.

El método analiza la estructura simple resultante en base a las dos condiciones particulares de carga siguientes ^[5]:

1. La misma carga que actúa sobre la estructura compleja dada.
2. Las fuerzas unitarias de igual dirección y sentidos contrarios, aplicadas en los nudos, que sustituyen a las barras eliminadas.

^[5] Timoshenko, S.P.; Young, D.H. (1965). *Teoría de las estructuras*. Segunda edición traducida el 1981, pp. 103 y 104.

^[6] Henneberg, E.L. (1886). *Lehrbuch der technischen mechanik. Part 1: Statik der starren systeme*.

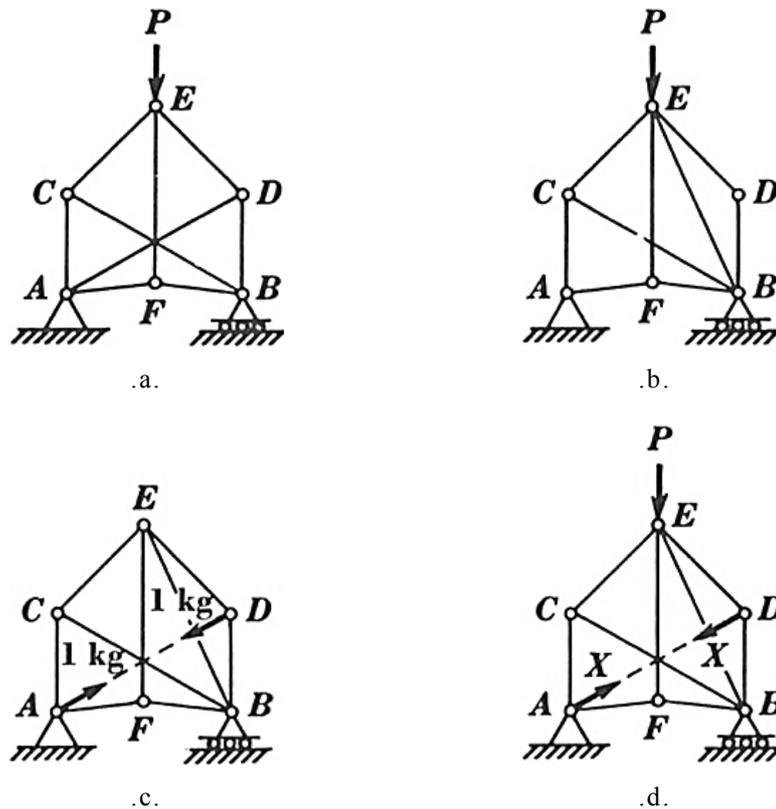


Figura 2.2-6. Ejemplo de celosía compleja analizada con el método de Henneberg sustituyendo las barras superfluas por otras barras y cargas. (Imagen tomada de [Timoshenko et al. 1965, 1981, 104]).

En la figura 2.2-6a, se aprecia que no es posible utilizar el *método de los nudos* o el *método de las secciones*, sin embargo en la figura 2.2-6b, al cambiar la barra AD por una barra BE se obtiene una celosía simple, correspondiente a la celosía compleja inicial, que se puede resolver por el *método de los nudos*. Superponiendo los resultados de los casos de las figuras 2.2-6bc, relativas a cada una de las condiciones de carga del sistema simple equivalente, se puede obtener el esfuerzo que se produce en cada una de las barras de la estructura de acuerdo a las cargas combinadas como se muestra en la figura 2.2-6d.

Es importante precisar que, en el caso de las estructuras complejas, generalmente no siempre es posible descubrir una forma crítica mediante una simple observación. Como se muestra en “la celosía compleja de la figura 2.2-7b, posee una forma crítica, a diferencia de la figura 2.2-7a que no la tiene. En tales casos, para determinar si una forma es, o no, crítica se recurre a un método general fundado en la consideración del sistema de $2n$ ecuaciones para un número de nudos n . Si este determinante es distinto de cero, las ecuaciones tienen una solución única; existe uno y sólo un conjunto de valores para los esfuerzos axiales capaz de satisfacer las condiciones de equilibrio en cada nudo y la estructura es rígida y estáticamente determinada. En cambio, si el determinante es nulo las ecuaciones de equilibrio no tienen solución única, lo que será siempre un índice de que la celosía tiene una forma crítica. Esta característica sugiere, entonces, un método para discernir si es crítica, generalmente conocido como «prueba de la carga nula»”, como describen Timoshenko y Young ^[7].

[7] Timoshenko, S.P.; Young, D.H. (1965). *Teoría de las estructuras*. Segunda edición traducida en 1981, p. 102.

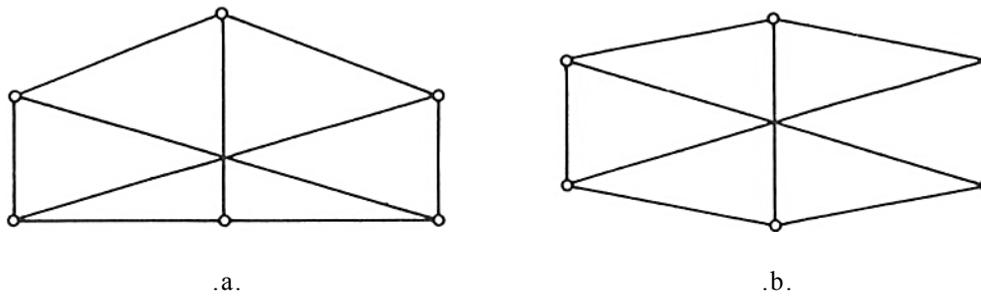


Figura 2.2-7. Ejemplos de estructura que no tiene forma crítica y estructura de forma crítica. (Imágenes tomadas de [Timoshenko et al. 1965, 1981, 102]).

Conviene precisar sucintamente como se establecen los criterios de clasificación indicados. Así, para que una estructura plana sea estáticamente determinada o totalmente isostática, debe de estar formada por nudos articulados y las barras sólo pueden estar solicitadas a esfuerzos axiales, siendo los momentos flectores nulos y, por lo tanto, también los cortantes si, como en el caso básico, no se considera el peso propio de las barras. Para que la estructura sea rígida, con los nudos articulados, las barras deben de generar triangulaciones o regiones trianguladas, adyacentes unas a otras, y debe de cumplir las siguientes condiciones de isostaticidad:

- **Isostaticidad externa.** Esta condición sirve para realizar un análisis global de la estructura y, por ello, permite calcular las reacciones externas de la estructura mediante el uso de las ecuaciones de la Estática. En este caso, sólo serán tres ecuaciones independientes para su estudio. La estructura dependerá de tres valores incógnita de acuerdo a las reacciones, de forma que el número de dichas reacciones r , será de tres.
- **Isostaticidad interna.** Esta condición permite determinar los esfuerzos internos de cada una de las barras que conforman la estructura. Dado que los nudos son articulados, no existen momentos flectores ni cortantes en las barras, las cuales están solicitadas únicamente a esfuerzos axiales. Esta característica conlleva dos ecuaciones por nudo (fuerzas verticales y fuerzas horizontales), y por lo tanto, se obtiene que el número total de ecuaciones de equilibrio es de $2n$. La isostaticidad interna requiere que se determine el valor axial de cada barra, por lo que, el número de incógnitas para dicha isostaticidad será igual al número de barras b .

De esta forma, se establece que la relación entre el número de incógnitas y el número de ecuaciones de equilibrio, de acuerdo a las reacciones r , de las barras b , y los nudos n , de la estructura, debe cumplir la siguiente igualdad:

$$r + b = 2n \quad (2.2.1)$$

donde, para una estructura plana estáticamente determinada o totalmente isostática, de acuerdo a lo anteriormente expuesto, es necesario que $r = 3$, quedando la ecuación (2.2.1), para dicho estado, según la siguiente expresión:

$$b + 3 = 2n \quad (2.2.2)$$

Sin embargo, si la relación entre el número de reacciones, barras y nudos no cumple la condición descrita anteriormente, hay dos posibles escenarios:

$r + b < 2n$ donde el sistema es inestable.
 $r + b > 2n$ donde el sistema es estáticamente indeterminado.

Es por ello por lo que, atendiendo a la elección de soportes y a la geometría de la estructura se definirá el tipo de sistema obtenido, tal y como se muestra en la figura 2.2-8.

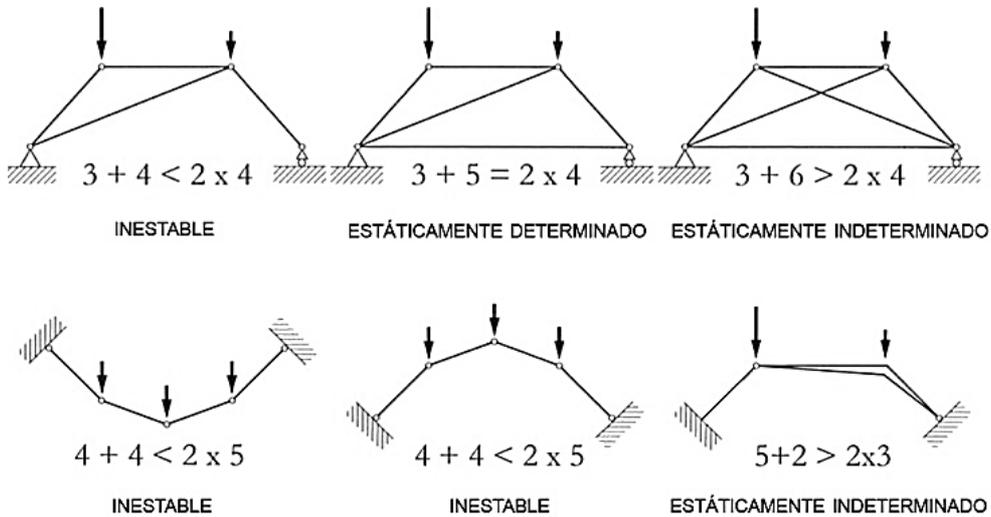


Figura 2.2-8. Determinación estática de diferentes sistemas estructurales para el caso que nos ocupa. (Notación adaptada de [Muttoni 2011, 128]).

También se debe indicar que si analizamos las vigas de celosía planas desde el punto de vista de los apoyos podemos tener dos tipos de vigas: las vigas exteriormente isostáticas y las vigas exteriormente hiperestáticas, como se muestra en la figura 2.2-9.

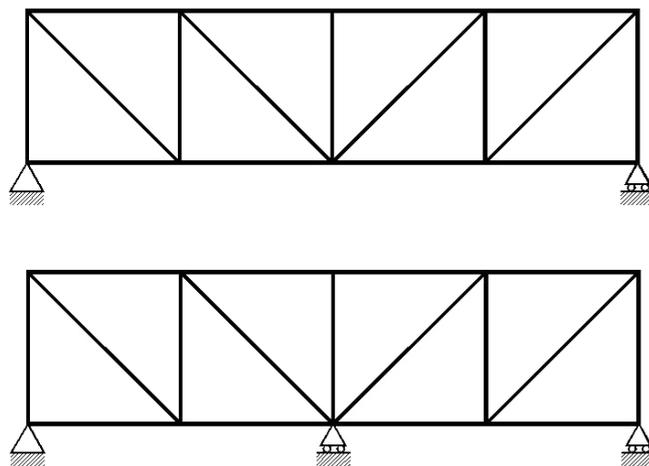


Figura 2.2-9. Estructuras exteriormente isostática e hiperestática respectivamente. (Imagen propia).

A su vez, las vigas de celosía planas de nudos articulados pueden ser desde el punto de vista de la triangulación interior, vigas internamente isostáticas, cuando la viga tiene el número de barras imprescindible y vigas internamente hiperestáticas, cuando tiene barras superfluas. Un ejemplo de este caso es la celosía en “cruz de San Andrés” o viga “en X” cuando las diagonales no están unidas en el punto medio o donde se cruzan. En el caso de estar unidas en el punto de cruce mediante una arti-

culación, el sistema será isostático determinado, mientras que si dicha unión es rígida, el sistema será estáticamente indeterminado.

Para el caso de estructuras tridimensionales con nudos articulados, formadas a partir de tetraedros, serán internamente isostática si el número de barras b y el número de nudos n que la conforman satisfacen la siguiente condición:

$$b + 6 = 3n \quad (2.2.3)$$

2.2.2 Clasificación de las vigas de celosía planas según la triangulación y la geometría

Según sus triangulaciones o geometría en alzado, las vigas de celosía o de entramado más comunes se pueden clasificar como:

- Vigas de celosía “en W”, también conocidas como vigas Warren.
- Vigas de celosía “en N”, también conocidas como vigas Pratt o vigas Howe, según la disposición de las diagonales.
- Vigas de celosía “en K”.
- Vigas de celosía “en X”, también conocidas como vigas en “cruz de San Andrés”.
- Otras vigas trianguladas
- Vigas de nudos rígidos y la viga Vierendeel.

2.2.2.1 *Viga Warren*

La **viga Warren**, también conocida como celosía de diagonales “en W”, fue patentada en el año 1848 por **James Warren** (-) y **Willoughby Monzoni** (-) ^[8]. Se utiliza con luces pequeñas y medianas, siendo considerada de aspecto agradable en el ámbito arquitectónico debido a su ligereza ya que su malla es menos tupida, lo cual, hace que su diseño sea muy apreciado por los arquitectos o los responsables de su diseño. Es por ello por lo que, este tipo de viga de celosía resulta relativamente ligera, presentando así, una buena resistencia mecánica respecto al coste de los materiales usados en su construcción. Las diagonales suelen formar triángulos equiláteros, aunque pueden definir triángulos isósceles con ángulos de hasta 45°, facilitando que los nudos sean muy parecidos entre ellos.

Uno de los aspectos de mayor relevancia en este tipo de triangulación, reside en que, según las características de la estructura horizontal o forjado a soportar, puede presentar problemas de excesiva longitud libre entre los nudos del cordón superior, en principio comprimido, lo cual implica una mayor luz de pandeo de dichas barras. Ante esta problemática, hay dos posibles soluciones. La primera consistiría en disminuir la base de los triángulos que forman la celosía, es decir, acortar la luz entre los nudos, haciendo la malla más densa. La segunda opción, y quizás la más habitual, sería disponer de montantes verticales intercalados, como se muestra en la figura 2.2-10, que acortan la luz de las barras del cordón superior sometidas a compresión, bajo la acción de cargas gravitatorias. En el caso de colocar doble montante (sin intercalar), se reducen los esfuerzos de flexión de las barras del cordón inferior en el caso de un peso propio de barras algo significativo.

[8] Brufau Niubó, R. (2004/b). *La flexión pura y la flexión simple*, p. 10.

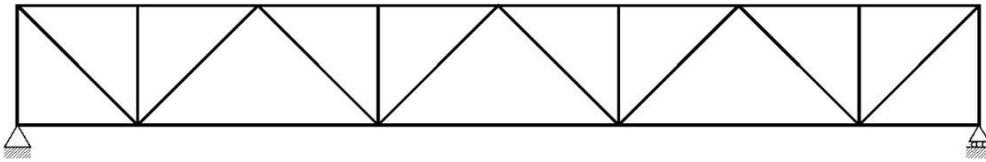


Figura 2.2-10. Geometría de la viga Warren con montantes intercalados. (Imagen propia).

El principal inconveniente de esta tipología reside en que las diagonales, las cuales tienen la misma longitud formando triángulos isósceles o equiláteros, están solicitadas alternativamente a esfuerzos de compresión y de tracción. No obstante, esta desventaja resistente, presenta una ventaja constructiva, ya que la celosía se comporta de forma similar para acciones de presión (fuerzas verticales positivas) y para acciones de succión (fuerzas verticales negativas). Para acciones gravitatorias se recomienda que la primera diagonal junto a los soportes esté traccionada, ya que es la más solicitada debido a que el cortante general de la cercha, en estos puntos, es máximo.

2.2.2.2 *Viga Pratt*

La **viga Pratt**, también conocida como celosía de diagonales “en N” traccionadas, como se muestra en la figura 2.2-11, fue diseñada y patentada por **Thomas Willis Pratt** (1812-1875) y **Caleb Pratt** (-) en 1844, y también es una tipología muy utilizada, especialmente para su uso en luces moderadas. Su principal ventaja radica en las barras de relleno, dado que las diagonales o barras de mayor longitud están sometidas, generalmente, a esfuerzos de tracción, mientras que las barras de relleno más cortas (montantes) están, en principio, comprimidas, siendo las barras de menor longitud las que pueden sufrir pandeo.

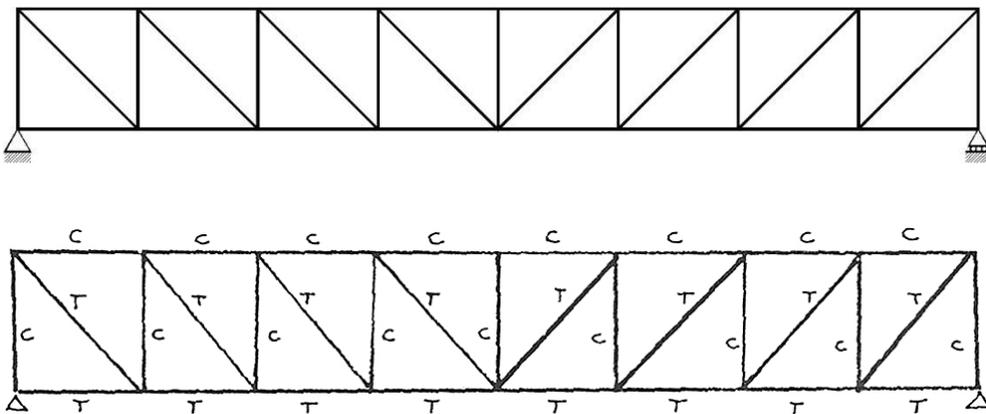


Figura 2.2-11. Geometría e indicación de los esfuerzos axiales en las barras de la viga Pratt bajo la acción de cargas gravitatorias. (Imágenes propia y tomada de [Brufau Niubó 2004/b, 15] respectivamente).

2.2.2.3 *Viga Howe*

La **viga Howe**, también conocida como celosía de diagonales “en N” comprimidas, como se muestra en la figura 2.2-12, fue patentada en 1840 por **William Howe** (1803-1852), aunque ya fuera usada con anterioridad y propuesta por **Andrea Palladio** (1508-1580) casi tres siglos antes. Es una estructura de celosía empleada para cubrir luces medianas, y que tiene como inconvenientes las ventajas de la viga Pratt. Para cargas gravitatorias las diagonales trabajan a compresión mientras que

los montantes lo hacen a tracción. Es por ello, que se convierte en una buena celosía para cubiertas ligeras (como puede ser naves industriales) donde el viento de succión pueda tener una cierta importancia, de forma que en este caso sean las diagonales las barras de relleno que trabajan a tracción, mientras que los montantes están comprimidos. Además, ofrece otra gran ventaja, y es la facilidad que ofrece para posibilitar un remate inclinado de las cubiertas por ambos lados, aspecto que no es posible en las vigas Pratt, haciendo de ella una tipología muy utilizada a lo largo de la historia.

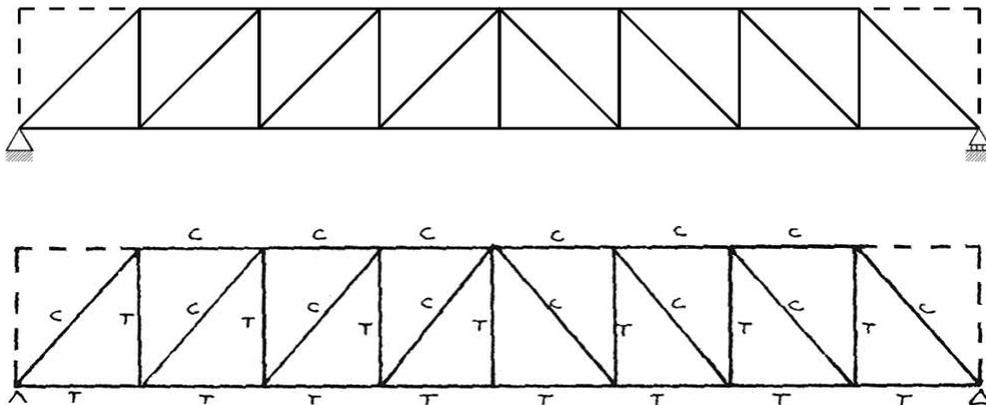


Figura 2.2-12. Geometría e indicación de los esfuerzos axiales en las barras de la viga Howe bajo la acción de cargas gravitatorias. (Imágenes propia y adaptada de [Brufau Niubó 2004/b, 15] respectivamente).

2.2.2.4 Viga “en K”

La viga “en K” es un tipo de celosía apropiada para grandes luces. Esta tipología presenta la ventaja de reducir considerablemente la longitud de las barras comprimidas, y en consecuencia disminuye su longitud de pandeo, como se muestra en la figura 2.2-13.

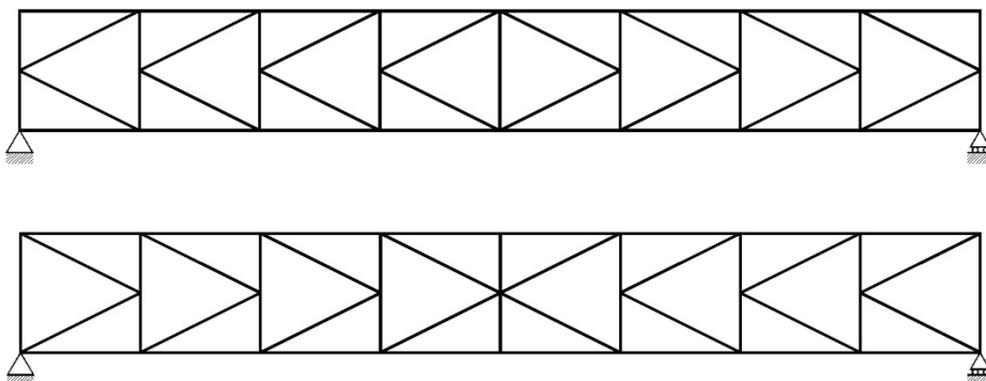


Figura 2.2-13. Opciones geométricas de las vigas de celosía “en K”. (Imágenes propias).

Como argumenta Brufau ^[9], la disposición más adecuada es la que se muestra en la figura 2.2-14, al disponer las barras de relleno de acuerdo con la transmisión más favorable de los esfuerzos axiales que se producen en los cordones, identificando las direcciones de las tensiones principales que se generan en forma de “arcos” y “catenarias”.

^[9] Brufau Niubó, R. (2004/b). *La flexión pura y la flexión simple*, p. 19.

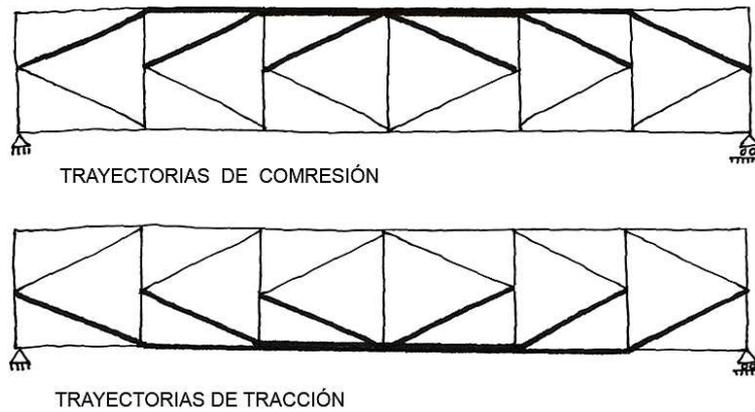


Figura 2.2-14. Disposición de las barras de relleno de acuerdo a la trayectoria de las fuerzas axiales principales. (Notación adaptada de [Brufau Niubó 2004/b, 19]).

2.2.2.5 *Viga “en X”*

La **viga “en X”**, la cual se muestra en la figura 2.2-15, es también conocida como viga Long ya que debe su nombre a **Stephen Harriman Long** (1784-1864), datada hacia 1835. Empleada en grandes luces, los cordones superior e inferior se unen mediante montantes verticales arriostrados por “cruces de San Andrés” o diagonales dobles. La viga también puede ser sin montantes verticales (viga en rombo). Esta tipología de viga es muy utilizada para arriostramientos horizontales y para hacer indeformables los pórticos cuyos nudos no son rígidos.

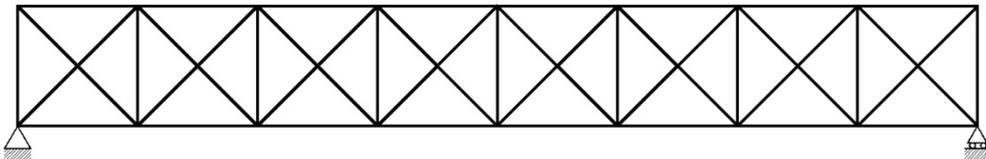


Figura 2.2-15. Geometría de viga “en X” o “en cruz de San Andrés”. (Imagen propia).

2.2.2.6 *Otros tipos de vigas trianguladas*

Es de suma relevancia destacar, en este contexto, las vigas trianguladas con tirantes de **Squire Whipple** (1804-1888) y **Wendell Bollman** (1814-1884) referidas en el capítulo 1, las cuales se muestran en las figura 2.2-16 y 2.2-17, por su concepto de optimización al identificar las líneas isostáticas de tracción. Whipple y Bollman proponen vigas de celosía con cables, muy parecidas a la viga Fink, en base a la colocación de cables según los esfuerzos que solicitan las barras para puentes biapoyados.

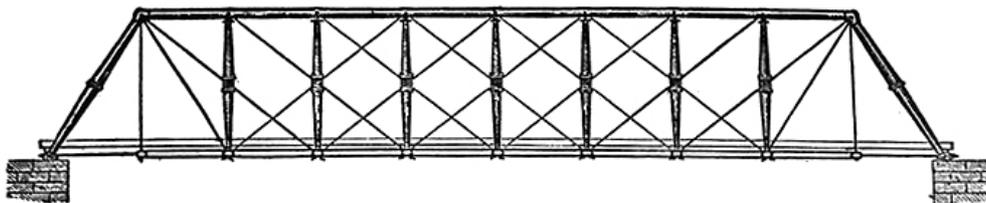


Figura 2.2-16. Geometría de la viga Whipple para puentes de ferrocarril. (Imagen tomada de [Brufau Niubó 2004b, 40]).

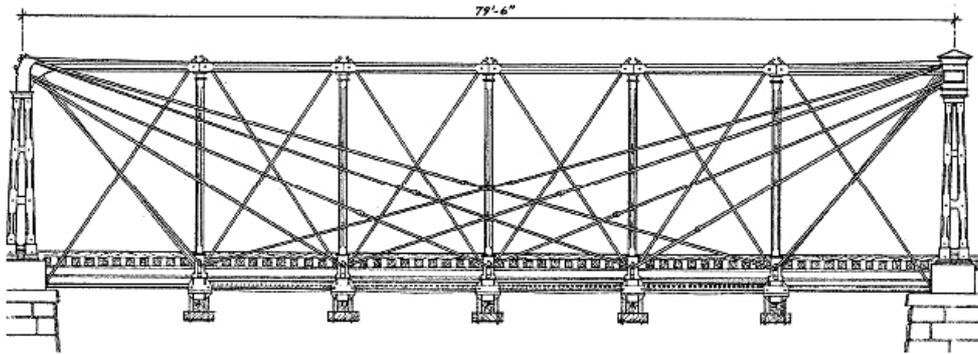


Figura 2.2-17. Geometría de la viga Bollman para puentes de ferrocarril. (Imagen tomada de [Costales Calvo 2012, 28]).

En este sentido de optimización en base a la geometría, destacar dos tipos de vigas triangulares como son la viga subtesada Fink y la viga Polonceau que por sus características de diseño y de dimensionado de las barras ofrecen un elevado rendimiento y eficiencia estructural, al disponer de tirantes para las barras solicitadas a esfuerzos de tracción (el cordón inferior en el caso de la viga Fink y el cordón inferior y diagonales en el caso de la viga Polonceau) ^[10]. La geometría de la viga Polonceau se muestra en la figura 2.2-18.

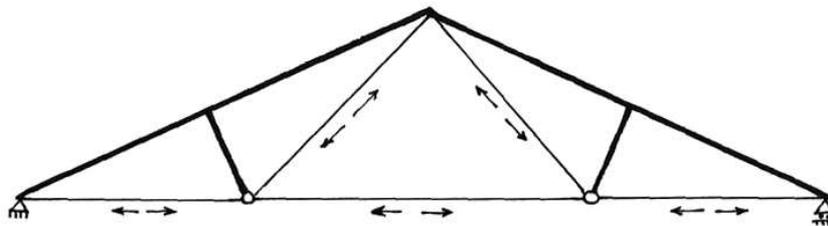


Figura 2.2-18. Geometría de la viga Polonceau. Destacar que con trazo grueso se indican las barras comprimidas y con trazo fino se indican las barras traccionadas. (Imagen tomada de [Brufau Niubó 2004/b, 31]).

Todas las geometrías anteriormente mostradas son trianguladas, de forma que sus nudos se pueden ejecutar idealmente como articulaciones, aunque es posible realizar dichas uniones como nudos rígidos.

2.2.2.7 *Viga de nudos rígidos y la viga Vierendeel*

Las celosías de nudos rígidos son estructuras hiperestáticas que geoméricamente se asimilan a una celosía estáticamente determinada pero que estructuralmente las barras trabajan, principalmente, a flexión y a cortante. Las diferencias más importantes respecto a las celosías trianguladas con los nudos articulados, con la misma geometría y estado de cargas, son:

- La celosía de nudos rígidos tiene las barras sometidas a flexión y corte, pero los esfuerzos axiales son ligeramente menores que la de los nudos articulados.
- La celosía de nudos rígidos presenta mayores problemas en el dimensionado de las uniones entre las barras.

^[10] Brufau Niubó, R. (2004/b). *La flexión pura y la flexión simple*, p. 31.

Como describe Brufau ^[11], sólo en el caso de estructuras no trianguladas, y por lo tanto geoméricamente acordes al principio de las grandes deformaciones, como puede ser el caso de los entramados en bastidor o vigas **Vierendeel**, la cual se muestra en la figura 2.2-19, inventada por el ingeniero belga **Jules Arthur Vierendeel** (1852-1940) que la patentó en 1897, se requiere obligatoriamente que las uniones sean rígidas. Ello se debe a que su principal característica es que no tiene diagonales o barras oblicuas en los recuadros, siendo una celosía ortogonal formada únicamente por cordones horizontales y montantes verticales rígidos. Por lo tanto, dicha armadura se configura de marcos rectangulares a diferencia del resto de celosías que tienen formas trianguladas, de manera que sus barras están sometidas a esfuerzos flectores y cortantes, además de los esfuerzos axiales.

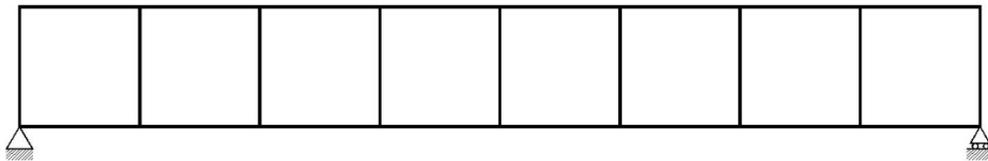


Figura 2.2-19. Geometría de viga Vierendeel o entramado en bastidor. (Imagen propia).

Como indican Estévez y Martín ^[12], esta tipología surge de la necesidad de permitir el paso peatonal o rodado a través de sus aperturas, especialmente empleada en estructuras de edificación, así como en la construcción de puentes (puentes Vierendeel).

No obstante, hay otras triangulaciones derivadas de la “cruz de San Andrés” que permiten también el paso de a través de los recuadros, facilitando el tránsito entre edificaciones, como se aprecia la figura 2.2-20.

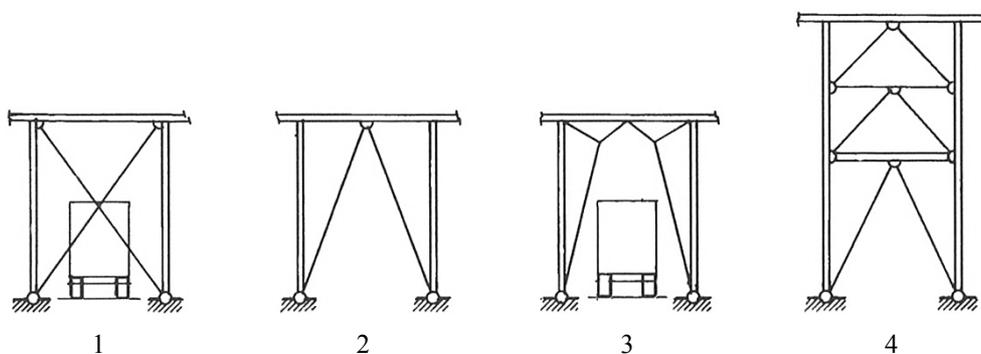


Figura 2.2-20. Triangulación en “cruz de San Andrés” y triangulaciones alternativas que permiten el tránsito entre edificaciones. (Imagen tomada de [Argüelles Álvarez et al. 2007, 10.6]).

En la figura 2.2-20, se aprecia que en el tercer dibujo la posibilidad de circulación rodada a través de la estructura arriostrada es mayor que en los casos 2 y 4, mientras que en el primer caso, el tránsito entre edificaciones no es posible.

^[11] Brufau Niubó, R. (2004/b). *La flexión pura y la flexión simple*, p. 26.

^[12] Estévez Cimadevila, F.J.; Martín Gutiérrez, E. (2003). *Análisis del rendimiento estructural de vigas Vierendeel*, p. 27.

2.2.3 Aplicaciones y otras formas de las vigas de celosía planas

Anteriormente, se han expuesto las celosías tradicionales de canto constante con cordones paralelos, así como las estructuras funiculares como es la estructura de arco-tirante, cuya forma deriva de la forma del polígono de fuerzas. Sin embargo, son muchas las alternativas, geométricas y constructivas, que ofrecen las vigas de celosía siendo útiles para numerosas aplicaciones y soluciones arquitectónicas. Las vigas de celosía se emplean, generalmente, como elementos resistentes en cubiertas y vigas de edificación, así como para la construcción de torres y elementos de rigidización de edificios en altura. Su uso en puentes de carreteras y de ferrocarril, a pesar de ser su motivo de expansión según lo expuesto en el capítulo anterior, se ha reducido de forma considerable ^[13].

Las distintas formas de las armaduras o estructuras de entramado dan respuesta a las cargas que las solicitan, a la vez que se adaptan a las necesidades arquitectónicas del proyecto para el cual son diseñadas. En la figura 2.2-21 se muestran cerchas con distintas triangulaciones y geometrías con el cordón superior con pendiente a dos aguas muy adecuadas para cubiertas de grandes luces.

a) Tijera



b) Polonceau



c) Inglesa



d) Warren



e) Pratt



f) Arcada triangulada



.a.

.b.

Figura 2.2-21. Modelos tradicionales utilizados en cubiertas: a) Triangulaciones primarias, b) Triangulaciones primarias más triangulaciones secundarias. (Imagen tomada de [Argüelles Álvarez et al. 2007, 10.4]).

Las dos geometrías inferiores de la figura 2.2-21 corresponden a armaduras con el cordón superior curvilíneo o poligonal adaptándose a la geometría curva de una

^[13] Argüelles Álvarez, R; et al. (2007): *Estructuras de acero*, p. 10.4.

estructura de arco (triangulaciones arcadas), dando respuesta no sólo a las sollicitaciones internas de las barras, sino que también a las necesidades arquitectónicas del proyecto. Para este tipo de celosías son válidos los esquemas geométricos propios de viga Pratt, viga Howe, viga Warren simple o con montantes, etc. En concreto, la viga Pratt con cordón superior curvilíneo o poligonal la patentó el año 1871 **C. H. Parker** (-) ^[14].

En este contexto es posible pensar que en ocasiones hay otros requerimientos no estructurales a los cuales las estructuras de entramado deben de dar respuesta, como son los ejemplos mostrados de celosías triangulares y trapezoidales que adaptan su forma a la cubierta. Sin embargo, cabe destacar que la forma de dichas cerchas es muy conveniente, además, desde el punto de vista del comportamiento estructural, ya que el canto de la cercha es mayor en la zona central, disminuyendo así, de forma significativa, los esfuerzos en las barras de los cordones en esta parte de la viga, como se muestra en la figura 2.2-22, a la vez que se disminuyen las flechas o deformaciones máximas.

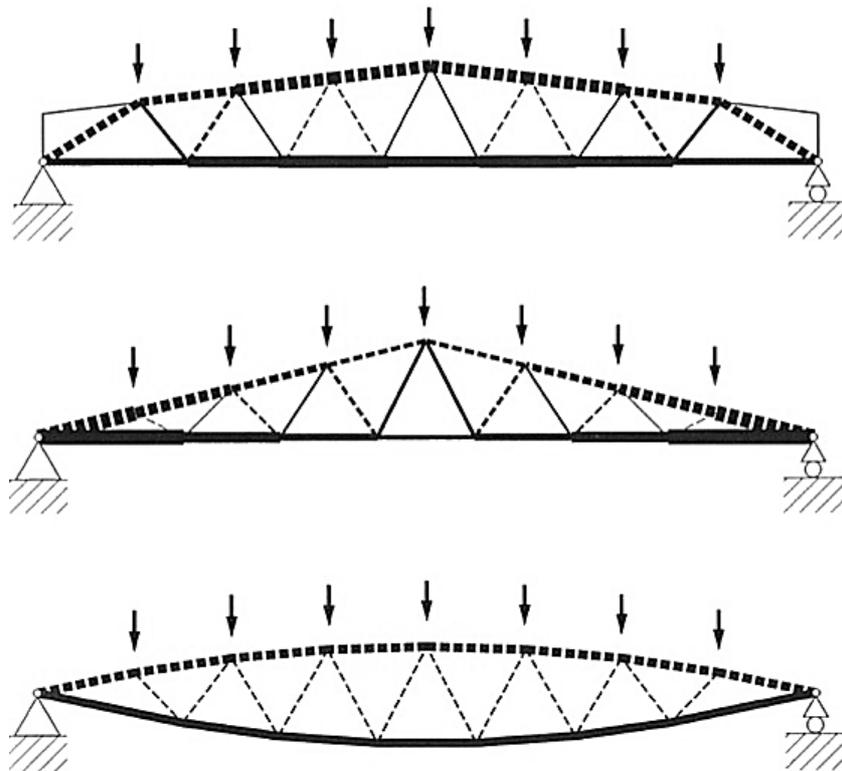


Figura 2.2-22. Geometrías de celosías de forma trapezoidal, triangular y lenticular para un mejor comportamiento estructural. (Imagen tomada de [Muttoni 2011, 145]).

En la figura 2.2-22 indicada, también se aprecia la geometría de una celosía lenticular que responde de igual forma a las consideraciones de eficiencia y rigidez estructural anteriormente descritas, en base a la forma. La influencia de la forma en la eficiencia y la rigidez de las estructuras se abordan, para el caso que nos ocupa de estructuras trianguladas, en el siguiente apartado dada la importancia de este fundamento para el desarrollo de la Tesis.

^[14] Brufau Niubó, R. (2004/b). *La flexión pura y la flexión simple*, p. 38.

2.3 Influencia de la forma y la geometría en la eficiencia y la rigidez de estructuras trianguladas

El objetivo de este epígrafe es mostrar, con un estudio básico, la influencia de la geometría en la eficiencia y la rigidez de estructuras trianguladas. El estudio se realiza para ocho estructuras simples, de distintos esbelteces geométricas (H/B), (formadas por tres barras de secciones idénticas), para una misma base $B = 2.0$ m y alturas comprendidas entre 0.5 y 4.0 m, como se muestra en la figura 2.3-1.

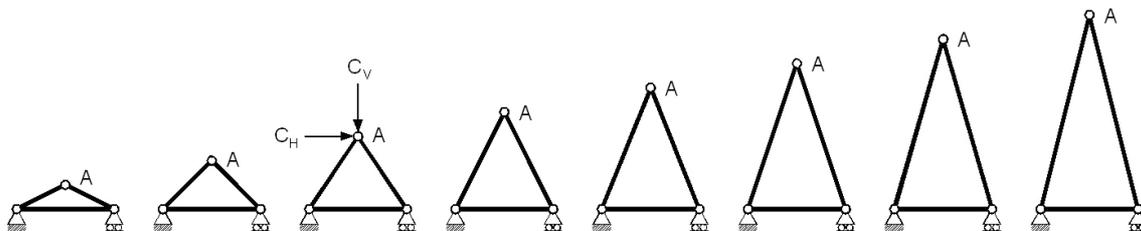


Figura 2.3-1. Esquemas de las ocho estructuras simples analizadas.

En el siguiente estudio básico, se muestra que las estructuras tienen un mejor rendimiento y comportamiento si su geometría se ajusta a la dirección de la carga principal o dominante. Para ello, se comparan los resultados obtenidos, desplazamientos unitarios y esfuerzos axiales máximos, de cada una de las geometrías para cada estado de cargas vertical ($C_V = 50$ kN) y horizontal ($C_H = 50$ kN) que se aplican en el nudo superior articulado (A), y los cuales se describen a continuación:

- Estado 1: únicamente carga vertical ($C_H = 0$).
- Estado 2: únicamente carga horizontal ($C_V = 0$).
- Estado 3: carga vertical y carga horizontal de un mismo valor ($C_V = C_H$).
- Estado 4: carga vertical de valor mayor que la carga horizontal ($C_V = 3C_H$).
- Estado 5: carga horizontal de valor mayor que la carga vertical ($C_H = 3C_V$).

En las tablas 2.3-1 y 2.3-2 se muestran los resultados obtenidos, deformaciones y esfuerzos axiales, de las ocho geometrías en base a los distintos estados de carga.

ESTADO DE CARGAS	DESPLAZAMIENTOS UNITARIOS MÁXIMOS (mm/m)							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Estado 1: Sólo C_V ; $C_H = 0$	0,633	0,253	0,134	0,101	0,087	0,080	0,076	0,074
Estado 2: Sólo C_H ; $C_V = 0$	0,158	0,252	0,452	0,801	1,350	2,147	3,239	4,679
Estado 3: $C_V = C_H$	0,818	0,450	0,522	0,843	1,380	2,171	3,260	4,696
Estado 4: $C_V = 3C_H$	2,101	0,938	0,725	0,954	1,455	2,227	3,304	4,735
Estado 5: $C_H = 3C_V$	1,193	1,237	1,415	2,443	4,082	6,461	9,740	14,05

Tabla 2.3-1. Deformaciones de 8 estructuras simples para distintos estados de carga.

ESTADO DE CARGAS	ESFUERZOS AXIALES MÁXIMOS (valores en kN)							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Estado 1: Sólo C_V ; $C_H = 0$	-56,12	-35,57	-30,31	-28,28	-27,33	-26,82	-26,53	-26,37
Estado 2: Sólo C_H ; $C_V = 0$	-28,17	-35,57	-45,34	-56,23	-67,71	-79,52	-91,53	-103,7
Estado 3: $C_V = C_H$	-84,07	-70,93	-75,38	-84,18	-94,64	-105,9	-117,5	-129,5
Estado 4: $C_V = 3C_H$	-195,9	-141,6	-135,5	-140,1	-148,5	-158,6	-169,5	-181,0
Estado 5: $C_H = 3C_V$	-140,0	-141,6	-165,5	-196,0	-229,3	-264,0	-299,5	-335,6

Tabla 2.3-2. Esfuerzos axiales máximos de 8 estructuras simples para distintos estados de carga.

En las tablas anteriores, se muestra en color verde el resultado más favorable, y en color rojo el más desfavorable para cada estado de cargas. Se aprecia que en ambas tablas, coinciden dichos resultados, mostrando la relación entre ambos valores, desplazamientos y esfuerzos axiales, los cuales se muestran desde la figura 2.3-2 hasta la figura 2.3-6. También se observa que la geometría que ofrece un mejor comportamiento, para cada estado de cargas, es aquella que ajusta en mayor grado su geometría a la dirección de la carga principal o resultante. Dicha relación se aprecia en los estados de carga 1 y 2, donde sólo hay carga vertical u horizontal y por ello, las geometrías con un mejor comportamiento son la 8 y la 1, respectivamente. De igual forma, el estado 3 también es muy representativo, ya que, la directriz de la carga resultante forma un ángulo de 45° con respecto a la línea horizontal ($C_V = C_H$), y por ello, la estructura que ofrece un mejor comportamiento es la estructura 2, de esbeltez geométrica igual a 1, ($H = B = 2.0$ m), formando la barras un ángulo de 45° con respecto a dicha horizontal.

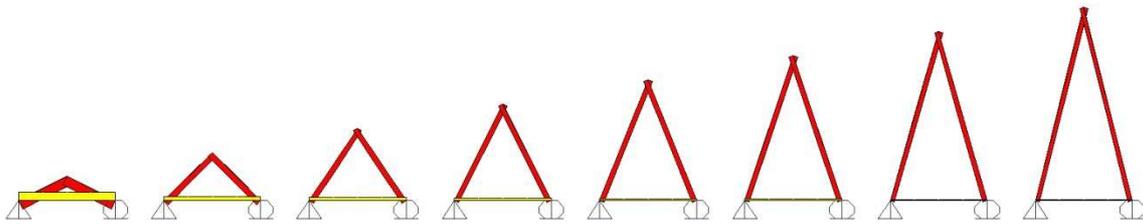


Figura 2.3-2. Esfuerzos axiales para el estado de cargas 1. (Imagen tomada del SAP 2000 v.15).

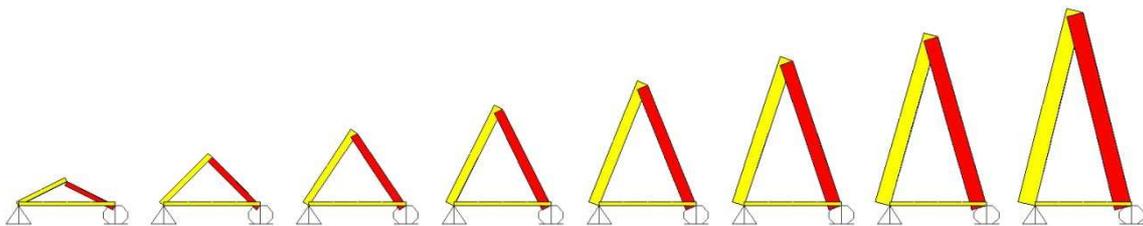


Figura 2.3-3. Esfuerzos axiales para el estado de cargas 2. (Imagen tomada del SAP 2000 v.15).

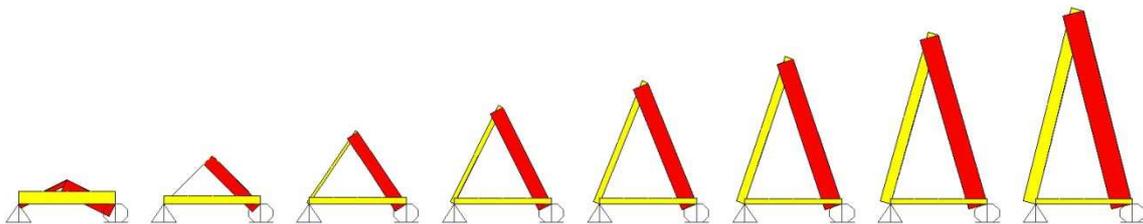


Figura 2.3-4. Esfuerzos axiales para el estado de cargas 3. (Imagen tomada del SAP 2000 v.15).

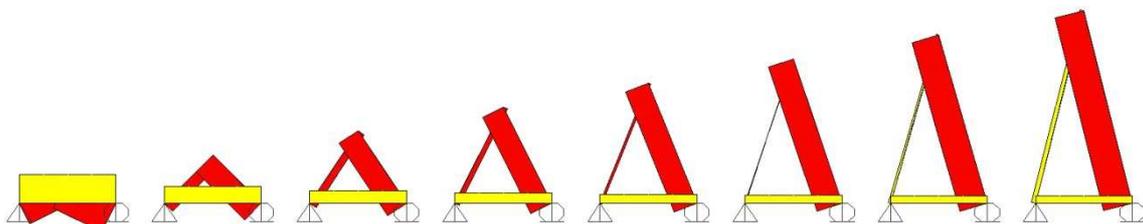


Figura 2.3-5. Esfuerzos axiales para el estado de cargas 4. (Imagen tomada del SAP 2000 v.15).

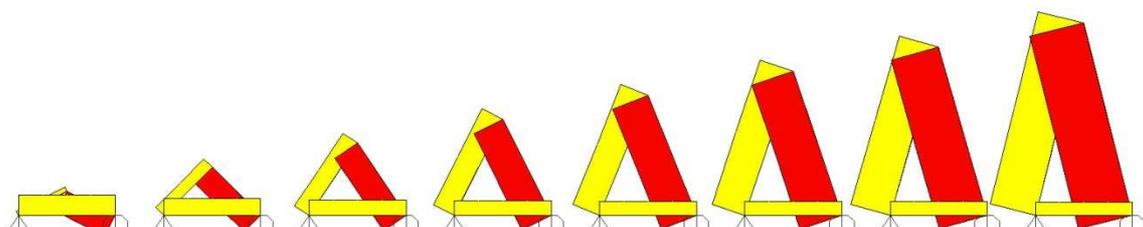


Figura 2.3-6. Esfuerzos axiales para el estado de cargas 5. (Imagen tomada del SAP 2000 v.15).

El estudio básico realizado, de eficiencia y comportamiento estructural, se puede implementar al análisis de estructuras de mayor complejidad, ya sean estructuras planas o estructuras espaciales. En el caso de estructuras planas, en concreto estructuras de entramado como son las vigas de celosía, dicho planteamiento también es válido y útil para su optimización y mejora del rendimiento estructural.

Es de dominio común, en esta temática, la influencia de la forma en la eficiencia y la rigidez de las estructuras, y en definitiva en el comportamiento y el rendimiento estructural como se desprende del estudio básico realizado con ocho estructuras trianguladas simples. Atendiendo a dicha relación entre la forma y la función estructural, así como teniendo en cuenta que las vigas de celosía pueden adoptar varias geometrías, permitiendo distintas triangulaciones, de manera que cada una de ellas tendrá un rendimiento y comportamiento estructural diferente de acuerdo a su forma. Este concepto se muestra en la figura 2.3-7 donde se representan los diagramas de esfuerzos axiales de dos vigas de celosía con diagonales “en forma de K”. El esquema superior de esfuerzos axiales de la figura corresponde a una viga “en K” con las diagonales orientadas de forma similar a la de la estructura arco-tirante anteriormente mostrada, mientras que en la imagen inferior de la figura se muestra el esquema de los esfuerzos axiales de una celosía “en K” con las diagonales invertidas respecto la forma del arco-tirante ^[1].

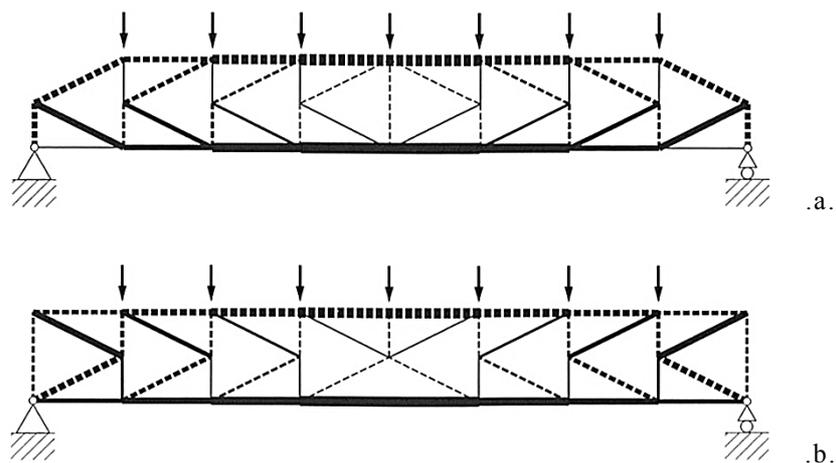


Figura 2.3-7. a) Viga “en K” con orientación de las diagonales similar a la forma de la estructura arco-tirante, b) Viga “en K” con orientación invertida de las diagonales con respecto a la estructura arco-tirante. (Imagen tomada de [Muttoni 2011, 144]).

De acuerdo a la argumentación de Muttoni ^[1] acerca de las geometrías de las vigas de celosía “en K” según la similitud, o no, en la orientación de las diagonales con la estructura arco-tirante, cuando se haga mención a dichas geometrías se hará uso de la denominación de viga “en K” para la geometría de la figura 2.3-7a, mientras que para hacer referencia a la armadura representada en la figura 2.3-7b se utilizará la denominación de viga “en K invertida”, al disponer las diagonales con orientación invertida con respecto a la estructura arco-tirante.

De igual forma se observa en la figura 2.3-7 que el comportamiento estructural, de acuerdo a los diagramas de esfuerzos representados, es totalmente diferente en ambas celosías y, como se verá en los estudios comparativos de vigas de celosía del apartado 2.5, su rendimiento estructural también es totalmente opuesto, a pesar de ser dos tipologías con los mismos metros lineales de barras y peso propio de la

[1] Muttoni, A. (2011). *The Art of Structures. Introduction to the Functioning of Structures in Architecture*, p. 144.

estructura, si se toman las mismas dimensiones en alzado y secciones de barras. Por consiguiente, la forma y geometría, en este caso de una armadura, es determinante en su eficiencia y rigidez estructural, como se muestra en las figuras 2.3-8 y 2.3-9, respectivamente.

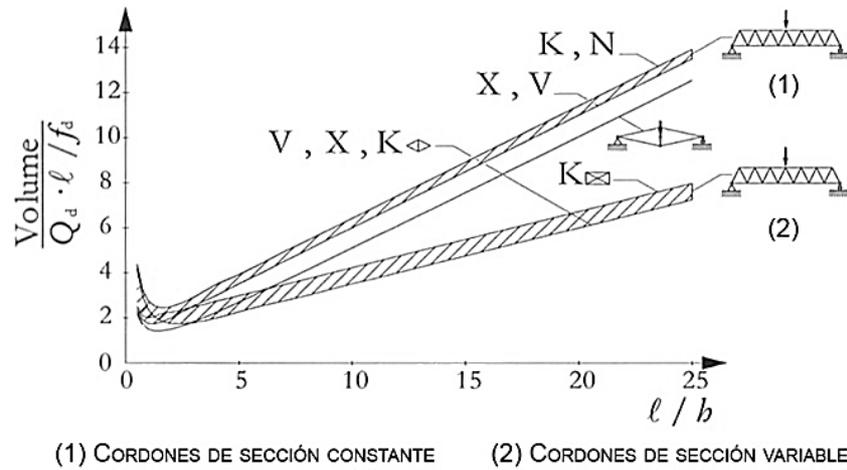


Figura 2.3-8. Relación entre el peso propio de las armaduras y la esbeltez geométrica horizontal (l/h) para una misma luz l , carga Q_d y resistencia del material f_d . (Imagen adaptada de [Muttoni 2011, 146]).

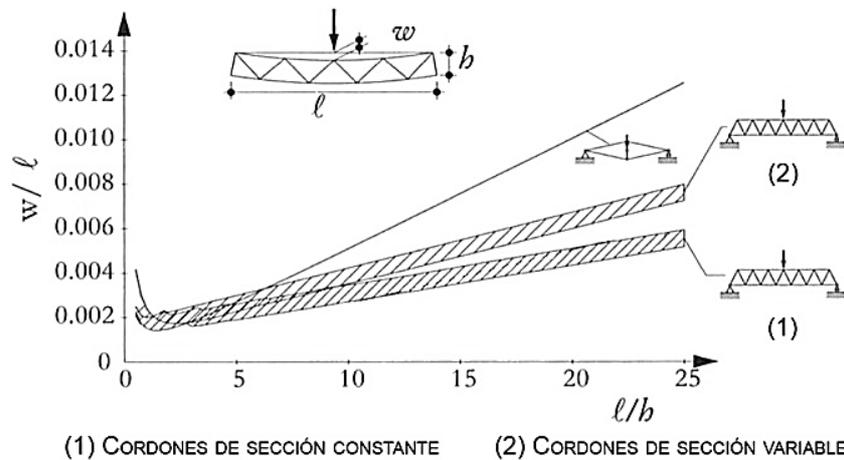


Figura 2.3-9. Flecha en el punto medio de la viga para carga puntual en relación con la esbeltez geométrica horizontal l/h . Deformación máxima unitaria en el material de $\epsilon = 0.001$. (Imagen adaptada de [Muttoni 2011, 148]).

En ambas figuras se observa que la celosía de cordones de sección variable ofrece un mejor rendimiento frente a la armadura de cordones de sección constante. En la figura 2.3-8, se aprecia cómo influye de forma negativa el incremento de peso propio de la viga de cordones de sección constante disminuyendo, así, el rendimiento de forma considerable, a diferencia de la armadura con cordones de sección variable. En la figura 2.3-9, se muestra el rendimiento de las mismas estructuras, en base a la deformación unitaria (W/l) según la esbeltez geométrica horizontal (l/h).

En los estudios comparativos del apartado 2.5 se aborda el rendimiento estructural de las vigas de celosía y la relación de las distintas triangulaciones cuando sus geometrías se asemejan, o no, a las direcciones de las tensiones principales y, en definitiva, a la trayectoria de las líneas isostáticas de los elementos resistentes de alma llena analizados previamente con modelos de elementos finitos en 2D.

2.4 Planteamiento y metodología de análisis del rendimiento estructural de vigas de celosía planas

Atendiendo a lo expuesto en los epígrafes anteriores, en el presente apartado se estudia el rendimiento de las vigas de celosía, comparando posteriormente sus resultados, para determinar que geometrías son más óptimas y eficientes, y que relación conlleva dicho rendimiento estructural con la trayectoria de las líneas isostáticas de las vigas de alma llena equivalentes.

En la figura adjunta 2.4-1 se muestran algunas de las triangulaciones de celosía más comunes, a la vez que se aprecia la analogía de la estructura arco-tirante anteriormente mencionada, como esquematización del comportamiento estructural de una viga. Cabe indicar que en línea discontinua se muestran los esfuerzos de las barras comprimidas y que en línea continua se muestran los esfuerzos de las barras traccionadas. En el caso de la viga Warren o con diagonales “en W”, la ubicación de los soportes en el cordón inferior o superior, influye en el signo del esfuerzo de las diagonales más solicitadas, es decir, las diagonales finales o de los extremos.

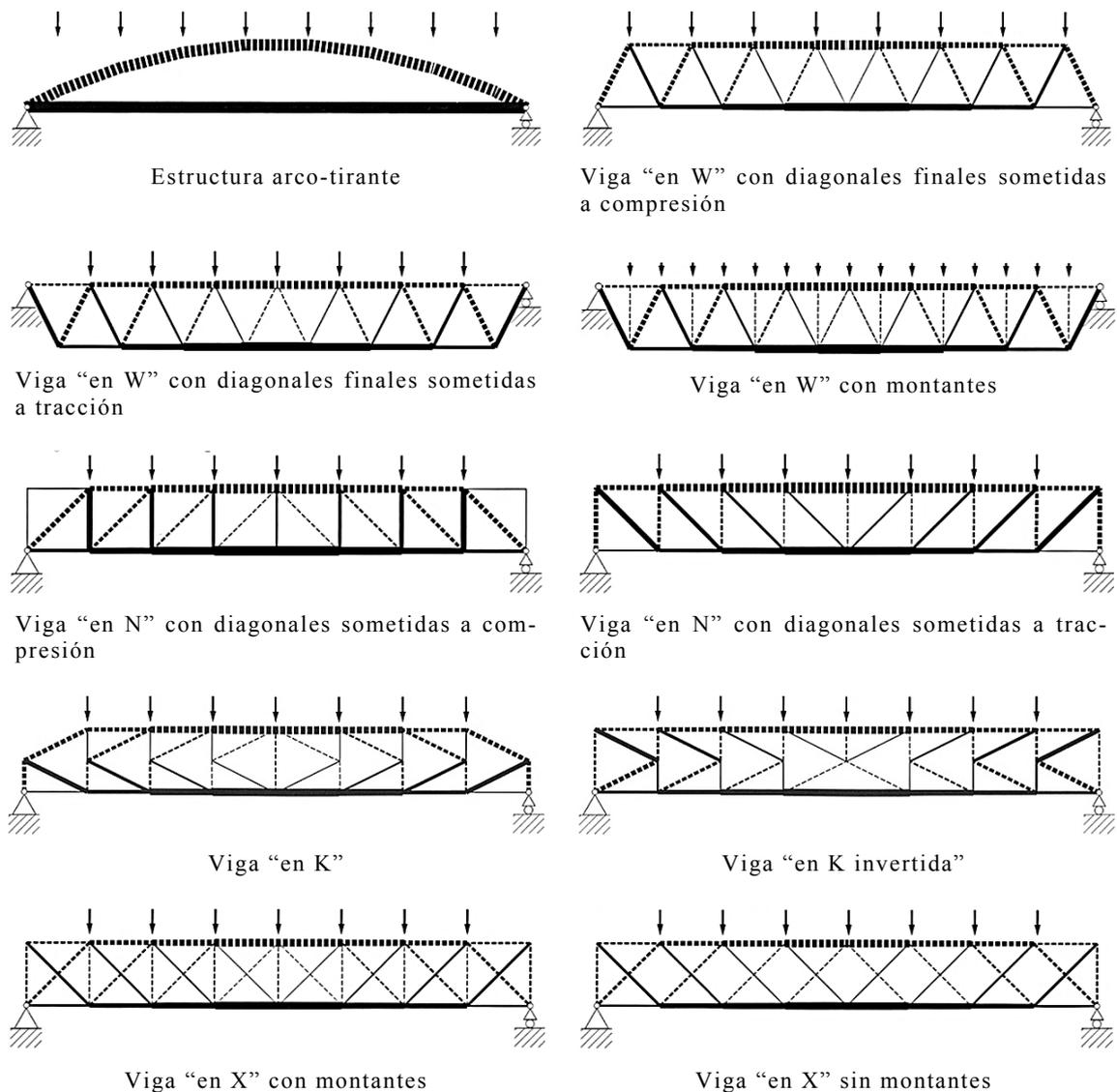


Figura 2.4-1. Estructura arco-tirante y distintos tipos de vigas de celosía. (Imágenes tomadas de [Muttoni 2011, 143 y 144]).

En total se realizan cuatro estudios comparativos de rendimiento estructural de vigas de celosías, que corresponden a un estudio básico inicial y tres estudios comparativos finales. Dicho estudio básico se realiza de acuerdo a las triangulaciones de la viga Pratt, la viga Howe, la viga “en K” y la viga “en X”, para determinar la influencia de las opciones de cálculo y parámetros de diseño, que se describen a continuación:

- Barras articuladas A-A frente a uniones rígidas R-R en los extremos de las barras.
- Cargas puntuales en los nudos superiores frente a cargas distribuidas en el cordón superior.

Una vez realizado el estudio básico, y en base a las conclusiones obtenidas, se realizarán los tres estudios comparativos finales de acuerdo a las geometrías de las vigas de celosía mostradas en la figura 2.4-1, es decir, las ya definidas, viga Warren, viga Howe, viga Pratt, viga “en K”, viga “en K invertida” y la viga “en X”, junto con sus variantes geométricas con, o sin, montantes adicionales. Se analizarán dichas geometrías de acuerdo a los siguientes parámetros de diseño, para realizar el estudio comparativo:

- Tipología de la triangulación.
- Número de recuadros (longitud de la celosía).
- Canto de la celosía.

Finalmente, el objetivo del estudio básico o inicial que se presenta en el apartado 2.5.1, previo a los tres estudios comparativos posteriores, fundamento de esta Tesis, es determinar la influencia de las variables u opciones de cálculo consideradas, para descartar, en los estudios comparativos finales, aquéllas que sean menos significativas y/o menos determinantes en el estudio comparativo de rendimiento estructural de triangulaciones analizadas. Con los cuales, se pretende reducir el número de variables a considerar en los estudios finales, eliminando así la duplicidad y la redundancia en los resultados obtenidos de acuerdo a los parámetros u opciones de menor relevancia.

De acuerdo a los resultados obtenidos del estudio básico, se realizan tres estudios comparativos finales acerca del rendimiento estructural para ocho tipologías de vigas de celosía, de acuerdo a los parámetros de diseño descritos anteriormente, y según las opciones y bases de cálculo y el predimensionado que se definen en los apartados 2.4.1 y 2.4.2, así como los criterios de dimensionado que se definen en el apartado 2.4.3. Las vigas de celosía consideradas se analizarán como vigas biapoyadas y vigas en voladizo, para así abordar los objetivos principales y específicos que son objeto de estudio en el presente capítulo, de acuerdo a los «parámetros de limitación o de control», que se describen a continuación, para cada uno de los estudios finales realizados:

- **Estudio final 1:** comparativo del rendimiento estructural de acuerdo a las deformaciones máximas de cada triangulación con los mismos perfiles tubulares en los cordones, y los mismos perfiles tubulares en todas las barras de relleno de las geometrías analizadas.
- **Estudio final 2:** comparativo del rendimiento estructural de acuerdo al peso propio de cada tipología, para una misma limitación de deformación (ELS) de acuerdo la normativa utilizada. Para ello, se variará el espesor de los perfiles de los tubulares de los cordones para dar cumplimiento a dicha limitación.

- **Estudio final 3:** comparativo del rendimiento estructural de acuerdo al peso propio de la estructuras para cada tipología, para obtener la «resistencia equivalente» de todas sus barras. Para este concepto hay dos posibles opciones. La primera consiste en adaptar la geometría de la estructura como indica Engel ^[1], como se desprende de la figura 2.4-2, para obtener un reparto equitativo de los esfuerzos en todas las barras.

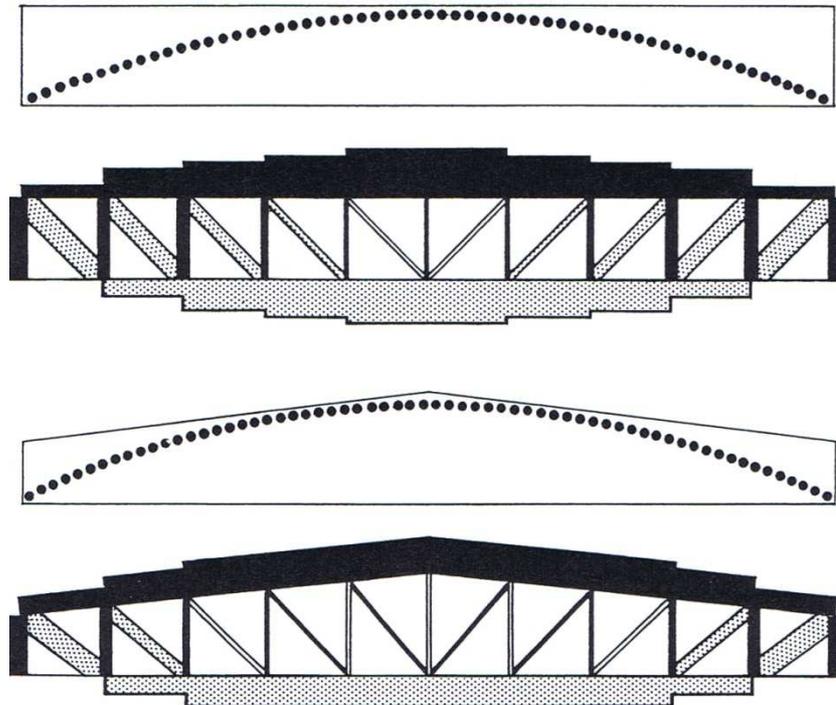


Figura 2.4-2. Esfuerzos para una celosía de cordones paralelos y esfuerzos con un reparto más equitativo para una celosía con el cordón superior con pendiente a dos aguas. (Imagen tomada de [Engel 2001, 142]).

La segunda opción posible, y por la cual se opta en el tercer estudio comparativo final realizado, es que las características mecánicas de cada perfil se ajusten a las solicitaciones a las cuales está sometido, como se muestra en la figura 2.4-3, de acuerdo, a la tensión admisible de cálculo considerada.

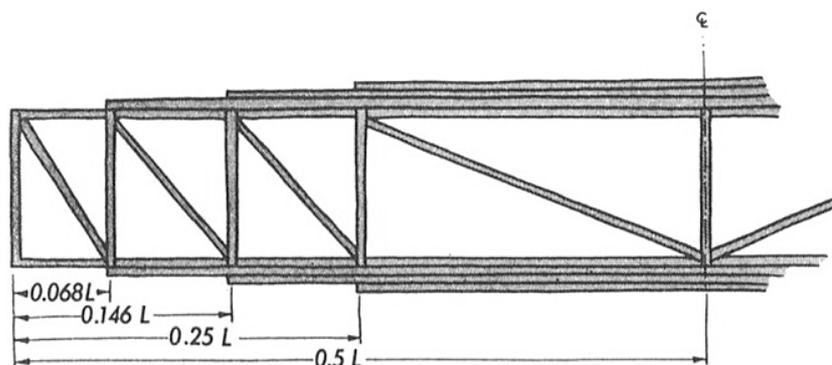


Figura 2.4-3. Armadura de máxima eficiencia con los cordones de sección variable. (Imagen tomada de [Salvadori et al. 1998, 99]).

[1] Engel, H. (2001). *Sistemas de estructuras*, p. 142.

2.4.1 Bases de cálculo

Los parámetros de diseño como son el tipo de triangulación y la luz entre soportes, así como los cantos considerados, se definen previamente en cada estudio comparativo, ya que son parámetros que varían para cada estudio. De tal forma que, a continuación, sólo se presentan aquellas opciones de cálculo comunes en todos los estudios realizados.

2.4.1.1 *Cargas permanentes y sobrecargas*

Las cargas consideradas para el estudio comparativo, las cuales se muestran en la tabla 2.4.1, corresponden a una planta intermedia de una nave industrial para oficinas, con estructura de perfiles metálicos y chapa colaborante. Se considera un interje entre pórticos de 5 metros.

Zona / elemento:	Planta intermedia nave (oficinas)	
Tipo de forjado:	Forjado chapa colaborante	
Peso propio :	2.10	kN/m ²
Cargas permanentes:	1.80	kN/m ²
Sobrecarga de uso:	3.00	kN/m ²
Total:	6.90	kN/m ²

Tabla 2.4-1. Cargas consideradas para a una planta intermedia.

2.4.1.2 *Resistencia de cálculo*

Se define la resistencia de cálculo f_{yd} , y la resistencia de cálculo de para el caso específico de las comprobaciones de resistencia última del material o la sección f_{ud} , de acuerdo a los siguientes cocientes:

$$f_{yd} = f_y / \gamma_M \quad (2.4.1);$$

$$f_{ud} = f_u / \gamma_{M2} \quad (2.4.2)$$

donde,

f_{yd} y f_{ud} , resistencia de cálculo y la resistencia última del material;

f_y y f_u , son la tensión límite elástica y la tensión de rotura, respectivamente;

γ_M , es el coeficiente parcial de seguridad relativo a la plastificación del material γ_{M0} , o relativo a fenómenos de inestabilidad γ_{M1} ;

γ_{M2} , es el coeficiente parcial relativo a la resistencia última del material o sección, y a la resistencia de los medios de unión.

2.4.1.3 *Materiales*

Se utilizan los aceros establecidos en la norma UNE-EN 10025 (productos laminados en caliente de acero no aleado, para construcciones metálicas de uso general), así como los establecidos en las normas UNE-EN 10210-1:1994 relativa a perfiles huecos para construcción, acabados en caliente, de acero no aleado de grado fino, y UNE-EN 10219-1:1998 relativa a secciones huecas de acero estructural conformados en frío. En la tabla 2.4-2, correspondiente a un extracto de la tabla 4.1 del DB SE-A-11, se especifican las características mecánicas mínimas de los aceros UNE EN 10025, que son las que han sido utilizadas en los cálculos realizados:

Designación	Tensión de límite elástico f_y (N/mm ²)			Tensión rotura f_u (N/mm ²)	Temperatura del ensayo Charpy °C
	$t \leq 16$	$16 < t \leq 40$	$40 < t \leq 63$		
S 275JO	275	265	255	410	0
S 355JO	355	345	335	470	0

Tabla 2.4-2. Tipos de aceros estructurales considerados.

Las siguientes características de la tabla 2.4.3 son comunes a todos los aceros:

Módulo de elasticidad, E	210.000 Mpa
Módulo de elasticidad transversal, G	81.000 Mpa
Coefficiente de Poisson, ν :	0.30
Coefficiente de dilatación térmica, λ :	$1.2 \times 10^{-5} (^{\circ}\text{C})^{-1}$
Densidad	7.850 Kg/m ³

Tabla 2.4.3. Características comunes de todos los aceros.

2.4.1.4 Cálculo de perfiles (tipo de clase)

La relación anchura/espesor para seleccionar el tipo de cálculo de perfiles se muestra en la tabla 2.4.4:

Perfil	 Compresión o flexión	 Flexión	 Compresión
Secciones de Clase 1 (cálculo plástico-plástico)	$\frac{d}{t} \leq 50 \cdot \epsilon^2$	$\frac{b_l}{t_l} \leq 33 \cdot \epsilon$	$\frac{b_l}{t_l} \leq 42 \cdot \epsilon$
Secciones de Clase 2 (cálculo elástico-plástico)	$\frac{d}{t} \leq 70 \cdot \epsilon^2$	$\frac{b_l}{t_l} \leq 38 \cdot \epsilon$	$\frac{b_l}{t_l} \leq 42 \cdot \epsilon$
Secciones de Clase 3 (cálculo elástico-elástico)	$\frac{d}{t} \leq 90 \cdot \epsilon^2$	$\frac{b_l}{t_l} \leq 42 \cdot \epsilon$	$\frac{b_l}{t_l} \leq 42 \cdot \epsilon$
Secciones de Clase 4 (cálculo elástico-elástico)	Verificación de pandeo local para perfiles con d/t mayor a relaciones b/t mayores		
$\epsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}}$			

Tabla 2.4.4. Relación anchura/espesor para seleccionar tipo de cálculo de perfiles.

2.4.1.5 Coeficientes parciales de minoración de la resistencia de los materiales en E.L.U.

Para los coeficientes de minoración (γ_M) de resistencia se han adoptado los siguientes valores:

$\gamma_{M0} = 1,05$ relativo a la plastificación del material.

$\gamma_{M1} = 1,10$ relativo a fenómenos de inestabilidad.

$\gamma_{M2} = 1,25$ relativo a resistencia última del material o sección.

2.4.1.6 Coeficientes parciales de mayoración de acciones

Los coeficientes parciales de mayoración de acciones se muestran en la siguiente tabla 2.4.5:

Efecto	Acciones Permanentes (γ_G)	Acciones Variables (γ_Q)	
		Principal	Acompañamiento
Favorable	0.8	0	0
Desfavorable	1.35	1.5	1.5

Tabla 2.4.5. Coeficientes parciales de seguridad para acciones en situaciones persistentes o transitorias.

2.4.1.7 Combinación de acciones

Las combinaciones de acciones de acuerdo a la normativa considerada se muestran en la siguiente tabla 2.4.6:

Situación de cálculo	Acciones G_d	Acciones variables		Acciones A_d
		Principal	Acompañamiento	
Persistente o transitoria	$\gamma_G \cdot G_k$	$\gamma_Q \cdot Q_k$	$\gamma_Q \cdot \psi_0 \cdot Q_k$	-
Accidental	$\gamma_{GA} \cdot G_k$	$\psi_1 \cdot Q_k$	$\psi_2 \cdot Q_k$	$\gamma_A \cdot A_k$

Tabla 2.4.6. Combinación de acciones para situaciones persistente o transitoria y accidental

Para edificios convencionales, el valor de cálculo del efecto de las acciones puede determinarse de acuerdo a los apartados 4.2.2 y 4.3.2 del DB-SE, “Documento Básico SE Seguridad Estructural”:

- Para estados límite últimos para situaciones persistentes o transitorias:

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j} + \gamma_{Q,1} \cdot Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \cdot \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i} \quad (2.4.3)$$

- Para estados límite últimos para situaciones accidentales o extraordinarias:

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{GA,j} \cdot G_{k,j} + A_k + \psi_{1,1} \cdot Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i} \quad (2.4.4)$$

- Para estados límite de servicio² para combinación poco probable:

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i} \quad (2.4.5)$$

donde,

$G_{k,j}$ Valor característico de las acciones permanentes;

$Q_{k,1}$ Valor característico de la acción variable determinante;

² Realmente, estas son las expresiones para la combinación de acciones característica. En el caso de las verificaciones de aptitud al servicio se emplea la combinación característica para comprobaciones bajo el criterio de integridad de los elementos constructivos, que suele ser el más restrictivo. En el caso de otros criterios, se emplean otras combinaciones de acciones similares, como la frecuente o la casi permanente.

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

2.4.2 Predimensionado de las barras de las vigas de celosía

Para determinar los perfiles, que se definen inicialmente en los modelos de las vigas de celosía analizadas de acuerdo a los estudios de rendimiento estructural, es necesario realizar un predimensionado de dichos perfiles de acuerdo a dos posibles métodos que se exponen a continuación, según se realice dicho dimensionado previo considerando las deformaciones para ELS o considerando los esfuerzos axiales de las barras de las vigas de celosía o armaduras para ELU.

2.4.2.1 Método 1

Definir la inercia equivalente necesaria de los cordones para cumplir con la limitación de deformación (flecha máxima según criterios de dimensionado). La inercia de acuerdo a la expresión para viga apoyada en los extremos, será:

$$f = \frac{5}{384} \frac{q \cdot L^4}{E \cdot I} \Rightarrow I_{eq} = \frac{5}{384} \frac{q \cdot L^4}{E \cdot f_{adm}} \quad (2.4.6)$$

Para el caso de celosías en voladizo la expresión utilizada será:

$$f = \frac{1}{8} \frac{q \cdot L^4}{E \cdot I} \Rightarrow I_{eq} = \frac{1}{8} \frac{q \cdot L^4}{E \cdot f_{adm}} \quad (2.4.7)$$

donde,

q , es la carga;

L , es la luz de la viga;

E , es el módulo de elasticidad del material;

I_{eq} , es la inercia equivalente de la armadura.

2.4.2.2 Método 2

Predimensionar los perfiles de acuerdo a los esfuerzos axiales de las barras de la celosía en base a las recomendaciones de Iglesias, Alonso y Chica ^[3], del Instituto para la Construcción Tubular (ICT):

- **Cordones:** considerando el dintel como una viga biapoyada (2.4.8) y en voladizo (2.4.9), cuyo momento flector máximo y esfuerzo axial en el cordón es para una determinada carga q y una luz de la viga L :

^[3] Iglesias, G.; Alonso, Á.; Chica, J.A. (2004). *Guía de diseño para estructuras en celosía resueltas con perfiles tubulares de acero*, p. 18.

$$(2.4.8) \quad M \text{ (kN}\cdot\text{m)} = \frac{q \cdot L^2}{8} \quad \left| \Rightarrow \quad N_{Sd.c} \text{ (kN)} = \frac{M}{h} \quad (2.4.10)$$

$$(2.4.9) \quad M \text{ (kN}\cdot\text{m)} = \frac{q \cdot L^2}{2} \quad \left| \Rightarrow \quad N_{Sd.d} \text{ (kN)} = \frac{Q}{\text{sen } \theta} \quad (2.4.13)$$

- **Diagonales:** considerando que soportarán los esfuerzos cortantes de acuerdo a las expresiones (2.4.11) y (2.4.12) de forma que el esfuerzo axial vendrá dado por la expresión:

$$(2.4.11) \quad Q \text{ (kN)} = \frac{q \cdot L}{2} \quad \left| \Rightarrow \quad N_{Sd.d} \text{ (kN)} = \frac{Q}{\text{sen } \theta} \quad (2.4.13)$$

$$(2.4.12) \quad Q \text{ (kN)} = q \cdot L$$

Para los cordones superiores de las vigas de celosía biapoyadas y los cordones inferiores de las vigas de celosía en voladizo, así como para las barras de relleno comprimidas, será necesario considerar:

- Resistencia última axial de la barra a pandeo:

$$N_{b,Rd} = \chi \cdot A \cdot f_{yd} \geq N_{Sd.c} \quad (2.4.14)$$

Donde A es el área eficaz y el coeficiente de pandeo χ es la relación entre la resistencia $N_{b,Rd}$ de cálculo de pandeo con respecto a la resistencia plástica axial $N_{pl,Rd}$ (para secciones de clase 1, 2 y 3):

$$\chi = \frac{N_{b,Rd}}{N_{pl,Rd}} = \frac{f_{b,Rd}}{f_{yd}} \quad (2.4.15)$$

donde $f_{b,Rd} = \frac{N_{b,Rd}}{A}$ (la tensión de pandeo de cálculo); $f_{yd} = \frac{f_y}{\gamma_M}$ (el límite elástico de cálculo).

Los valores del factor de reducción por pandeo χ , se podrán obtener por las curvas de pandeo, dado que es el inverso del coeficiente de amplificación de tensiones K_1 , de forma que: $\chi = 1/k_1$.

$$(2.4.16) \quad \chi = f(\bar{\lambda}) \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \phi = 0,5 \cdot \left[1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2 \right] \quad (2.4.17) \\ \chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}} \leq 1 \quad (2.4.18) \end{array} \right.$$

donde, χ (factor de reducción por pandeo barra) = $f(\bar{\lambda})$ (esbeltez adimensional) en curvas de pandeo “b” para elementos conformados en frío utilizando el límite elástico del material de base f_{yb} .

$$\bar{\lambda} = \frac{\lambda}{\lambda_E} \quad \text{donde:} \quad \lambda_E = \pi \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (\text{esbeltez de Euler}),$$

$$\text{por lo tanto:} \quad \bar{\lambda} = \frac{l_k / i_{\min}}{\pi \cdot \sqrt{E / f_y}} \quad (2.4.19)$$

donde,

i_{\min} , es el radio de giro⁴ mínimo del perfil seleccionado;

l_k , es la longitud eficaz de pandeo, donde $l_k = \beta \cdot l_c = 0,9 \cdot l_c$ para los cordones;

$l_k = \beta \cdot l_c = 0,75 \cdot l_c$ para las barras de relleno, de acuerdo a las recomendaciones de Iglesias, Alonso y Chica [5]. Siendo, l_c , la longitud teórica entre nudos.

f_y , es la tensión límite elástica.

Las curvas de pandeo para los perfiles tubulares están clasificadas de acuerdo con la siguiente tabla 2.4.7:

Sección transversal	Proceso de fabricación	Curvas de pandeo
	Conformación en caliente	a
	Conformación en frío (f_{yb} * utilizado)	b
	Conformación en frío (f_{yc} ** utilizado)	c

Tabla 2.4.7. Curvas de pandeo para los perfiles tubulares.

La mayoría de las secciones abiertas corresponden a las curvas “b” y “c”. Consecuentemente, en caso de pandeo, la utilización de perfiles tubulares conformados en caliente proporciona generalmente un ahorro considerable de peso.

El diagrama, de la figura 2.4-4a, sólo será válido hasta un cierto punto P , que corresponde a una esbeltez de Euler λ_E también conocida como λ_{\lim} , esbeltez para la cual:

$$\sigma_{cr} (\text{tensión crítica}) = f_y (\text{tensión del límite elástico})$$

Para barras de acero $f_y = 275 \text{ N/mm}^2 \Rightarrow \lambda_{\lim} = 86,8$

⁴ El radio de giro de las secciones huecas (relativo a la masa del perfil) es generalmente mucho mayor que el correspondiente al eje débil de los perfiles abiertos. Para longitud y carga dadas, esta diferencia da lugar a una menor esbeltez para los perfiles tubulares, y por lo tanto a un menor peso al compararlos con los perfiles abiertos.

[5] Iglesias, G.; Alonso, Á.; Chica, J.A. (2004). *Guía de diseño para estructuras en celosía resueltas con perfiles tubulares de acero*, p. 11.

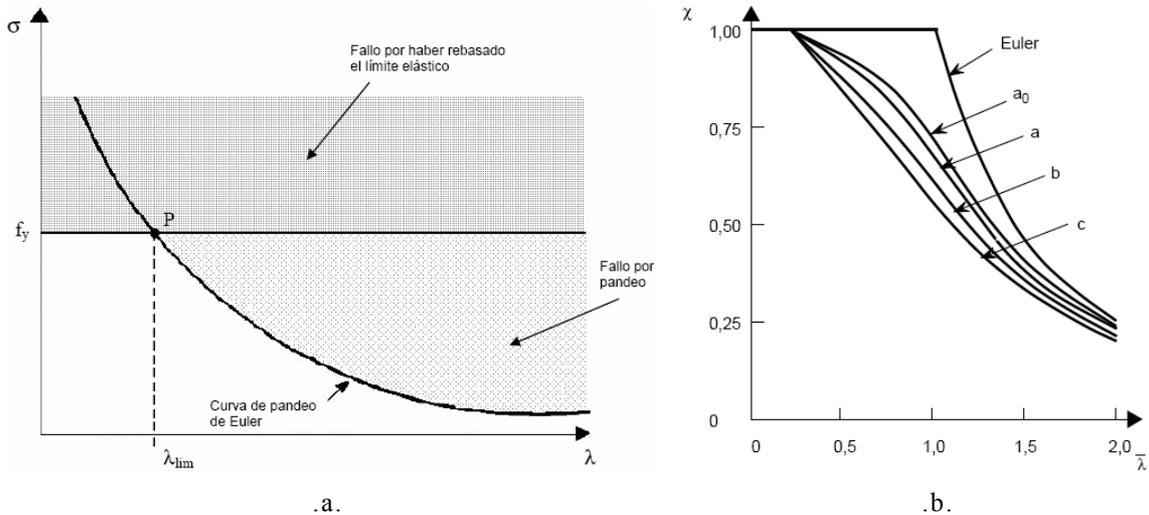


Figura 2.4-4. Representación curva de pandeo de Euler y los modos de fallo, y curvas europeas de pandeo. (Imágenes tomadas de [Santillana 2008, 13]).

Los cordones comprimidos inferiores no restringidos lateralmente de las vigas de celosía con barras de perfil tubular tienen longitudes de pandeo reducidas, debido a la mejora de la rigidez torsional y de la rigidez a la flexión de las correas y de las uniones correa-viga en dichas celosías. Estos factores hacen que la utilización de perfiles tubulares en celosías sea incluso más favorable. Es por ello por lo que se utilizan perfiles tubulares ya que ofrecen una solución económica, especialmente para barras sometidas a compresión y a torsión.

2.4.3 Cálculo de esfuerzos y criterios de dimensionado

En este apartado se describe el método de cálculo para determinar los esfuerzos que solicitan las distintas barras de las celosías, así como se definen criterios de dimensionado considerados para los estados límite últimos (ELU) y los estados límite de servicio (ELS). El cálculo se ha realizado mediante el cálculo matricial de estructuras de barras utilizando el programa de análisis estructural SAP 2000 v. 15. Para la determinación de las matrices de rigidez de cada una de las barras han sido contemplados los teoremas de Mohr, la ley de Hooke y la teoría de la torsión de Saint Venant, mediante lo cual han sido relacionados todos los movimientos posibles de los extremos de las barras con los esfuerzos que los provocan.

La determinación de las secciones se realiza de acuerdo a la Instrucción de Acero Estructural (EAE-2011), así como las recomendaciones de Iglesias, Alonso y Chica [6], para los siguientes criterios:

- Acero S275 para todas las barras, aunque es recomendable la utilización de perfiles tubulares de mayor límite elástico para los cordones (acero S355) que para las barras de relleno. De este modo se mejoraría la eficiencia de las uniones, donde los valores más habituales son:

$$\text{para } t \leq 6 \text{ mm} \rightarrow \text{S275 JOH} \rightarrow f_y = 275 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{para } t \geq 8 \text{ mm} \rightarrow \text{S355 J2H} \rightarrow f_y = 355 \text{ N/mm}^2$$

[6] Iglesias, G.; Alonso, Á.; Chica, J.A. (2004). *Guía de diseño para estructuras en celosía resueltas con perfiles tubulares de acero*, p. 11.

- Perfiles RHS con un ratio $h/t < 37.2$. En este caso se garantiza el límite elástico en la fibra más alejada de la sección. En caso de superar dicho valor se tendrán en cuenta los efectos de pandeo local de las secciones.
- Perfiles RHS de sección transversal cuadrada, con menor espesor de pared que los adoptados para los cordones, lo que favorecerá también el buen comportamiento de las uniones.
- Los coeficientes de pandeo se considerarán de acuerdo a dicha norma, partiendo de la hipótesis de que todos los nudos tienen el desplazamiento perpendicular al plano de la celosía coaccionado.
- Se han considerado, en todos los casos, los esfuerzos de cortante y flexión debido al peso propio de las barras.
- Se estandarizaran las barras de relleno a unas pocas dimensiones (2 o 3 como máximo, dependiendo de la luz). Su peso en el global de la estructura se estima entre un 15-20%.

La comprobación de los perfiles metálicos se ha llevado a cabo sobre la base de las consideraciones de la normativa DB-SE-A, “Documento Básico Seguridad Estructural Acero”, según métodos elásticos. En el dimensionado de los elementos que componen la estructura ha sido considerada la satisfacción de ELU y ELS que se detallan a continuación:

- **ELU de agotamiento frente a las solicitaciones:** las fuerzas internas capaces de resistir, por toda sección transversal de las barras de las armaduras, serán iguales o sobrepasarán las fuerzas de cálculo que las solicitan, dando cumplimiento, así, a la comprobación tensional de los perfiles para dicho estado límite.
- **ELU de inestabilidad:** las fuerzas internas capaces de resistir, por toda sección transversal de las barras de las armaduras, serán iguales o sobrepasarán las fuerzas de cálculo que las solicitan, sumadas a las derivadas de los efectos de segundo orden o de inestabilidad.
- **ELS de deformación:** el dimensionado ha sido realizado en base a lo estipulado en el apartado 4.3.3 del DB SE.

En el caso de considerar la integridad de los elementos constructivos, considerando las deformaciones que se producen después de la puesta en obra del elemento (todas las cargas excepto el peso propio de las armaduras), limitándolas a los valores expuestos en la siguiente tabla 2.4.8:

Tipo de estructura	Valor flecha/luz
Vigas de celosía con apoyos en los extremos	1/500
Vigas de celosía en voladizo	1/300

Tabla 2.4-8. Deformaciones admisibles según el tipo de estructura.

2.4.4 Evaluación del rendimiento estructural

En este epígrafe se describen a continuación las dos expresiones para determinar el rendimiento estructural de las vigas de celosía, ambas formuladas por Estévez y

Martín ^{[7][8]}. Dichos autores proponen dos parámetros adimensionales de rendimiento estructural: el rendimiento resistente R_r y el rendimiento global R_g . Para cada estudio comparativo de rendimiento estructural se tomará el parámetro adimensional más adecuado, de acuerdo a los parámetros de diseño y las opciones de cálculo consideradas.

2.4.4.1 Rendimiento estructural resistente

El rendimiento resistente R_r es un parámetro adimensional que, como describen Estévez y Martín ^[7], relaciona la carga soportada (Q) y el peso propio de la estructura (P_e), de acuerdo a la siguiente expresión:

$$R_r = \alpha \frac{Q}{P_e} \quad (2.4.20)$$

donde,

α , es el coeficiente constante de ajuste a la escala de ordenadas;

Q , es la carga total aplicada en la estructura;

P_e , es el peso total de la armadura analizada.

2.4.4.2 Rendimiento estructural global

El rendimiento global R_g es un parámetro adimensional que, como describen Estévez y Martín ^[7], además de considerar el rendimiento resistente, también tiene en cuenta la rigidez a flexión con objeto de tener una visión global de la estructura analizada, de acuerdo a la siguiente expresión:

$$R_g = \beta \frac{Q \cdot L}{P_e \cdot f} \quad (2.4.21)$$

donde,

β , es el coeficiente constante de ajuste a la escala de ordenadas;

Q , es la carga total aplicada en la estructura;

L , es la luz del vano de la celosía analizada;

P_e , es el peso total de la armadura analizada;

f , es la flecha o deformación máxima de la viga.

Este valor adimensional de rendimiento global R_g se optimizará cuando el producto $P_e \cdot f$ sea menor.

Los coeficientes de ajuste α y β en la escala de ordenadas son valores constantes que permiten visualizar de forma más correcta los resultados en las gráficas representativas de los resultados de los rendimientos de las distintas vigas.

^[7] Estévez Cimadevila, F.J.; Martín Gutiérrez, E. (2002). *Influencia de los parámetros de diseño en el rendimiento estructural de vigas de celosía*, pp. 19 y 20.

^[8] Estévez Cimadevila, F.J.; Martín Gutiérrez, E. (2003). *Análisis del rendimiento estructural de vigas Vierendeel*.

2.5 Estudios comparativos de vigas en celosía planas en base a los distintos parámetros de diseño, y según las líneas isostáticas

En base a lo expuesto anteriormente, en este apartado se realizan los cuatro estudios comparativos, de acuerdo a los distintos «parámetros de limitación o de control» para el análisis de las distintas triangulaciones. Los resultados más relevantes se muestran en las diferentes figuras y tablas del presente apartado.

2.5.1 Estudio comparativo básico inicial

El objetivo del presente estudio básico inicial es valorar el grado de influencia de los parámetros de diseño y opciones de cálculo que se consideran en dicho estudio, para poder descartar, en los estudios comparativos de rendimiento estructural finales, aquellos parámetros que a pesar de influir en el rendimiento estructural de una armadura se consideran de mínima relevancia o poco significativos en el estudio comparativo del rendimiento estructural de vigas de celosía planas, ya que dichos parámetros u opciones afectan de una forma similar a todas las tipologías, no influyendo en los resultados finales de la comparación realizada. Se analizan 432 modelos y los resultados se comparan para determinar el rendimiento estructural global, (expresión (2.4.21)), de dichas celosías, de acuerdo a los parámetros de diseño y a las opciones de cálculo considerados en este estudio preliminar, los cuales se definen a continuación:

- Cargas puntuales en los nudos superiores frente a las cargas equivalentes uniformemente distribuidas en el cordón superior.
- Uniones articuladas A-A frente a uniones rígidas R-R en los extremos de las barras de las armaduras.

Los 432 modelos del estudio básico inicial que se presenta corresponden al comparativo para determinar la influencia del tipo de cargas (puntuales/distribuidas) y el tipo de uniones entre las barras (articuladas/rígidas), de los cuales 216 modelos se establecen para cargas puntuales en los nudos del cordón superior y 216 modelos para las cargas equivalentes uniformemente distribuidas en dicho cordón.

Se pretende obtener unas conclusiones previas, acerca de dichos parámetros, que permitan tomar las decisiones de modelado correspondientes en los estudios comparativos finales. Aquellos parámetros de diseño u opciones de cálculo, estudiados inicialmente, que no tengan una influencia relevante o determinante en el rendimiento estructural de las vigas de celosía analizadas, no se considerarán en los tres estudios comparativos posteriores, reduciendo así el número de variables de diseño a considerar.

En este sentido, es oportuno mencionar que el parámetro de diseño que establece la separación entre los montantes verticales (dimensión de los recuadros de las vigas) no es objeto del presente estudio comparativo sobre rendimiento estructural de armaduras. Si bien es un parámetro de diseño que influye de forma significativa en el rendimiento de las vigas de celosías, como se desprende del estudio de Estévez y Martín ^[1], cabe destacar que lo hace de forma similar en todas las geometrías y, por lo tanto, se considera que es un parámetro de menor relevancia en cuanto a los estudios comparativos finales que se abordan a continuación.

[1] Estévez Cimadevila, F.J.; Martín Gutiérrez, E. (2002). *Influencia de los parámetros de diseño en el rendimiento estructural de vigas de celosía*, pp. 19 y 20.

Como punto de partida se considera la hipótesis de que, para las tipologías más comunes que se estudian, la viga Pratt, la viga Howe, la viga “en K” y la viga “en X”, como se muestra en la figura 2.5-1, la influencia en el rendimiento estructural de los parámetros y opciones anteriormente expuestas, no implica una variación significativa de los resultados de dichas geometrías, o influye de forma similar en todas las geometrías, siendo poco relevante en el estudio. No obstante, se analizan con el fin de cuantificar dicha variación.

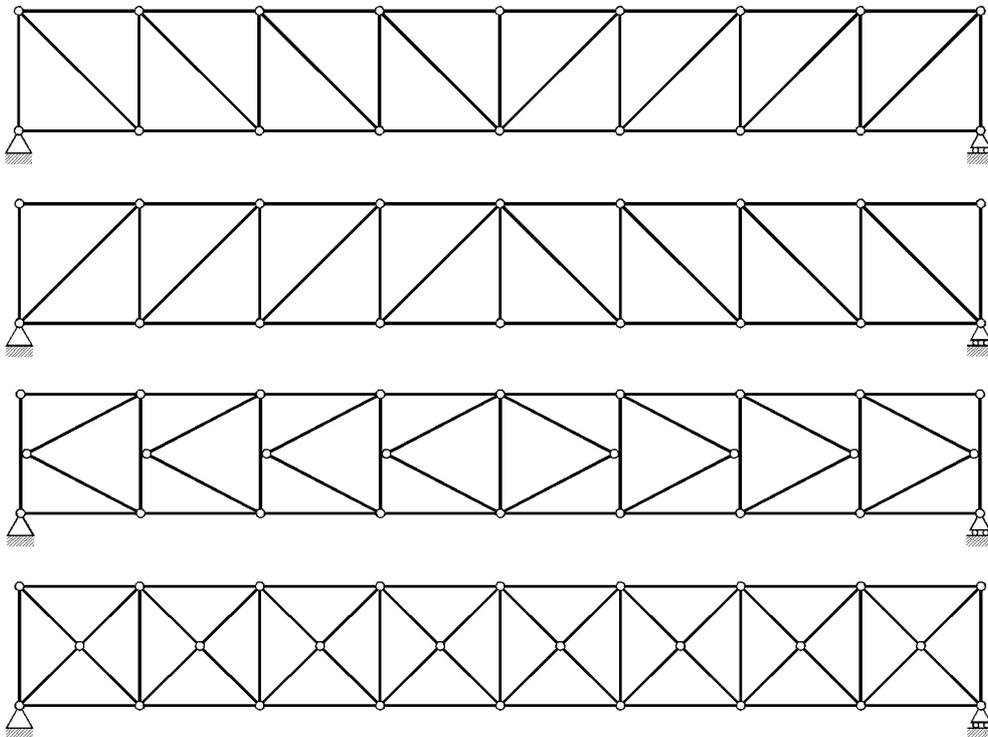


Figura 2.5-1. Esquema de las geometrías de la viga Pratt, la viga Howe, la viga “en K” y la viga “en X” con uniones articuladas A-A en los extremos de las barras.

También se compararán los resultados de dichas triangulaciones con la viga bastidor o viga Vierendeel, de acuerdo a la figura 2.5-2, como complemento de interés, dado que ofrece una mejor visión en el análisis comparativo del problema tratado.

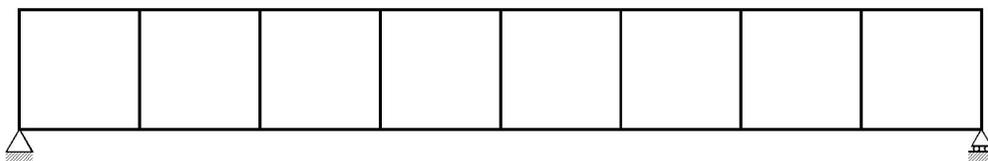


Figura 2.5-2. Esquema de la geometría de la viga Vierendeel, analizada en el estudio básico inicial.

Para el presente estudio básico inicial, se analizan las tipologías estructurales anteriormente mencionadas, de acuerdo con los parámetros de diseño y opciones de cálculo objeto de este estudio preliminar, para cuatro luces de vano distintas, 14.0 m, 21.0 m, 28.0 m y 35.0 m y para los siguientes cantos H: 1.0, 1.4, 1.8, 2.2, 2.6 y 3.0 m. La metodología utilizada para estudiar las cinco geometrías de celosías y las variables de diseño, anteriormente mencionadas, se establece de acuerdo a los siguientes criterios de dimensionado:

- No hay limitación de deformaciones (ELS) para los casos extremos claramente inadecuados. Dado que se trata de un análisis lineal para el estudio de las deformaciones, y por lo tanto las deformaciones son proporcionales a la carga, el exceso de deformación no influye en el comparativo en base a los resultados de rendimiento global de las distintas armaduras analizadas.
- Se consideran los mismos perfiles de sección tubular cuadrada para los cordones, y los mismos perfiles para las barras de relleno en todas las tipologías del estudio comparativo básico inicial.

En la tabla 2.5-1, se presentan los resultados representativos de las distintas tipologías de celosía analizadas para una luz de 14.0 m y un canto de 1.4 m. Uniones articuladas A-A y rígidas R-R en los extremos de las barras, para cargas puntuales en los nudos superiores y cargas equivalentes uniformemente distribuidas en el cordón superior. Se muestran los siguientes valores de cada tipo de celosía:

- Axil máximo de compresión (en KN), para ELU.
- Momento flector máximo (en m·KN) en valor absoluto, para ELU.
- Flecha máxima (deformación vertical en cm), para ELS.
- Rendimiento estructural global R_g .

Tipo de celosía	Tipo de uniones	Tipo de cargas	N máx. (-) (KN)	M máx. (m·KN)	Flecha (cm)	R_g
Viga Pratt	Articuladas	Puntuales	-831,52	≈ 0	3,794	2,826
		Distribuida	-836,58	17,94	3,818	2,808
	Rígidas	Puntuales	-851,23	10,44	3,721	2,881
		Distribuida	-865,12	15,99	3,748	2,833
Viga Howe	Articuladas	Puntuales	-779,55	≈ 0	3,692	2,904
		Distribuida	-784,30	17,94	3,714	2,887
	Rígidas	Puntuales	-801,27	9,34	3,623	2,959
		Distribuida	-814,86	14,00	3,685	2,909
Viga “en K”	Articuladas	Puntuales	-783,87	≈ 0	2,846	3,116
		Distribuida	-788,61	17,94	2,863	3,098
	Rígidas	Puntuales	-786,39	8,96	2,789	3,180
		Distribuida	-799,65	14,92	2,836	3,127
Viga “en X”	Articuladas	Puntuales	-806,01	≈ 0	3,304	2,484
		Distribuida	-810,87	17,94	3,324	2,469
	Rígidas	Puntuales	-814,66	11,17	3,222	2,547
		Distribuida	-828,15	11,36	3,279	2,503
Viga Vierendeel	Articuladas	Puntuales	-	-	-	-
		Distribuida	-	-	-	-
	Rígidas	Puntuales	-809,29	139,44	16,531	0,935
		Distribuida	-820,98	148,31	16,724	0,924

Tabla 2.5-1. Cuadro de resultados representativos del análisis de celosías de luz L: 14.0 m y canto H: 1.4 m, para cargas puntuales en los nudos y carga distribuida en el cordón superior.

Los valores de la anterior tabla se obtienen de los diagramas de esfuerzos axiales de las estructuras trianguladas, y los diagramas de esfuerzos axiales y momentos flectores de viga Vierendeel. Estos valores se muestran desde la figura 2.5-3 hasta la figura 2.5-8. En este caso, las figuras corresponden a las vigas de celosía con los nudos rígidos (R-R) en los extremos de las barras de las celosías, con cargas puntuales en los nudos del cordón superior.

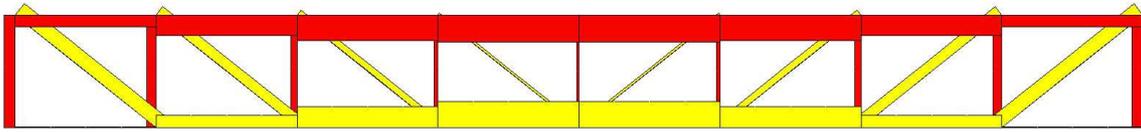


Figura 2.5-3. Diagrama de esfuerzos axiales de la viga Pratt de luz L: 14.0 m y canto H: 1.4 m.

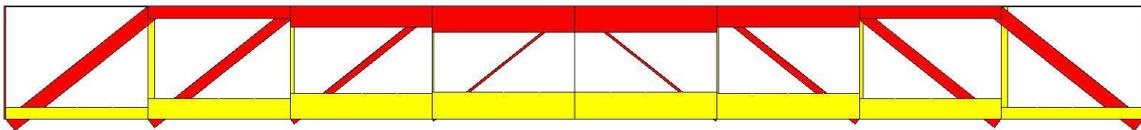


Figura 2.5-4. Diagrama de esfuerzos axiales de la viga Howe de luz L: 14.0 m y canto H: 1.4 m.

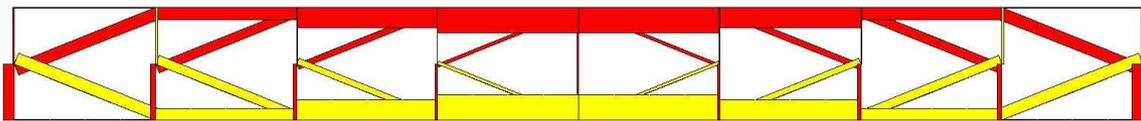


Figura 2.5-5. Diagrama de esfuerzos axiales de la viga "en K" de luz L: 14.0 m y canto H: 1.4 m.

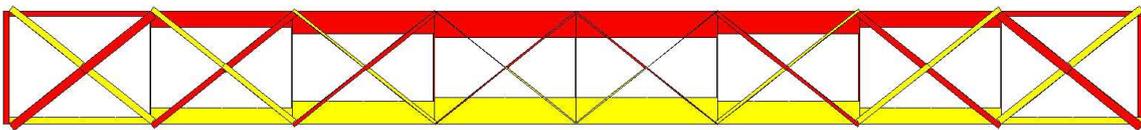


Figura 2.5-6. Diagrama de esfuerzos axiales de la viga "en X" de luz L: 14.0 m y canto H: 1.4 m.



Figura 2.5-7. Diagrama de esfuerzos axiales de la viga Vierendeel de luz L: 14.0 m y canto H: 1.4 m.

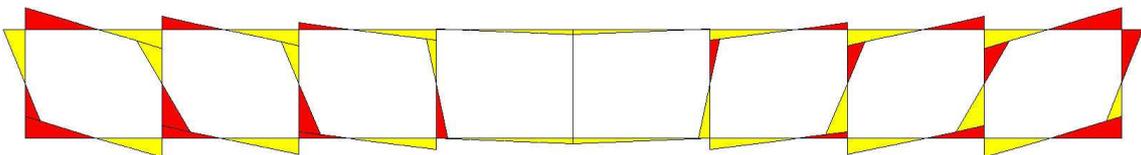


Figura 2.5-8. Diagrama de momentos flectores de la viga Vierendeel de luz L: 14.0 m y canto H: 1.4 m.

Cabe destacar que, en color amarillo, se muestran los esfuerzos de valor positivo (esfuerzos axiales de tracción y los momentos flectores positivos), mientras que en color rojo se muestran los esfuerzos axiales de valor negativo (esfuerzos axiales de compresión y los momentos flectores negativos).

En las figuras 2.5-9 y 2.5-10, se presentan los resultados de rendimiento global obtenido en el estudio básico previo para vigas de celosía biapoyadas de 14.0 m de luz entre apoyos en los extremos. Se muestran los resultados para cargas puntuales en los nudos superiores y para cargas equivalentes uniformemente distribuidas a lo largo del cordón superior, con las uniones articuladas A-A y rígidas R-R, respectivamente, en los extremos de las barras de las celosías.

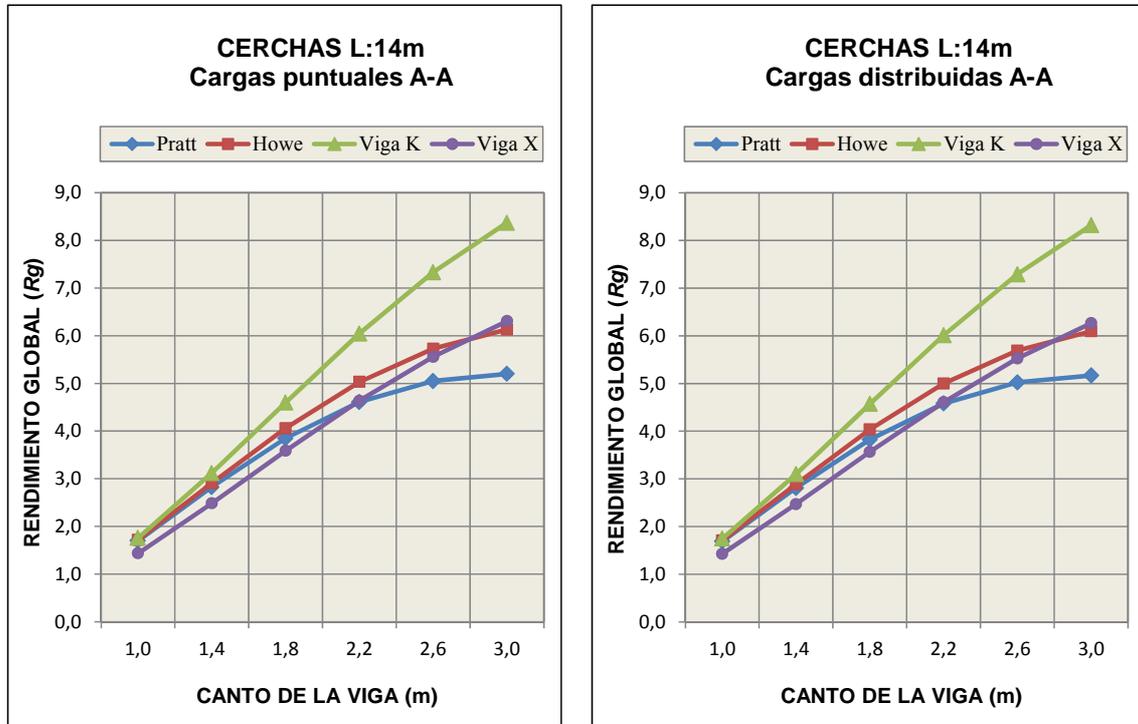


Figura 2.5-9. Rendimiento de vigas biapoyadas de 14.0 m para cargas puntuales en los nudos y cargas distribuidas en el cordón superior. Uniones articuladas A-A en las barras.

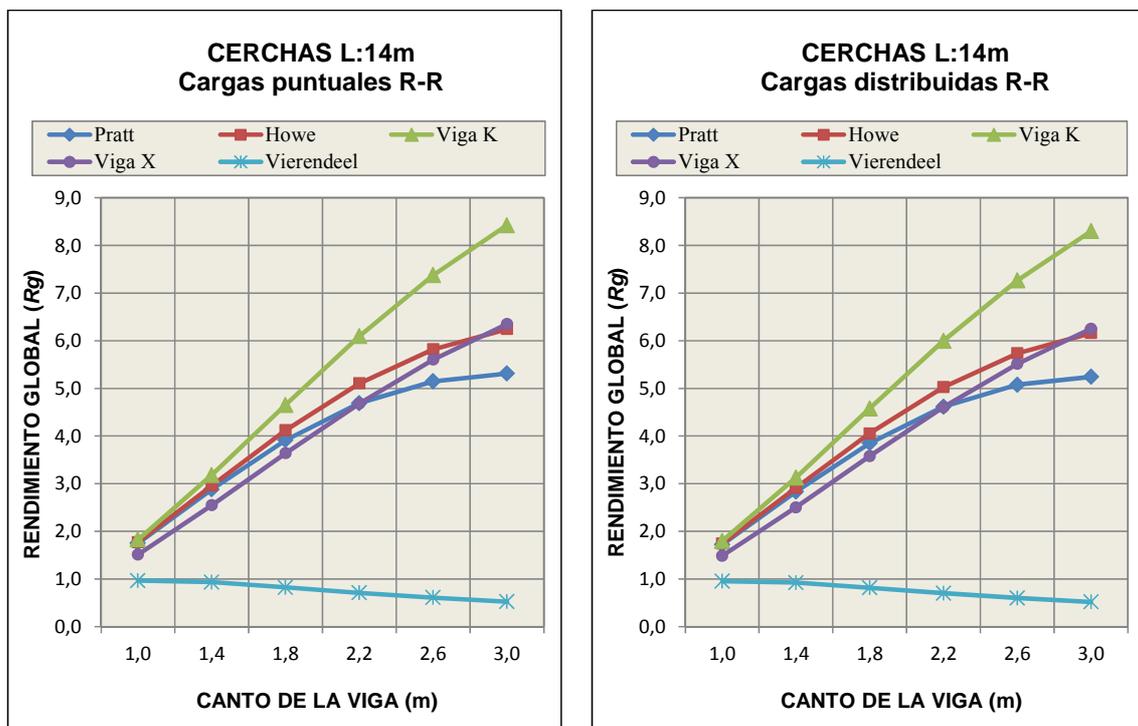


Figura 2.5-10. Rendimiento de vigas biapoyadas de 14.0 m para cargas puntuales en los nudos y cargas distribuidas en el cordón superior. Uniones rígidas R-R en las barras.

En la tabla 2.5-2, se presentan los resultados representativos de las distintas tipologías de celosía analizadas para una luz de 21.0 m y un canto de 1.8 m. Uniones articuladas A-A y rígidas R-R en los extremos de las barras, para cargas puntuales en los nudos superiores y cargas equivalentes uniformemente distribuidas en el cordón superior. Se muestran los siguientes valores de cada tipo de celosía:

- Axil máximo de compresión (en KN), para ELU.
- Momento flector máximo (en m·KN) en valor absoluto, para ELU.
- Flecha máxima (deformación vertical en cm), para ELS.
- Rendimiento estructural global R_g .

Tipo de celosía	Tipo de uniones	Tipo de cargas	N máx. (-) (KN)	M máx. (m·kN)	Flecha (cm)	R_g
Viga Pratt	Articuladas	Puntuales	-1525,44	≈ 0	4,367	4,305
		Distribuida	-1534,30	18,13	4,393	4,280
	Rígidas	Puntuales	-1507,40	20,50	4,288	4,384
		Distribuida	-1522,69	25,33	4,333	4,339
Viga Howe	Articuladas	Puntuales	-1483,07	≈ 0	4,286	4,386
		Distribuida	-1534,30	18,13	4,311	4,361
	Rígidas	Puntuales	-1469,43	17,85	4,212	4,463
		Distribuida	-1484,40	19,62	4,257	4,416
Viga “en K”	Articuladas	Puntuales	-1502,22	≈ 0	3,506	4,548
		Distribuida	-1510,83	18,13	3,526	4,522
	Rígidas	Puntuales	-1454,44	19,60	3,440	4,635
		Distribuida	-1469,17	19,81	3,447	4,586
Viga “en X”	Articuladas	Puntuales	-1531,96	≈ 0	4,040	3,538
		Distribuida	-1540,66	18,13	3,998	3,518
	Rígidas	Puntuales	-1495,34	23,67	3,943	3,625
		Distribuida	-1510,27	23,90	3,985	3,587
Viga Vierendeel	Articuladas	Puntuales	-	-	-	-
		Distribuida	-	-	-	-
	Rígidas	Puntuales	-1443,87	339,00	18,431	2,470
		Distribuida	-1459,00	341,42	18,593	1,477

Tabla 2.5-2. Cuadro de resultados representativos del análisis de celosías de luz L: 21.0 m y canto H: 1.8 m, para cargas puntuales en los nudos y carga distribuida en el cordón superior.

En las figuras 2.5-11 y 2.5-12, se presentan los resultados de rendimiento global obtenido en el estudio básico previo para vigas de celosía biapoyadas de 21.0 m de luz entre apoyos en los extremos. Se muestran los resultados para cargas puntuales en los nudos superiores y para cargas equivalentes uniformemente distribuidas a lo largo del cordón superior, con las uniones articuladas A-A y rígidas R-R, respectivamente, en los extremos de las barras de las celosías.

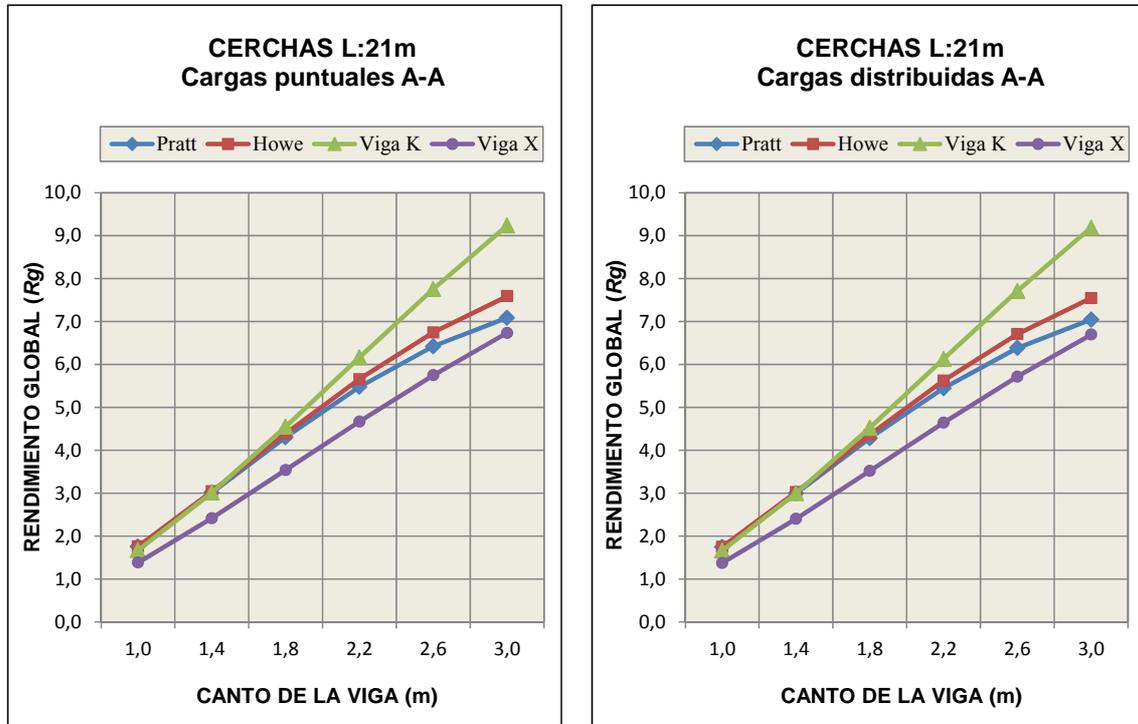


Figura 2.5-11. Rendimiento de vigas biapoyadas de 21.0 m para cargas puntuales en los nudos y cargas distribuidas en el cordón superior. Uniones articuladas A-A en las barras.

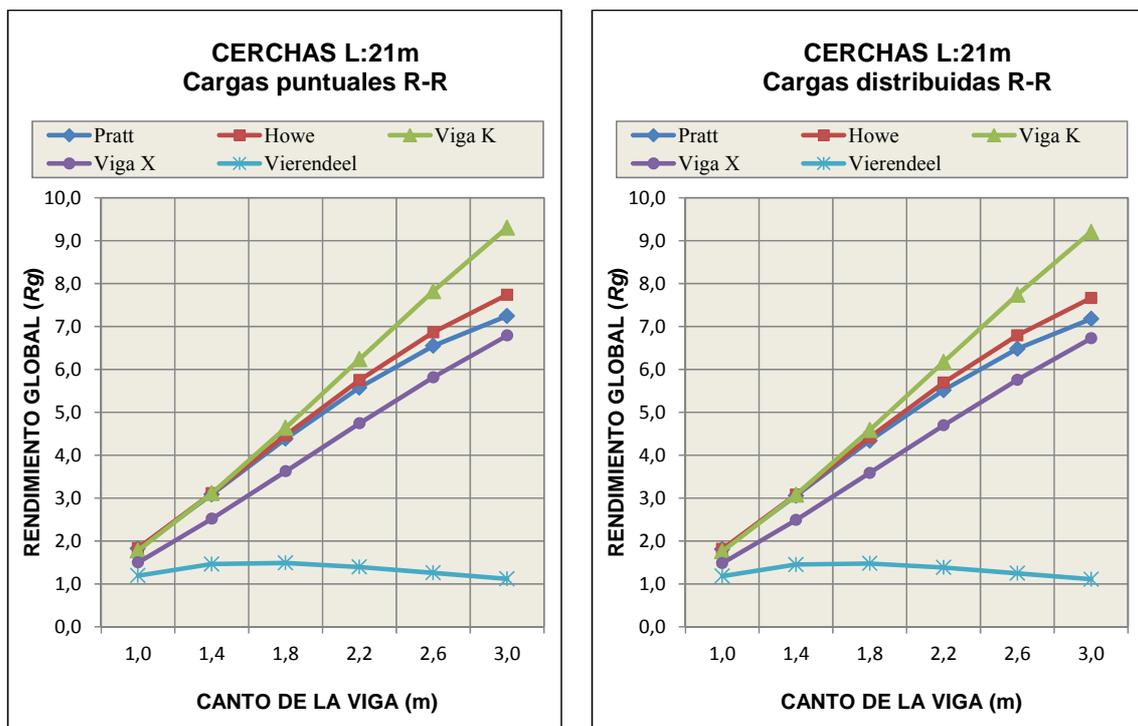


Figura 2.5-12. Rendimiento de vigas biapoyadas de 21.0 m para cargas puntuales en los nudos y cargas distribuidas en el cordón superior. Uniones rígidas R-R en las barras.

En la tabla 2.5-3, se presentan los resultados representativos de las distintas tipologías de celosía analizadas para una luz de 28.0 m y un canto de 2.2 m. Uniones articuladas A-A y rígidas R-R en los extremos de las barras, para cargas puntuales en los nudos superiores y cargas equivalentes uniformemente distribuidas en el cordón superior. Se muestran los siguientes valores de cada tipo de celosía:

- Axil máximo de compresión (en KN), para ELU.
- Momento flector máximo (en m·KN) en valor absoluto, para ELU.
- Flecha máxima (deformación vertical en cm), para ELS.
- Rendimiento estructural global R_g .

Tipo de celosía	Tipo de uniones	Tipo de cargas	N máx. (-) (KN)	M máx. (m·KN)	Flecha (cm)	R_g
Viga Pratt	Articuladas	Puntuales	-2446,78	≈ 0	4,431	3,471
		Distribuida	-2459,67	18,51	4,544	3,453
	Rígidas	Puntuales	-2406,50	49,55	4,312	3,567
		Distribuida	-2424,49	57,20	4,346	3,539
Viga Howe	Articuladas	Puntuales	-2408,55	≈ 0	4,368	3,521
		Distribuida	-2421,23	18,51	4,391	3,503
	Rígidas	Puntuales	-2375,28	44,99	4,256	3,614
		Distribuida	-2393,12	45,20	4,289	3,586
Viga “en K”	Articuladas	Puntuales	-2467,45	≈ 0	3,735	3,679
		Distribuida	-2480,14	18,51	3,754	3,660
	Rígidas	Puntuales	-2367,87	49,16	3,638	3,777
		Distribuida	-2385,22	49,53	3,666	3,748
Viga “en X”	Articuladas	Puntuales	-2547,80	≈ 0	4,284	2,710
		Distribuida	-2560,44	18,51	4,305	2,696
	Rígidas	Puntuales	-2468,32	58,15	4,148	2,799
		Distribuida	-2485,90	58,56	4,179	2,778
Viga Vierendeel	Articuladas	Puntuales	-	-	-	-
		Distribuida	-	-	-	-
	Rígidas	Puntuales	-2259,06	503,84	19,305	1,180
		Distribuida	-2276,95	507,79	19,448	1,172

Tabla 2.5-3. Cuadro de resultados representativos del análisis de celosías de luz L: 28.0 m y canto H: 2.2 m, para cargas puntuales en los nudos y carga distribuida en el cordón superior.

En las figuras 2.5-13 y 2.5-14, se presentan los resultados de rendimiento global obtenido en el estudio básico previo para vigas de celosía biapoyadas de 28.0 m de luz entre apoyos en los extremos. Se muestran los resultados para cargas puntuales en los nudos superiores y para cargas equivalentes uniformemente distribuidas a lo largo del cordón superior, con las uniones articuladas A-A y rígidas R-R, respectivamente, en los extremos de las barras de las celosías.

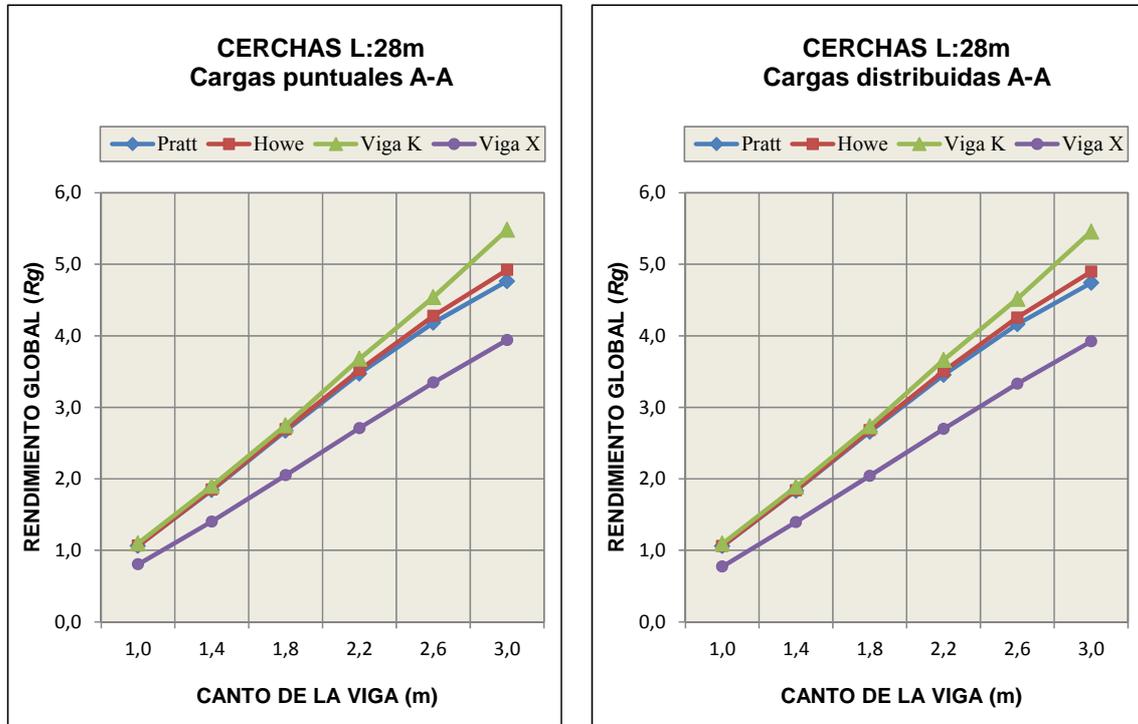


Figura 2.5-13. Rendimiento de vigas biapoyadas de 28.0 m para cargas puntuales en los nudos y cargas distribuidas en el cordón superior. Uniones articuladas A-A en las barras.

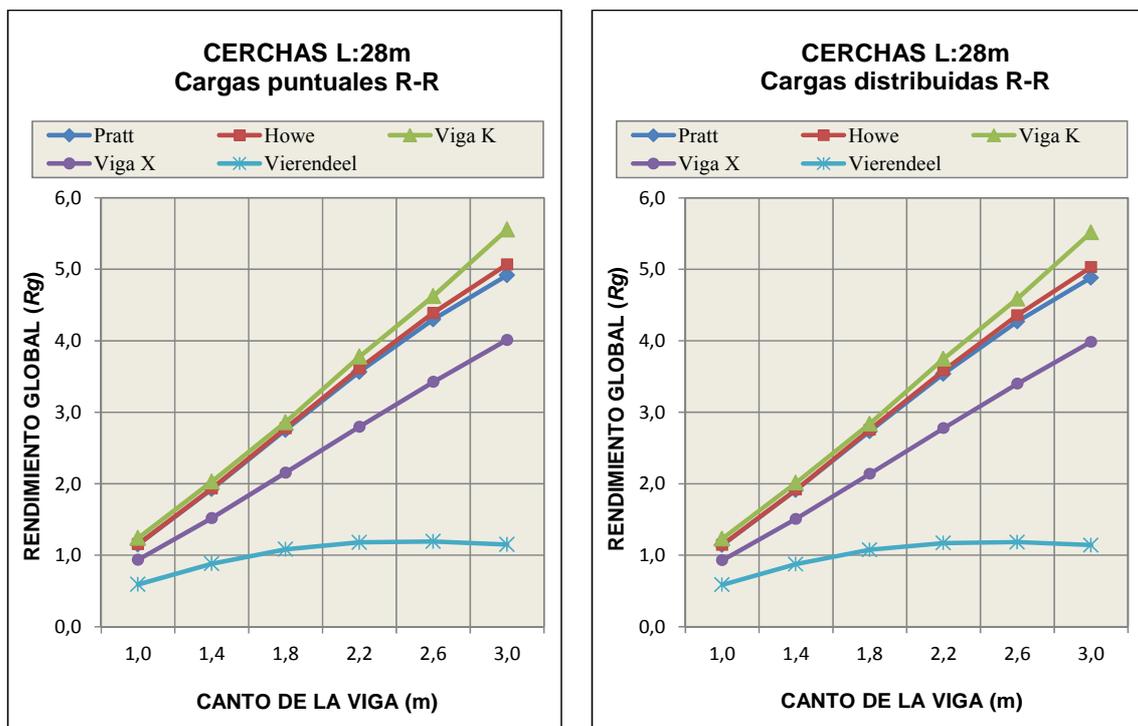


Figura 2.5-14. Rendimiento de vigas biapoyadas de 28.0 m para cargas puntuales en los nudos y cargas distribuidas en el cordón superior. Uniones rígidas R-R en las barras.

En la tabla 2.5-4, se presentan los resultados representativos de las distintas tipologías de celosía analizadas para una luz de 35.0 m y un canto de 2.6 m. Uniones articuladas A-A y rígidas R-R en los extremos de las barras, para cargas puntuales en los nudos superiores y cargas equivalentes uniformemente distribuidas en el cordón superior. Se muestran los siguientes valores de cada tipo de celosía:

- Axil máximo de compresión (en KN), para ELU.
- Momento flector máximo (en m·KN) en valor absoluto, para ELU.
- Flecha máxima (deformación vertical en cm), para ELS.
- Rendimiento estructural global R_g .

Tipo de celosía	Tipo de uniones	Tipo de cargas	N máx. (-) (KN)	M máx. (m·KN)	Flecha (cm)	R_g
Viga Pratt	Articuladas	Puntuales	-3707,65	≈ 0	4,952	3,227
		Distribuida	-3724,69	19,04	4,975	3,212
	Rígidas	Puntuales	-3634,21	108,73	4,779	3,344
		Distribuida	-3655,39	116,52	4,808	3,324
Viga Howe	Articuladas	Puntuales	-3670,57	≈ 0	4,894	3,266
		Distribuida	-3687,44	19,04	4,917	3,250
	Rígidas	Puntuales	-3607,09	91,40	4,731	3,376
		Distribuida	-3628,15	91,85	4,759	3,358
Viga “en K”	Articuladas	Puntuales	-3799,60	≈ 0	4,316	3,277
		Distribuida	-3816,47	19,04	4,335	3,260
	Rígidas	Puntuales	-3631,30	96,01	4,185	3,377
		Distribuida	-3651,78	96,56	4,209	3,358
Viga “en X”	Articuladas	Puntuales	-4015,58	≈ 0	4,990	2,400
		Distribuida	-4032,49	19,04	5,011	2,390
	Rígidas	Puntuales	-3873,72	113,88	4,808	2,491
		Distribuida	-3894,44	114,50	4,834	2,477
Viga Vierendeel	Articuladas	Puntuales	-	-	-	-
		Distribuida	-	-	-	-
	Rígidas	Puntuales	-3291,25	706,93	20,609	1,166
		Distribuida	-3312,37	711,67	20,736	1,158

Tabla 2.5-4. Cuadro de resultados representativos del análisis de celosías de luz L: 35.0 m y canto H: 2.6 m, para cargas puntuales en los nudos y carga distribuida en el cordón superior.

En las figuras 2.5-15 y 2.5-16, se presentan los resultados de rendimiento global obtenido en el estudio básico previo para vigas de celosía biapoyadas de 35.0 m de luz entre apoyos. Se muestran los resultados para cargas puntuales en los nudos superiores y para cargas equivalentes uniformemente distribuidas a lo largo del cordón superior, con las uniones articuladas A-A y rígidas R-R, respectivamente, en los extremos de las barras de las celosías.

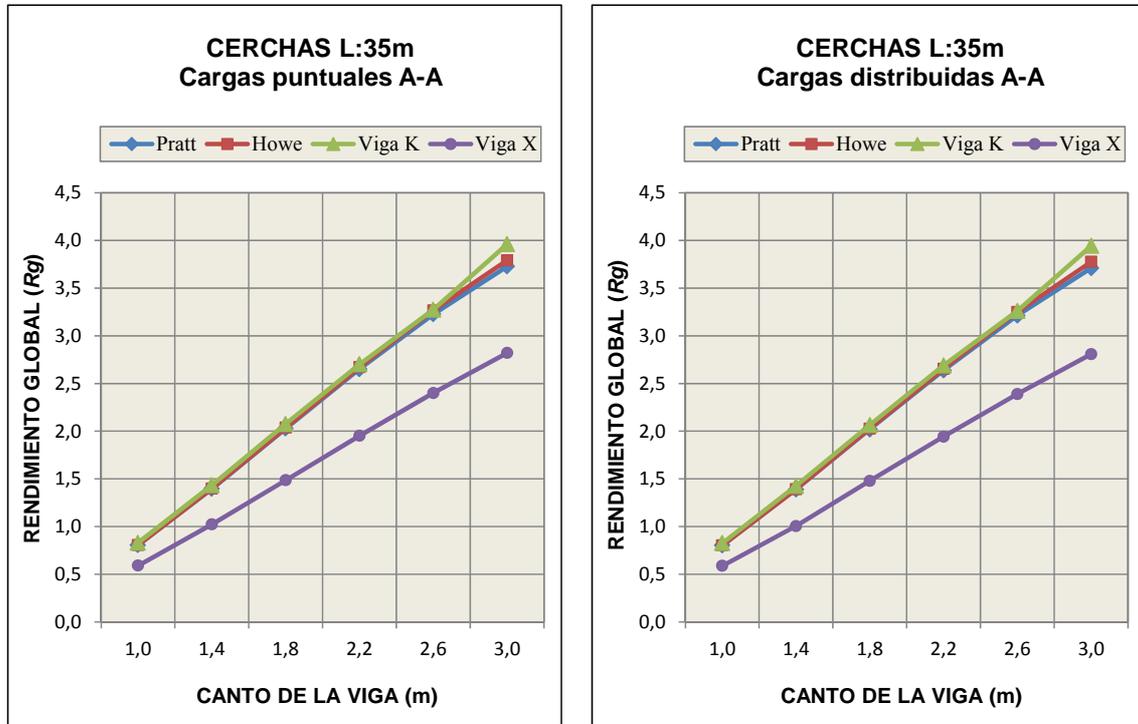


Figura 2.5-15. Rendimiento de vigas biapoyadas de 35.0 m para cargas puntuales en los nudos y cargas distribuidas en el cordón superior. Uniones articuladas A-A en las barras.

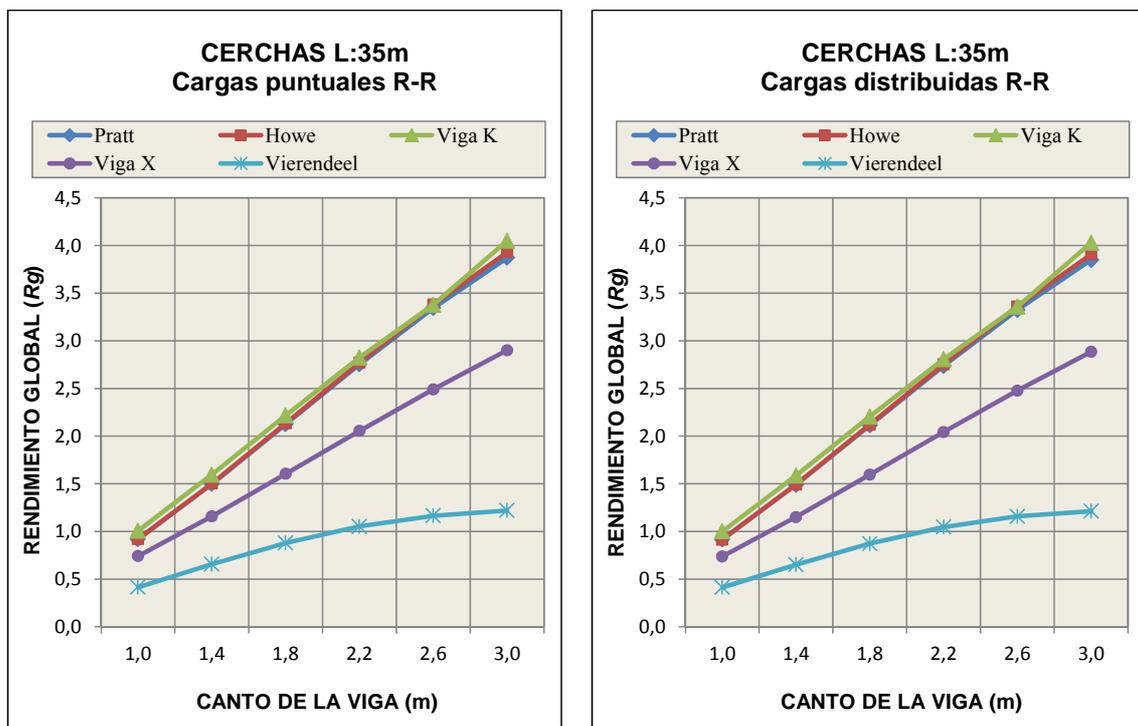


Figura 2.5-16. Rendimiento de vigas biapoyadas de 35.0 m para cargas puntuales en los nudos y cargas distribuidas en el cordón superior. Uniones rígidas R-R en las barras.

2.5.1.1 Conclusiones previas del estudio comparativo básico inicial

De acuerdo a las gráficas y a los resultados de mayor relevancia mostrados anteriormente, se extraen las siguientes conclusiones:

1. Las uniones rígidas (R-R) frente a las uniones articuladas (A-A) en los extremos de las barras, influyen en los esfuerzos obtenidos, pero lo hacen de forma poco relevante en cuanto al comparativo del rendimiento estructural se refiere, para cualquiera de las geometrías trianguladas analizadas. Sí se observa que, a pesar de que los esfuerzos axiales en las barras con nudos rígidos son ligeramente inferiores, el estado tensional a nivel sección (comprobación tensional para ELU) de los perfiles no mejora, ya que están sometidos a mayores esfuerzos de flexión y de cortante, dada la mayor rigidez de las barras. En los casos estudiados con las cargas puntuales en los nudos, las barras de relleno con uniones articuladas en los extremos sólo presentan esfuerzos poco significativos de flexión y cortante debidos a su peso propio.
2. Así mismo, se observa que los resultados de rendimiento estructural son muy similares para los casos de cargas puntuales en los nudos superiores y cargas equivalentes uniformemente distribuidas a lo largo del cordón superior, siendo esta opción de cálculo poco significativa en el estudio comparativo realizado.
3. En cuanto a las distintas dimensiones de los recuadros, o separación entre montantes verticales, apuntar que este parámetro de diseño influye de forma significativa en el rendimiento de las vigas de celosía, y lo hace de una forma prácticamente proporcional a la separación considerada entre los montantes. Sin embargo, cabe destacar que este parámetro influye de una forma similar en todas las geometrías, y por lo tanto se considera que es un parámetro de menor relevancia en cuanto a los estudios comparativos finales que se abordan a continuación.
4. De las celosías Pratt y Howe, cabe destacar que presentan un comportamiento estructural similar (deformaciones y esfuerzos axiales muy parecidos), situándose ambas en los puestos intermedios en cuanto a rendimiento estructural se refiere. Como se muestra en la figura 2.5.17, resulta relevante indicar que la gran diferencia en entre ambas geometrías reside en los esfuerzos que solicitan las diagonales. En la viga Pratt las diagonales están traccionadas y en la viga Howe, las diagonales están comprimidas. Por lo tanto, la viga Howe, a pesar de tener un rendimiento global parecido a la viga Pratt, tiene un mayor riesgo de pandeo de las barras más largas y, en consecuencia, un menor rendimiento resistente frente a acciones gravitatorias.

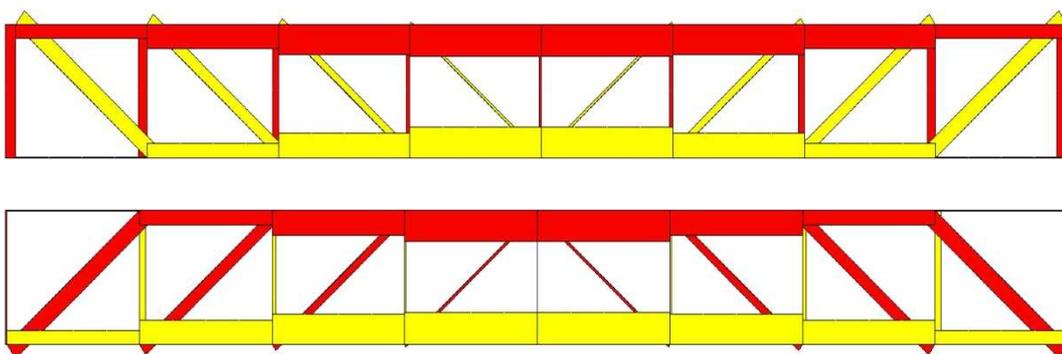


Figura 2.5-17. Diagramas de esfuerzos axiales de las vigas Pratt y Howe, respectivamente.

5. La celosía “en K” presenta el mejor comportamiento en estados límite de servicio, dado que sus deformaciones son las menores, obteniendo el mejor rendimiento global de todas las geometrías analizadas. No obstante, es de interés matizar que este tipo de triangulación requiere de más barras y, en definitiva, más uniones que encarecen el coste de su ejecución. Sería conveniente, en un estudio más amplio sobre el rendimiento de armaduras, considerar este aspecto para obtener una visión completa. La principal ventaja de esta armadura reside en que se disminuye de forma considerable la longitud de las barras comprimidas, con la consecuente reducción de la penalización por pandeo.
6. La celosía “en X” o “en cruz de San Andrés” presenta resultados muy parecidos, en cuanto a deformaciones, a las celosías “en K”, pero en esta tipología el peso propio aun es mayor (más metros de barras), y sin embargo, las deformaciones (flechas) obtenidas son ligeramente superiores a las obtenidas con las celosías “en K”, obteniendo así, un rendimiento algo más bajo con respecto al resto de geometrías.
7. Las vigas Vierendeel obtienen un rendimiento bajo en todos los casos estudiados para distintas luces entre apoyos y cantos, como era previsible a pesar de su ligereza geométrica, por su gran deformabilidad. Se observa que para grandes luces el rendimiento de dicha viga mejora ligeramente, sin embargo, no se recomienda el uso de esta celosía de nudos rígidos, excepto para aquellos casos que realmente sea necesario, ya que sus uniones rígidas suponen un coste adicional elevado, dada la complejidad que supone ejecutarlas. Además, la estabilidad de la viga Vierendeel no reside en su geometría, sino que depende de la buena ejecución de sus uniones, estando éstas muy solicitadas.
8. De acuerdo a los resultados presentados, para las vigas de celosía de dimensiones más frecuentes utilizadas en dicha tipología estructural, es decir, para una luz (L) del orden de 21-22 m, el canto necesario para un dimensionado correcto de los perfiles, a la vez que se da una respuesta satisfactoria al cumplimiento de la normativa para ELS y ELU, se establece de acuerdo a una relación razonable de $L/10$ y $L/12$.

A tenor de lo anteriormente expuesto, respecto a los tres estudios comparativos finales que se abordan a continuación, se toman las siguientes consideraciones:

1. Se consideran los recuadros o separación entre montantes de un ancho de fijo de 1.75 m de forma que para el canto mínimo analizado de 1.0 m se obtenga una inclinación aproximada, en las triangulaciones donde las diagonales van del cordón inferior al superior o viceversa, de 30° (29.74°) respecto la horizontal; mientras que para el canto máximo estudiado de 3.0 m se obtenga un ángulo aproximado de 30° (30.25°) respecto la vertical. Este criterio responde a la recomendación de la Guía de Diseño del Instituto para la Construcción Tubular (ICT). En dicha guía se recomienda un ángulo, entre las diagonales y los cordones, igual o superior a 30° para la correcta ejecución de la unión, ya que con ángulos inferiores se dificulta la ejecución de la unión.
2. Se analizan las vigas de celosía con los cordones como barras continuas, atendiendo a las cuestiones constructivas de las vigas de celosía, realizando sólo uniones articuladas en los extremos de las barras de relleno, dada su poca influencia en los resultados.
3. No se considera en el resto de los estudios comparativos la viga Vierendeel, por sus resultados claramente desfavorables en comparación con las estructuras trianguladas.

2.5.2 Estudio comparativo final 1: deformaciones máximas igualando los perfiles de todas las tipologías para un mismo estado de cargas

Una vez realizado el estudio básico previo sobre el rendimiento estructural de vigas de celosía, se aborda el primero de los tres estudios comparativos finales. En el presente estudio comparativo, se analizan 384 modelos de vigas de celosía, en base a ocho tipos de triangulación, con el objeto de comparar el rendimiento estructural global R_g , (expresión (2.4.21)), de dichas celosías, de acuerdo a las deformaciones máximas para los mismos perfiles en todas las tipologías. Los resultados más relevantes del primer estudio comparativo se muestran en las figuras y tablas del presente apartado.

El análisis de las armaduras, de las cuales 192 casos corresponden a vigas de celosía biapoyadas en los extremos y 192 modelos a vigas de celosía en voladizo, se realiza en base a los siguientes parámetros de diseño y opciones de cálculo:

- Tipo de triangulación o geometría. Se analizan la viga Pratt, la viga Howe, la viga “en K”, la viga “en K invertida”, la viga “en X”, la viga “en X” sin montantes, la viga Warren con montantes intercalados y la viga Warren con doble montante.
- Armaduras apoyadas en los extremos y celosías en voladizo.
- Cuatro luces consideradas:

Celosías biapoyadas: 14.0 m, 21.0 m, 28.0 m y 35.0 m.

Celosías en voladizo: 7.0 m, 10.5 m, 14.0 m, y 17.5 m.

- Canto de la celosía. Se analizan seis cantos distintos de viga, H: 1.0, 1.4, 1.8, 2.2, 2.6 y 3.0 m.
- Cargas puntuales en los nudos del cordón superior.
- Uniones articuladas A-A en los extremos de las barras de relleno.

Se analizan dichos modelos con el objetivo de valorar el rendimiento estructural global R_g , (expresión (2.4.21)), de cada tipología para realizar un estudio comparativo de acuerdo a los siguientes criterios de dimensionado:

- Se utilizarán perfiles iguales para los cordones de todas las celosías, y los mismos perfiles tubulares para todas las barras de relleno de todas las tipologías estudiadas. Los perfiles se predimensionan según los parámetros expuestos anteriormente según las bases de cálculo.
- No hay limitación de deformaciones para los casos extremos claramente inadecuados.

En las figuras 2.5-18 y 2.5-19 se muestran las ocho geometrías del presente estudio para vigas biapoyadas y vigas en voladizo respectivamente.

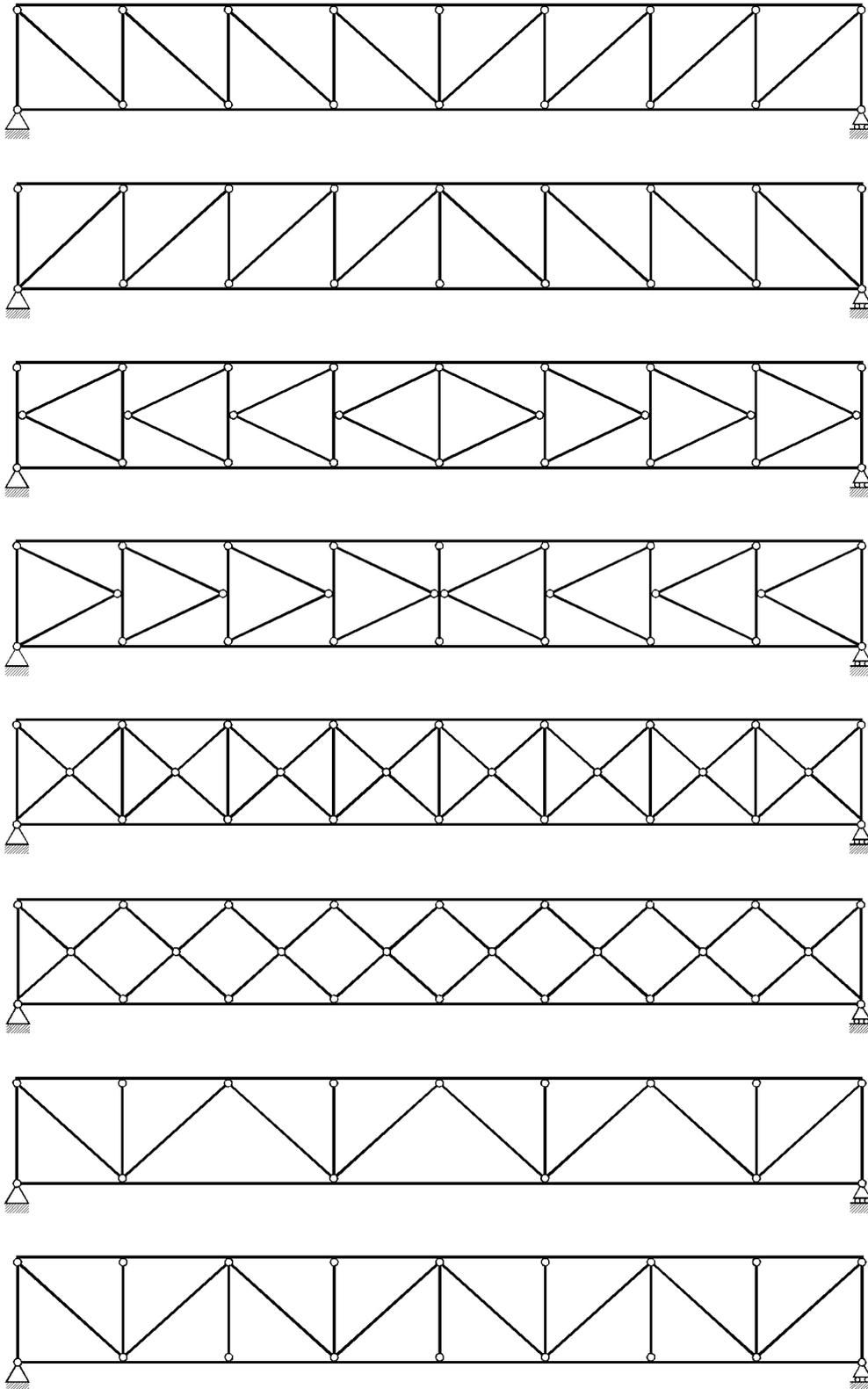


Figura 2.5-18. Geometría de las vigas biapoyadas tipo Pratt, Howe, “en K”, “en K invertida”, “en X” y “en X” sin montantes, Warren con montantes intercalados y Warren con doble montante.

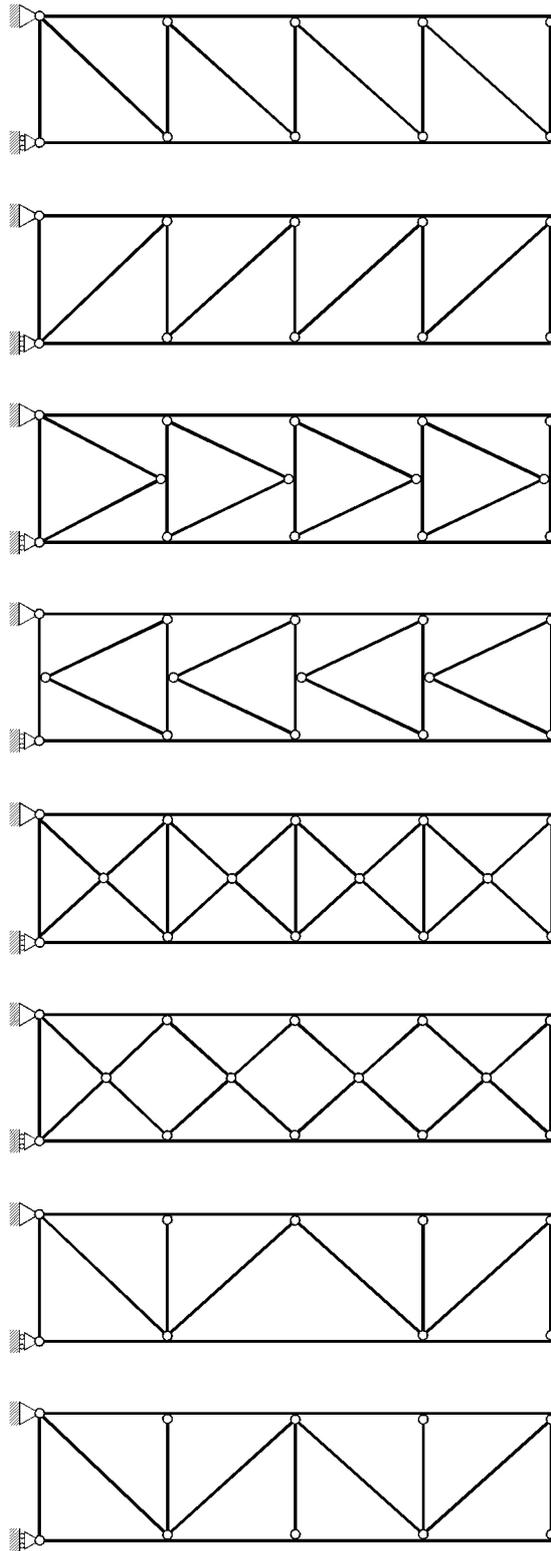


Figura 2.5-19. Geometría de las vigas en voladizo tipo Pratt, Howe, “en K”, “en K invertida”, “en X” y “en X” sin montantes, Warren con montantes intercalados y Warren con doble montante.

Cabe indicar que se establece en las vigas en voladizo el mismo criterio para denominar la viga “en K” y la viga “en K invertida” definidas para las vigas biapoyadas en el apartado 2.3, con objeto de realzar la influencia de la geometría en los resultados mostrados. La geometría que orienta sus diagonales a la de la estructura

arco-tirante correspondiente, es la viga “en K” propuesta, de forma que la geometría que no orienta sus diagonales con respecto a dicha estructura arco-tirante será la viga “en K invertida”.

En las figuras 2.5-20 y 2.5-21, se muestra el predimensionado de los perfiles para los cordones y las barras de relleno respectivamente, para las distintas luces analizadas y un canto H: 1.8 m.

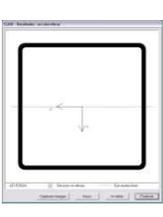
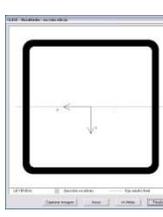
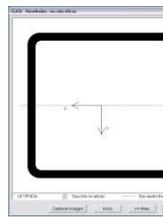
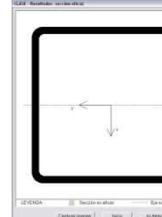
Cordones	Apoyada: 14.0m Voladizo: 7.0m	Apoyada: 21.0m Voladizo: 10.5m	Apoyada: 28.0m Voladizo: 14.0m	Apoyada: 35.0m Voladizo: 17.5m
$M_{Sd,c}$ $N_{Sd,c}$ Perfil $N_{b,Rd} = \chi \cdot A \cdot f_{yd}$	1196,21 mkN 664,56 kN C-150*5 702,51kN	2691,48 mkN 1495,27 kN C-200*10 1876,38kN	4784,85 mkN 2658,25 kN C-260*14.2 3449,77kN	7476,33 mkN 4153,52 kN C-350*16 5438,63kN
Resultados sección eficaz para el esfuerzo normal de compresión y ambos momentos flectores				
Clase perfil	Clase 1	Clase 1	Clase 1	Clase 1

Figura 2.5-20. Clasificación de secciones y cálculo de las características mecánicas eficaces según EUROCÓDIGO-3 de los cordones, para un canto H: 1.8 m. (Imágenes tomadas del programa CLASE).

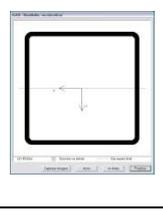
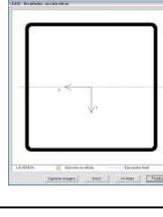
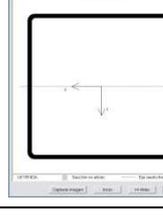
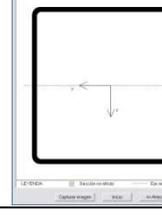
Barras de relleno	Apoyada: 14.0m Voladizo: 7.0m	Apoyada: 21.0m Voladizo: 10.5m	Apoyada: 28.0m Voladizo: 14.0m	Apoyada: 35.0m Voladizo: 17.5m
$Q_{Sd,d}$ $N_{Sd,d}$ Perfil $N_{b,Rd} = \chi \cdot A \cdot f_{yd}$	341,78 kN 510,90 kN C-125*5 529,10kN	512,66 kN 739,26 kN C-175*5 831,13kN	683,55 kN 953,36 kN C-200*6 1153,31kN	854,44 kN 1191,69 C-250*8 1943,15kN
Resultados sección eficaz para el esfuerzo normal de compresión y ambos momentos flectores				
Clase perfil	Clase 1	Clase 1	Clase 1	Clase 1

Figura 2.5-21. Clasificación de secciones y cálculo de las características mecánicas eficaces según EUROCÓDIGO-3 de las barras de relleno, para un canto H: 1.8 m. (Imágenes tomadas del programa CLASE).

Todos los perfiles anteriormente expuestos (cordones y barras de relleno) son de **clase 1**, de forma que el área eficaz es el área total de la sección al no haber problemas de abolladura locales, dados los espesores propuestos.

En las figuras desde 2.5-22 hasta 2.5-29, se muestran los diagramas de esfuerzos axiales de las vigas biapoyadas analizadas.

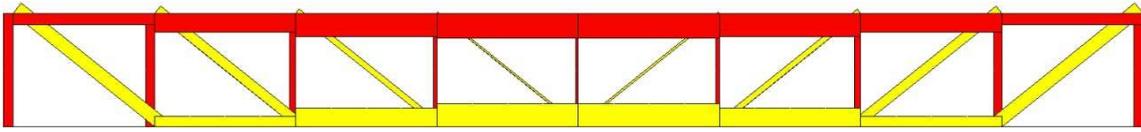


Figura 2.5-22. Diagrama de esfuerzos axiales de la viga Pratt de luz L: 14.0 m y canto H: 1.4 m.

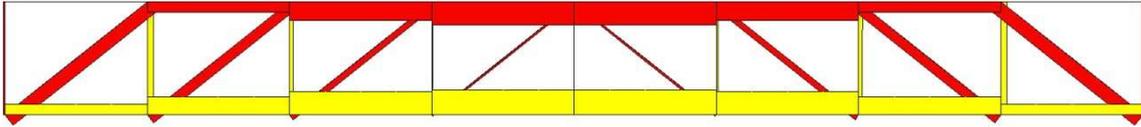


Figura 2.5-23. Diagrama de esfuerzos axiales de la viga Howe de luz L: 14.0 m y canto H: 1.4 m.

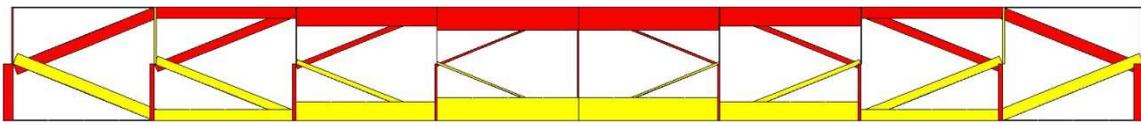


Figura 2.5-24. Diagrama de esfuerzos axiales de la viga "en K" de luz L: 14.0 m y canto H: 1.4 m.

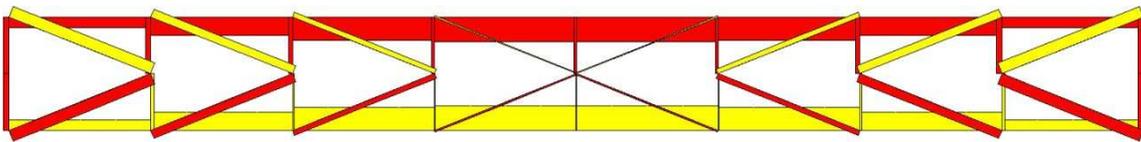


Figura 2.5-25. Diagrama de esfuerzos axiales de la viga "en K invertida" de luz L: 14.0 m y canto H: 1.4 m.

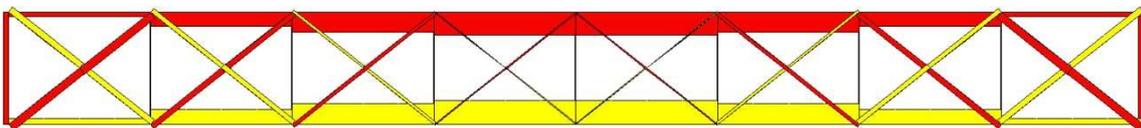


Figura 2.5-26. Diagrama de esfuerzos axiales de la viga "en X" de luz L: 14.0 m y canto H: 1.4 m.

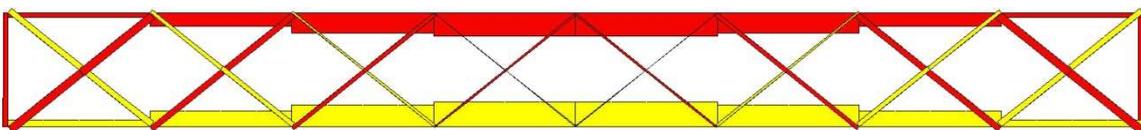


Figura 2.5-27. Diagrama de esfuerzos axiales de la viga "en X" sin montantes de luz L: 14.0 m y canto H: 1.4 m.

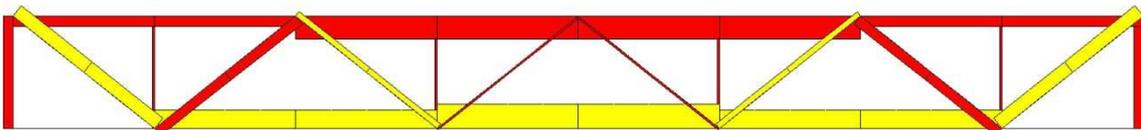


Figura 2.5-28. Diagrama de esfuerzos axiales de la viga Warren de luz L: 14.0 m y canto H: 1.4 m.

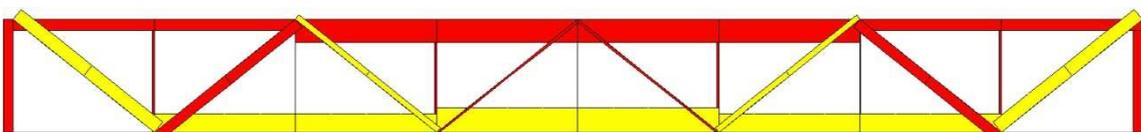


Figura 2.5-29. Diagrama de esfuerzos axiales de la viga Warren con doble montante de luz L: 14.0 m y canto H: 1.4 m.

En las figuras 2.5-30 y 2.5-31, se presentan los resultados de rendimiento global obtenido en el primer estudio comparativo, igualando perfiles, para ocho tipologías de vigas de celosía biapoyadas, de 14.0 m y 21.0 m de luz entre apoyos. Se muestran los resultados para cargas puntuales en los nudos superiores, con las uniones articuladas A-A en los extremos de las barras de relleno.

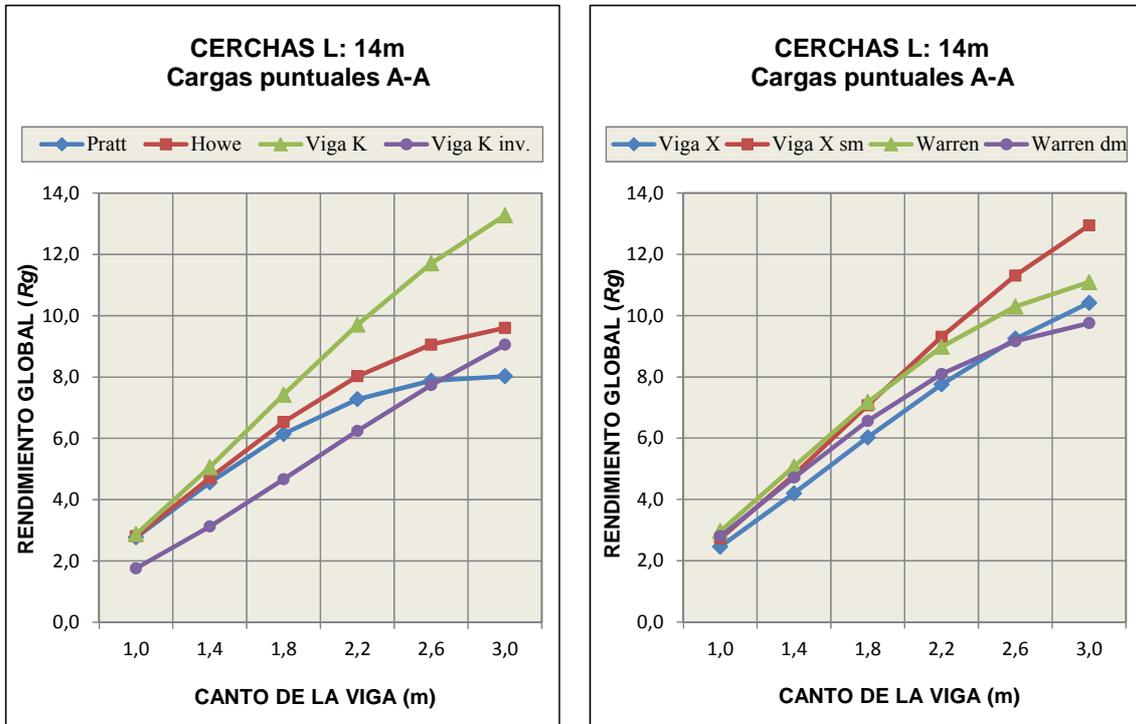


Figura 2.5-30. Rendimiento estudio 1. Resultados de 8 celosías (4+4) de 14.0 m biapoyadas para cargas puntuales en los nudos. Uniones articuladas A-A en las barras de relleno.

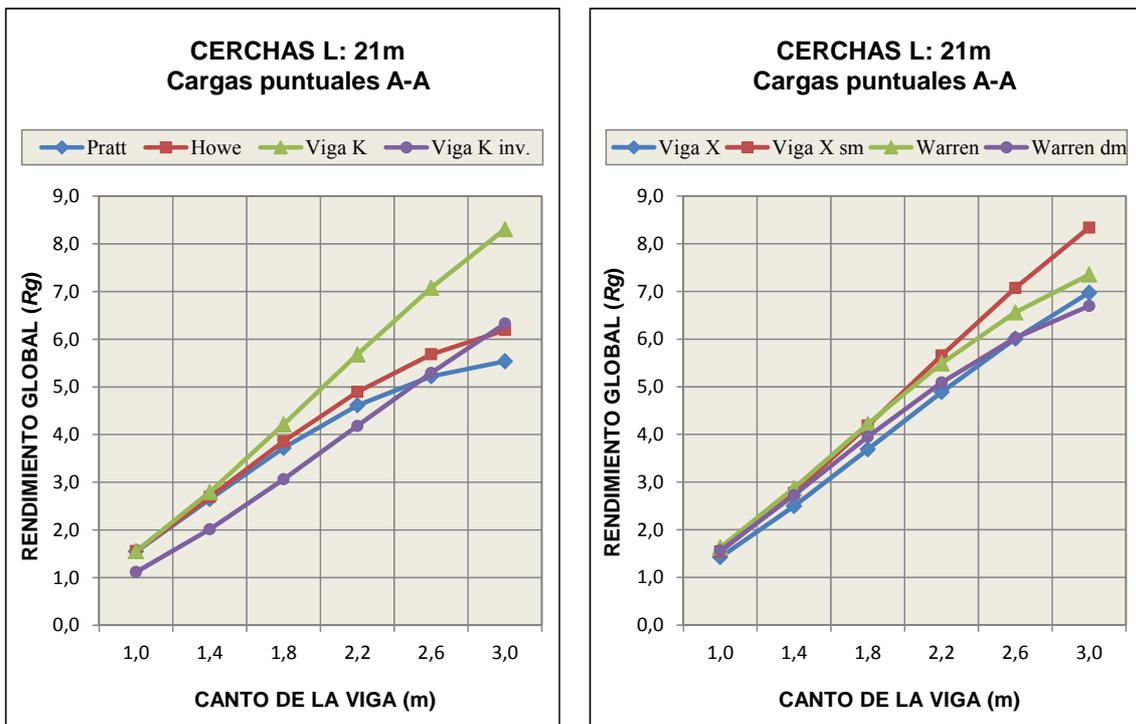


Figura 2.5-31. Rendimiento estudio 1. Resultados de 8 celosías (4+4) de 21.0 m biapoyadas para cargas puntuales en los nudos. Uniones articuladas A-A en las barras de relleno.

En las figuras 2.5-32 y 2.5-33, se presentan los resultados de rendimiento global obtenido en el primer estudio comparativo, igualando perfiles, para ocho tipologías de vigas de celosía biapoyadas, de 28.0 m y 35.0 m de luz entre apoyos. Se muestran los resultados para cargas puntuales en los nudos superiores, con las uniones articuladas A-A en los extremos de las barras de relleno.

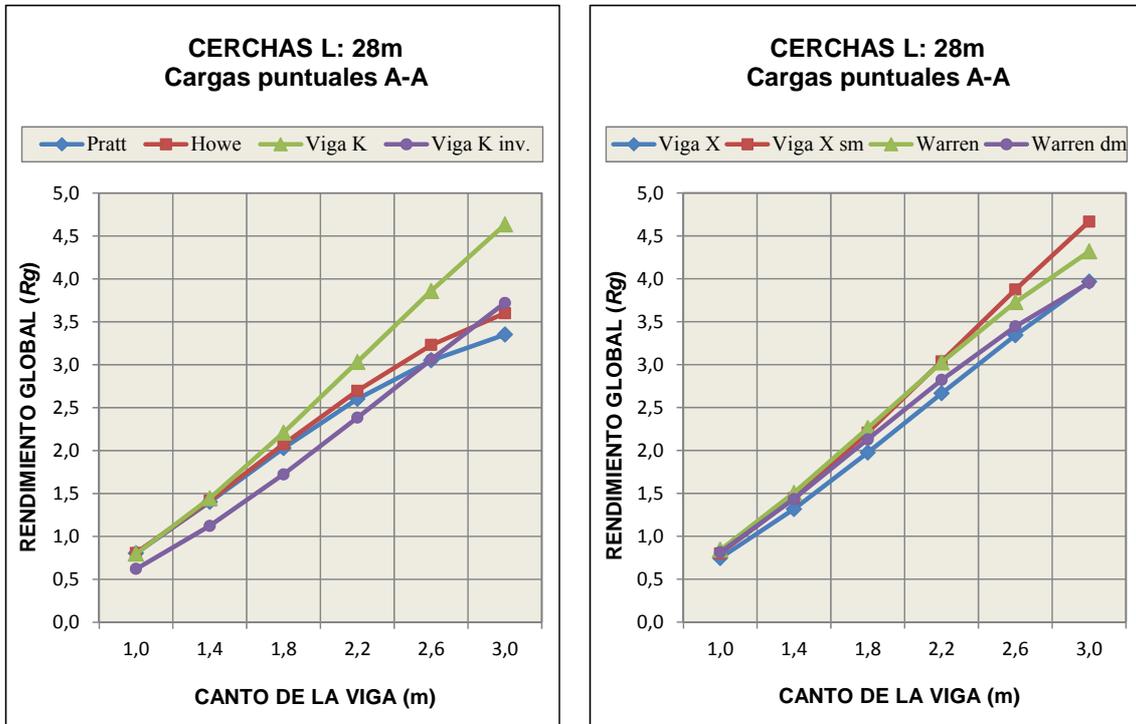


Figura 2.5-32. Rendimiento estudio 1. Resultados de 8 celosías (4+4) de 28.0 m biapoyadas para cargas puntuales en los nudos. Uniones articuladas A-A en las barras de relleno.

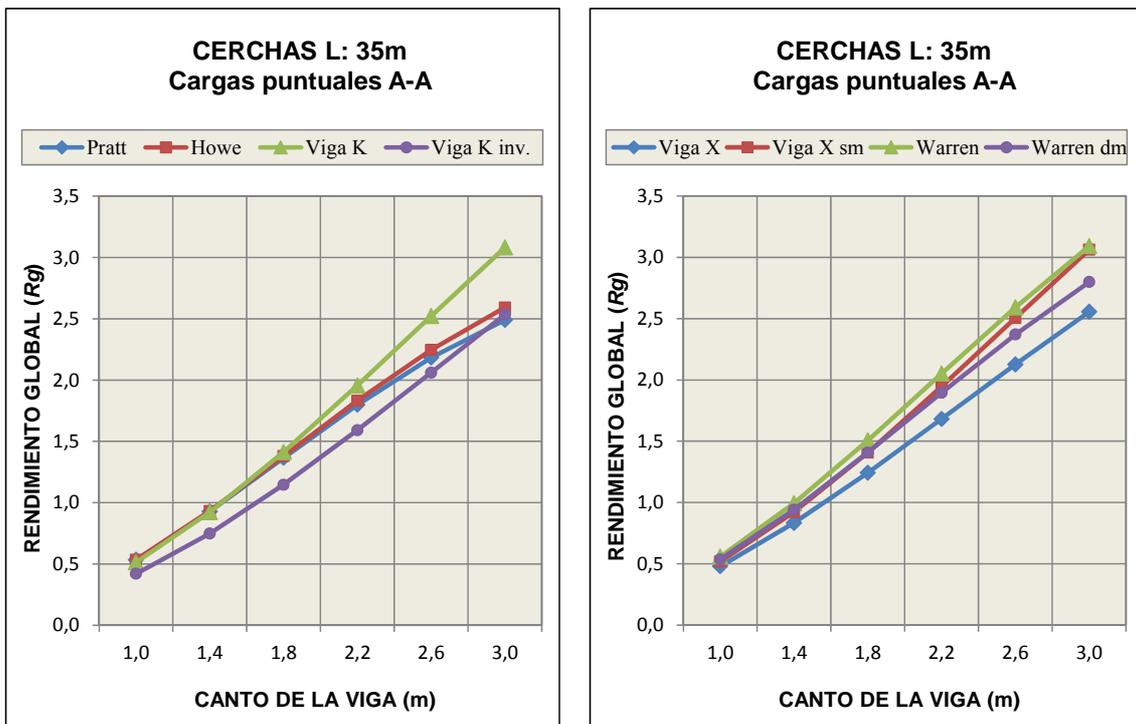
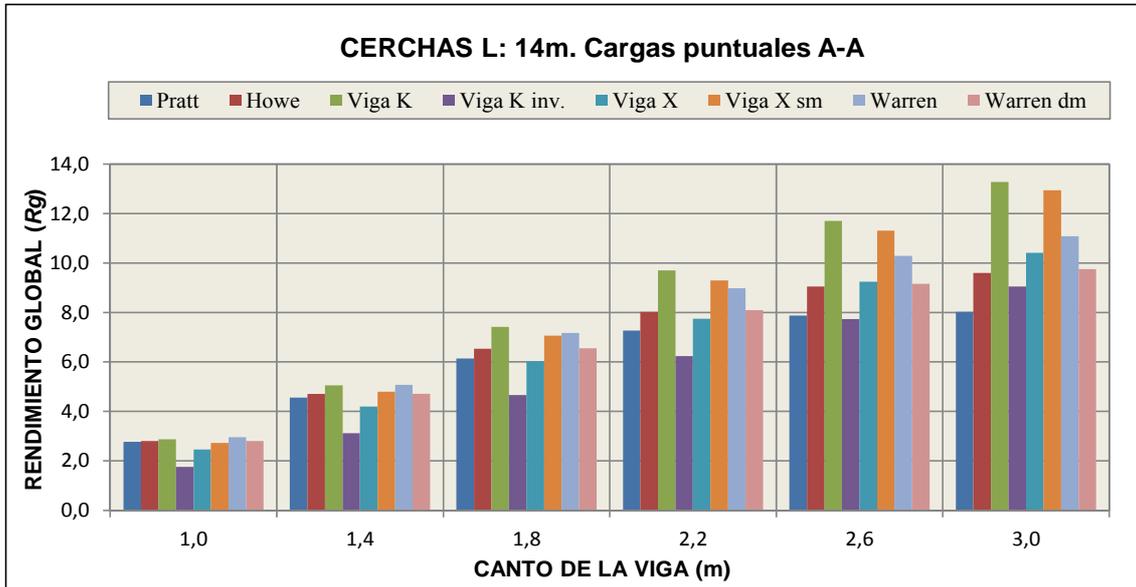


Figura 2.5-33. Rendimiento estudio 1. Resultados de 8 celosías (4+4) de 35.0 m biapoyadas para cargas puntuales en los nudos. Uniones articuladas A-A en las barras de relleno.

En las figuras 2.5-34 y 2.5-35 se presentan todos los resultados R_g del primer estudio comparativo, igualando perfiles. En concreto, se muestran las ocho tipologías de vigas de celosía biapoyadas, de 14.0 m y 21.0 m de luz entre apoyos para cargas puntuales y uniones articuladas A-A en los extremos de las barras de relleno. La tabla 2.5-5 corresponde a los resultados para las celosías de H: 1.8 m.



L: 14.0 m	Flecha	Cord.	C-150x150x5mm			Diag.	C-125x125x5mm			Peso		
H: 1.8 m	cm	m	cm ²	kg/ml	kN	m	cm ²	kg/ml	kN	KN	f/f_{total}	R_g
Pratt	2,641	28,00	29,0	22,31	6,25	36,28	24,0	18,46	6,70	12,95	13,84%	6,142
Howe	2,484	28,00	29,0	22,31	6,25	36,28	24,0	18,46	6,70	12,95	13,01%	6,530
Viga K	1,881	28,00	29,0	22,31	6,25	47,69	24,0	18,46	8,80	15,05	9,86%	7,418
Viga K inv.	2,993	28,00	29,0	22,31	6,25	47,69	24,0	18,46	8,80	15,05	15,68%	4,662
Viga X	2,093	28,00	29,0	22,31	6,25	56,37	24,0	18,46	10,41	16,65	10,97%	6,025
Viga X sm	2,073	28,00	29,0	22,31	6,25	43,77	24,0	18,46	8,08	14,33	10,86%	7,070
Warren	2,449	28,00	29,0	22,31	6,25	30,88	24,0	18,46	5,70	11,95	12,83%	7,176
Warren dm	2,472	28,00	29,0	22,31	6,25	36,28	24,0	18,46	6,70	12,95	12,95%	6,562

Figura 2.5-34. Rendimiento estudio 1. Resultados de ocho celosías de 14.0 m biapoyadas. En la tabla 2.5-5 se muestran los resultados para las celosías de H: 1.8 m.

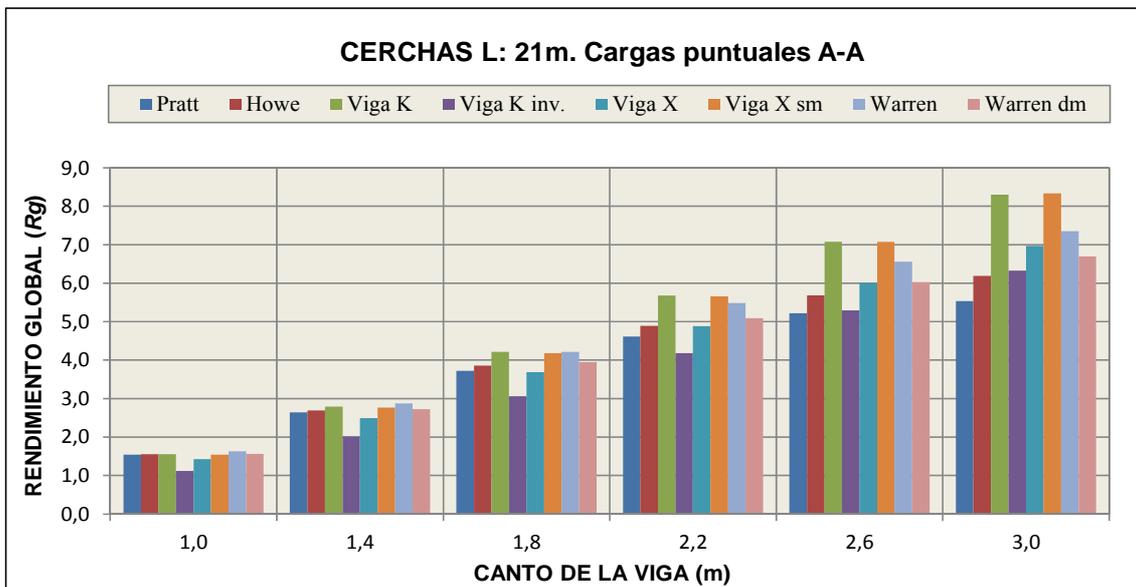
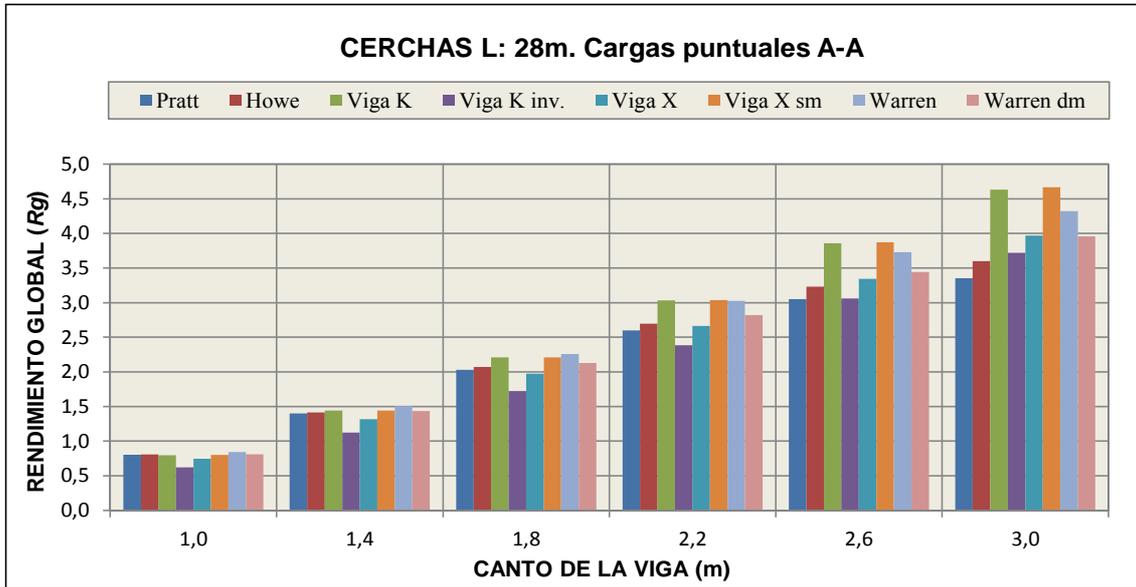


Figura 2.5-35. Rendimiento estudio 1. Resultados de ocho celosías de 21.0 m biapoyadas.

En las figuras 2.5-36 y 2.5.37 se presentan todos los resultados R_g del primer estudio comparativo, igualando perfiles. En concreto, se muestran las ocho tipologías de vigas de celosía biapoyadas, de 28.0 m y 35.0 m de luz entre apoyos para cargas puntuales y uniones articuladas A-A en los extremos de las barras de relleno. La tabla 2.5-6 corresponde a los resultados para las celosías de H: 2.2 m.



L: 28.0 m	Flecha	Cord.	C-260x260x14,2			Diag.	C-200x200x6mm			Peso		
H: 2.2 m	cm	m	cm ²	kg/ml	kN	m	cm ²	kg/ml	kN	KN	f/f_{total}	R_g
Pratt	6,005	56,00	140	107,4	60,15	82,39	46,6	35,82	29,51	89,65	13,80%	2,600
Howe	5,792	56,00	140	107,4	60,15	82,39	46,6	35,82	29,51	89,65	13,31%	2,696
Viga K	4,749	56,00	140	107,4	60,15	103,5	46,6	35,82	37,09	97,24	10,92%	3,037
Viga K inv.	6,044	56,00	140	107,4	60,15	103,5	46,6	35,82	37,09	97,24	13,89%	2,382
Viga X	4,967	56,00	140	107,4	60,15	127,4	46,6	35,82	45,62	105,8	11,42%	2,665
Viga X sm	4,907	56,00	140	107,4	60,15	94,36	46,6	35,82	33,80	93,94	11,28%	3,032
Warren	5,503	56,00	140	107,4	60,15	66,98	46,6	35,82	23,99	84,14	12,65%	3,024
Warren dm	5,536	56,00	140	107,4	60,15	82,38	46,6	35,82	29,51	89,65	12,73%	2,821

Figura 2.5-36. Rendimiento estudio 1. Resultados de ocho celosías de 28.0 m biapoyadas. En la tabla 2.5-6 se muestran los resultados para las celosías de H: 2.2 m.

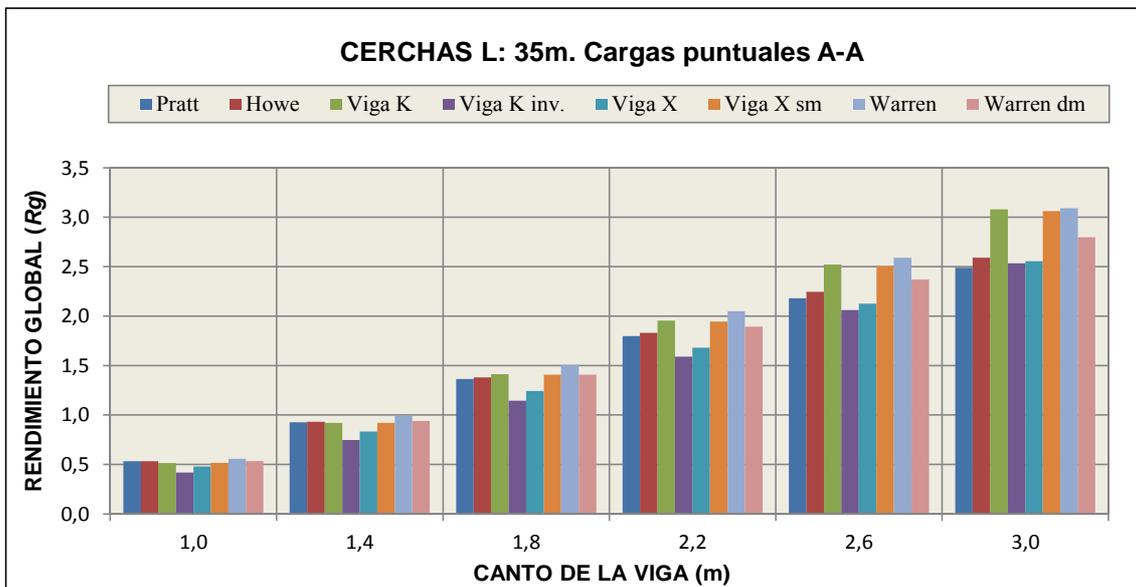


Figura 2.5-37. Rendimiento estudio 1. Resultados de ocho celosías de 35.0 m biapoyadas.

En las figuras 2.5-38 y 2.5-39, se presentan los resultados de rendimiento global obtenido en el primer estudio comparativo, igualando perfiles, para ocho tipologías de vigas de celosía con un voladizo de 7.0 m y 10.5 m de longitud. Se muestran los resultados para cargas puntuales en los nudos superiores, con las uniones articuladas A-A en los extremos de las barras de relleno.

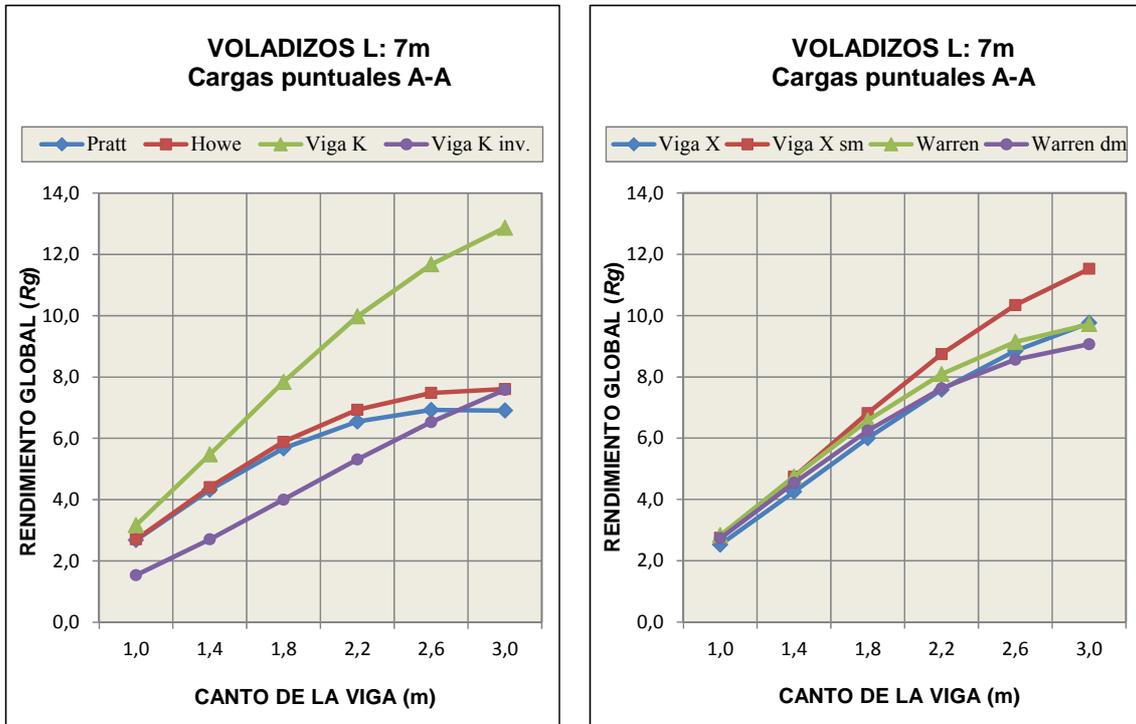


Figura 2.5-38. Rendimiento estudio 1. Resultados de 8 celosías (4+4) de 7.0 m en voladizo para cargas puntuales en los nudos. Uniones articuladas A-A en las barras de relleno.

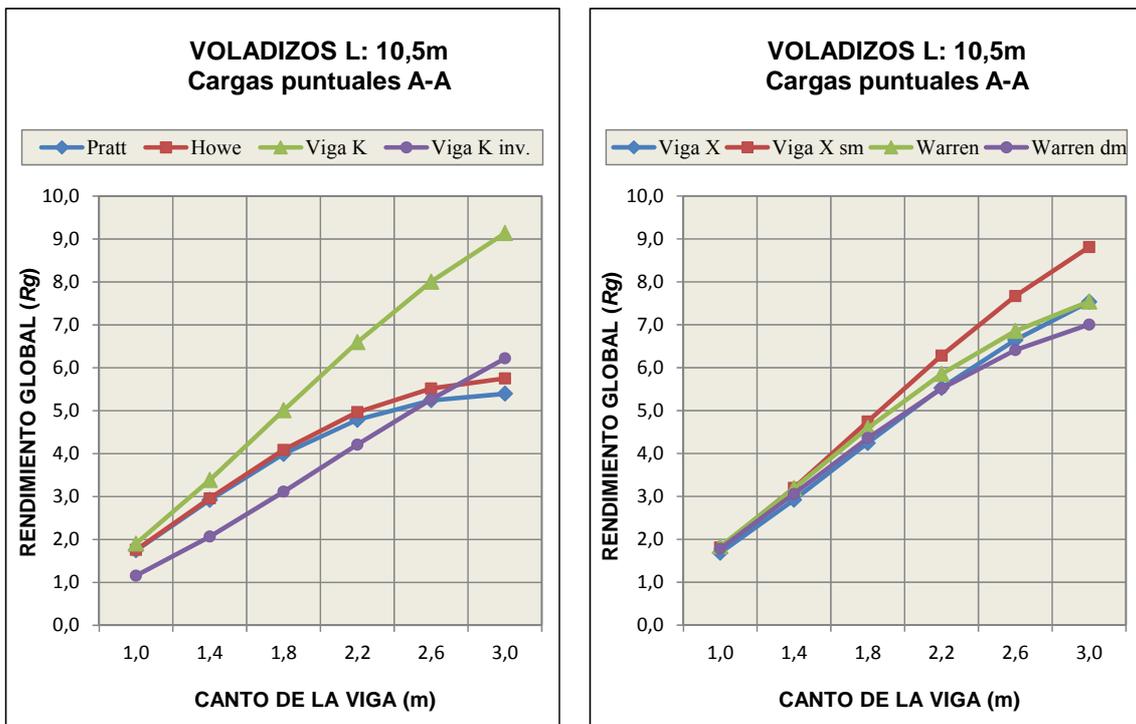


Figura 2.5-39. Rendimiento estudio 1. Resultados de 8 celosías (4+4) de 10.5 m en voladizo para cargas puntuales en los nudos. Uniones articuladas A-A en las barras de relleno.

En las figuras 2.5-40 y 2.5-41 se presentan los resultados de rendimiento global obtenido en el primer estudio comparativo, igualando perfiles, para ocho tipologías de vigas de celosía con un voladizo de 14.0 m y 17.5 m de longitud. Se muestran los resultados para cargas puntuales en los nudos superiores, con las uniones articuladas A-A en los extremos de las barras de relleno.

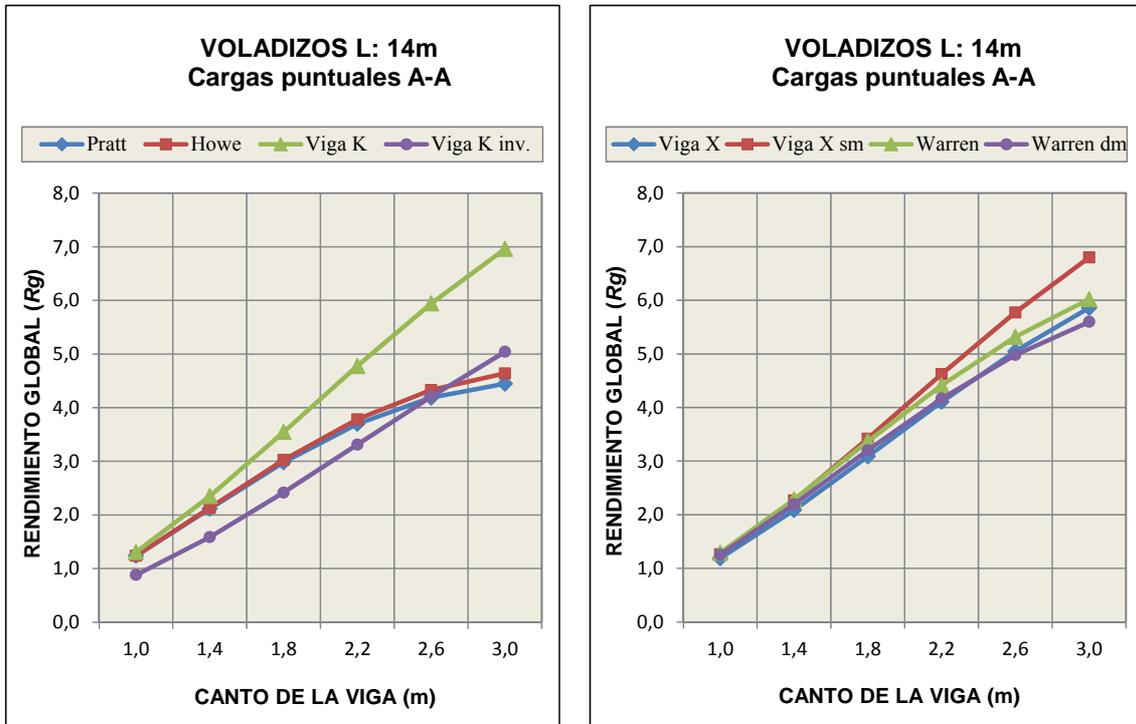


Figura 2.5-40. Rendimiento estudio 1. Resultados de 8 celosías (4+4) de 14.0 m en voladizo para cargas puntuales en los nudos. Uniones articuladas A-A en las barras de relleno.

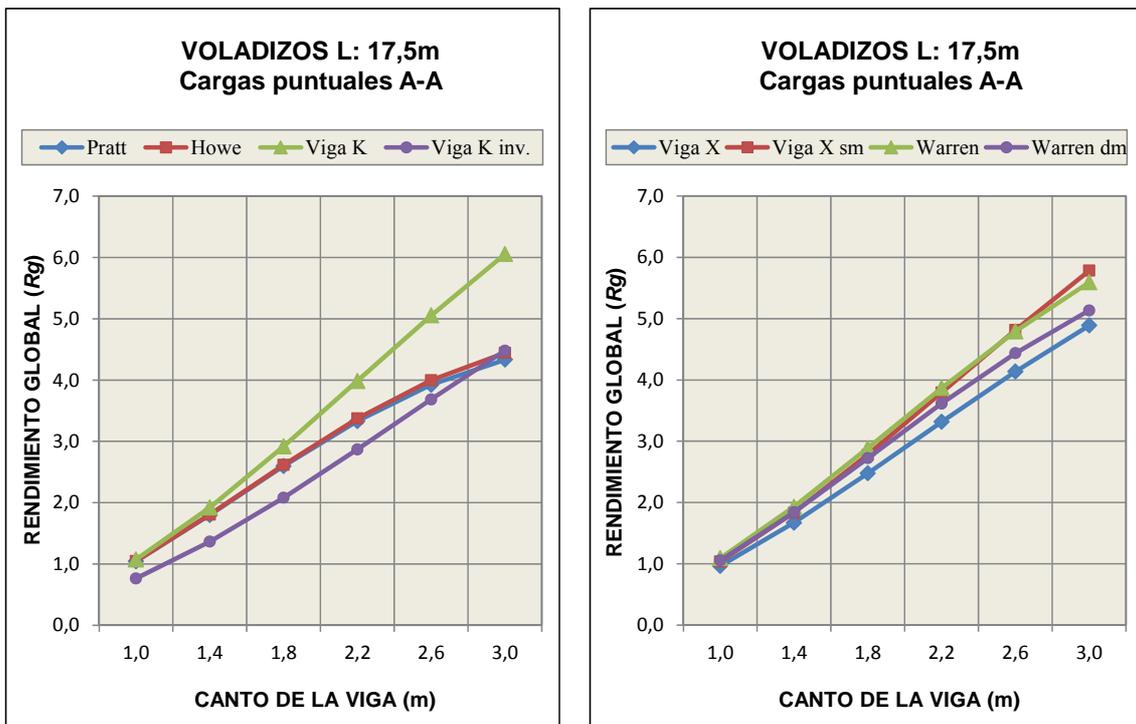
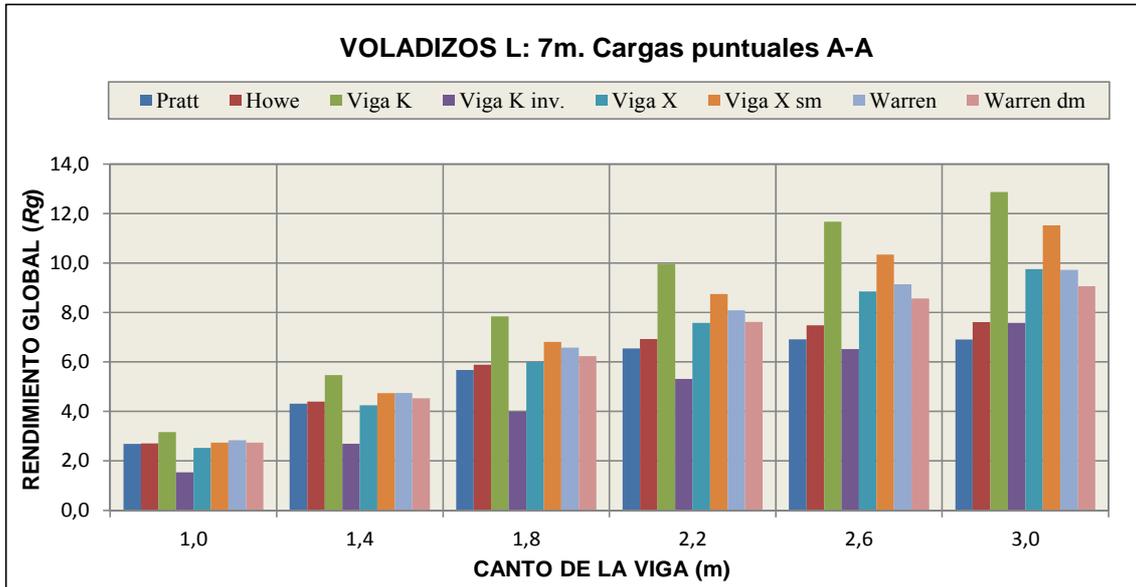


Figura 2.5-41. Rendimiento estudio 1. Resultados de 8 celosías (4+4) de 17.5 m en voladizo para cargas puntuales en los nudos. Uniones articuladas A-A en las barras de relleno.

En las figuras 2.5-42 y 2.5-43 se presentan todos los resultados R_g del primer estudio comparativo, igualando perfiles. En concreto, se muestran las ocho tipologías de vigas de celosía con un voladizo de 7.0 m y 10.5 m de longitud para cargas puntuales y uniones articuladas A-A en los extremos de las barras de relleno. La tabla 2.5-7 corresponde a los resultados para las celosías de H: 1.8 m.



Lv: 7.0 m	Flecha	Cord.	C-150x150x5mm			Diag.	C-125x125x5mm			Peso		
H: 1.8 m	cm	m	cm ²	kg/ml	kN	m	cm ²	kg/ml	kN	KN	f/f_{total}	R_g
Pratt	1,859	14,00	29,0	22,31	3,12	19,04	24,0	18,46	3,52	6,64	14,08%	5,672
Howe	1,792	14,00	29,0	22,31	3,12	19,04	24,0	18,46	3,52	6,64	13,57%	5,884
Viga K	1,161	14,00	29,0	22,31	3,12	24,74	24,0	18,46	4,57	7,69	8,79%	7,839
Viga K inv.	2,276	14,00	29,0	22,31	3,12	24,74	24,0	18,46	4,57	7,69	17,23%	3,999
Viga X	1,370	14,00	29,0	22,31	3,12	29,08	24,0	18,46	5,37	8,49	10,40%	6,003
Viga X sm	1,370	14,00	29,0	22,31	3,12	23,68	24,0	18,46	4,37	7,50	10,37%	6,816
Warren	1,687	14,00	29,0	22,31	3,12	17,24	24,0	18,46	3,18	6,31	12,77%	6,579
Warren dm	1,689	14,00	29,0	22,31	3,12	19,04	24,0	18,46	3,52	6,64	12,79%	6,242

Figura 2.5-42. Rendimiento estudio 1. Resultados de ocho celosías de 7.0 m en voladizo. En la tabla 2.5-7 se muestran los resultados para las celosías de H: 1.8 m.

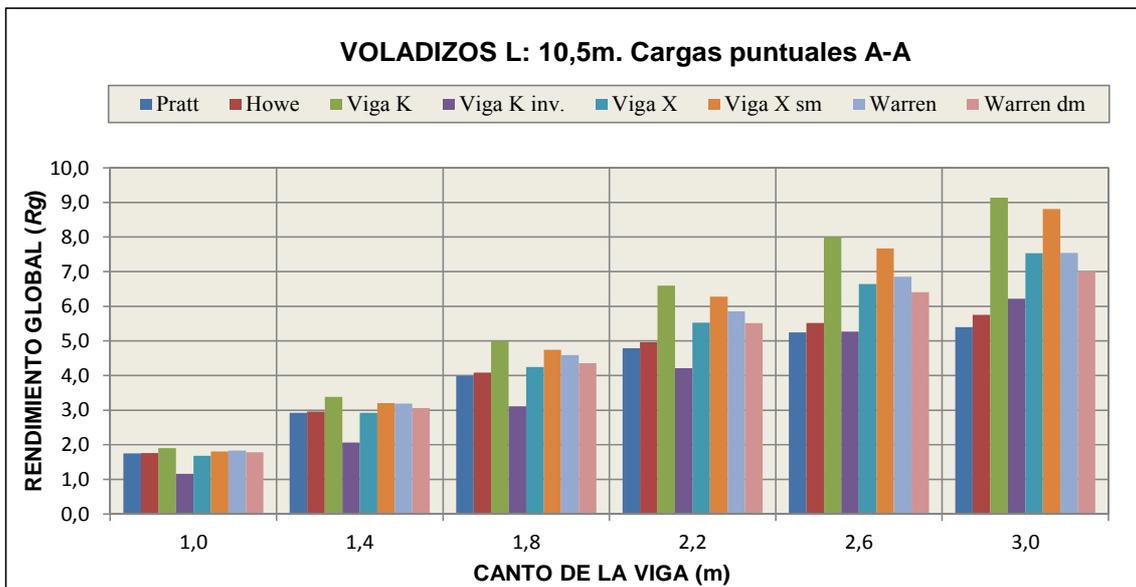
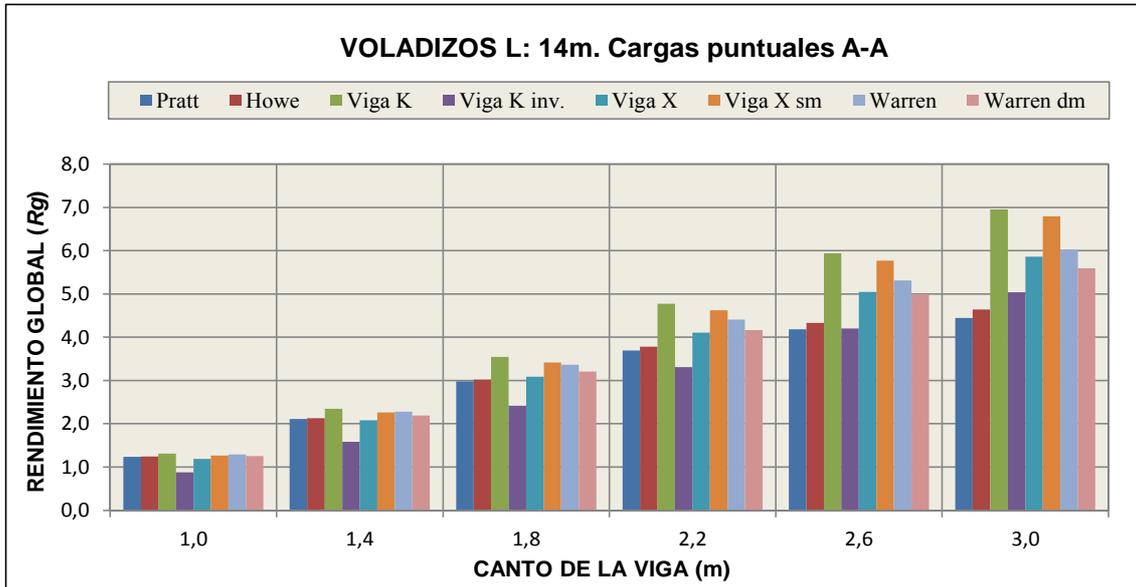


Figura 2.5-43. Rendimiento estudio 1. Resultados de ocho celosías de 10.5 m en voladizo.

En las figuras 2.5-44 y 2.5-45 se presentan todos los resultados R_g del primer estudio comparativo, igualando perfiles. En concreto, se muestran las ocho tipologías de vigas de celosía con un voladizo de 14.0 m y 17.5 m de longitud para cargas puntuales y uniones articuladas A-A en los extremos de las barras de relleno. La tabla 2.5-8 corresponde a los resultados para las celosías de H: 2.2 m.



Lv: 14 m	Flecha	Cord.	C-200x200x10mm			Diag.	C-175x175x5mm			Peso		
H: 2.2 m	cm	m	cm ²	kg/ml	kN	m	cm ²	kg/ml	kN	KN	f/f_{total}	R_g
Pratt	4,190	28,00	140	107,4	30,07	42,29	46,6	35,82	15,15	45,22	14,26%	3,694
Howe	4,093	27,00	140	107,4	30,07	42,29	46,6	35,82	15,15	45,22	13,93%	3,782
Viga K	2,991	28,00	140	107,4	30,07	52,87	46,6	35,82	18,94	49,01	10,18%	4,775
Viga K inv.	4,313	28,00	140	107,4	30,07	52,87	46,6	35,82	18,94	49,01	14,68%	3,311
Viga X	3,202	28,00	140	107,4	30,07	64,78	46,6	35,82	23,20	53,28	10,90%	4,103
Viga X sm	3,171	28,00	140	107,4	30,07	49,38	46,6	35,82	17,69	47,76	10,79%	4,622
Warren	3,702	28,00	140	107,4	30,07	35,69	46,6	35,82	12,78	42,86	12,60%	4,412
Warren dm	3,717	28,00	140	107,4	30,07	42,29	46,6	35,82	15,15	45,22	12,65%	4,165

Figura 2.5-44. Rendimiento estudio 1. Resultados de ocho celosías de 14.0 m en voladizo. En la tabla 2.5-8, se muestran los resultados para las celosías de H: 2.2 m.

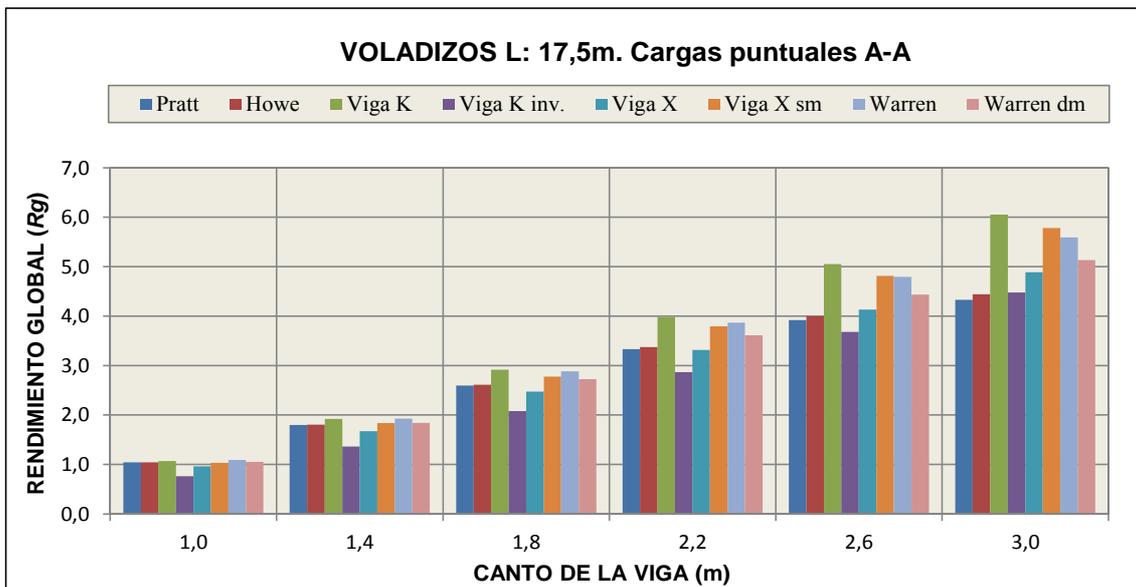


Figura 2.5-45. Rendimiento estudio 1. Resultados de ocho celosías de 17.5 m en voladizo.

2.5.2.1 *Conclusiones estudio comparativo final 1*

De acuerdo a los resultados del primer estudio comparativo final, sobre el rendimiento global de ocho geometrías de vigas de celosía con cargas puntuales en los nudos del cordón superior y con uniones articuladas A-A en los extremos de las barras, se extraen las conclusiones que se describen a continuación:

1. En términos generales, los resultados obtenidos siguen la tendencia preponderante descrita en el estudio básico inicial para todas las luces y cantos estudiados:
 - Vigas biapoyadas para luces de 14.0, 21.0, 28.0 y 35.0 m y cantos entre 1.0 y 3.0 m.
 - Vigas en voladizo para luces de 7.0, 10.5, 14.0 y 17.5 m y cantos entre 1.0 y 3.0 m.
2. Es de sumo interés realzar los resultados obtenidos con las vigas “en K” y “en K invertida” que aportan una información altamente relevante. Para las vigas simplemente apoyadas en los extremos, como se muestra en la figura 2.5-46, la viga “en K” es la que ofrece el mejor rendimiento global en la mayoría los estudios comparativos realizados para distintos cantos y luces entre apoyos, mientras que la viga “en K invertida” es la que ofrece los resultados de menor rendimiento de entre todas las triangulaciones estudiadas.

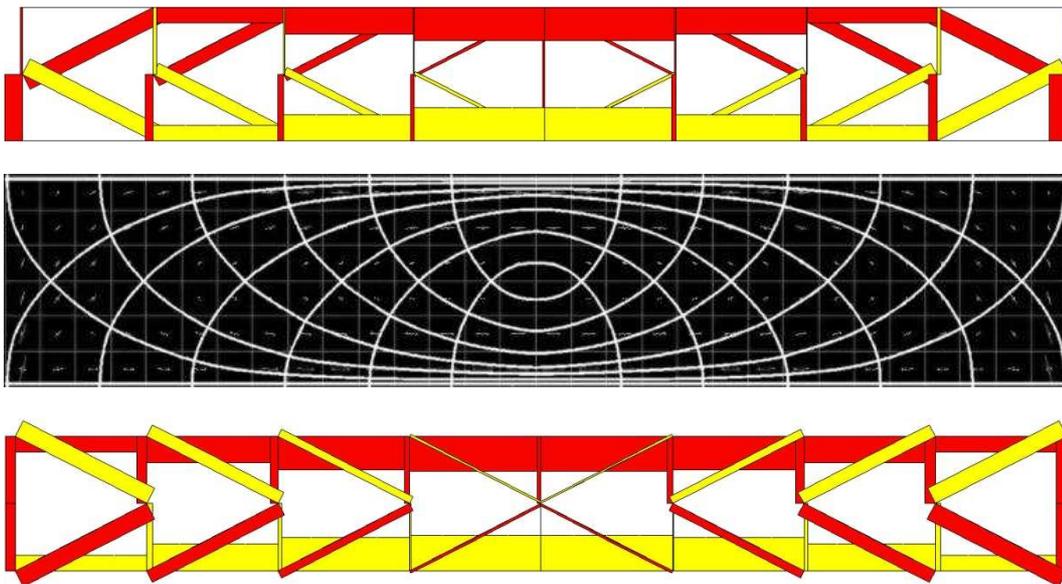


Figura 2.5-46. Diagramas de esfuerzos axiales de las vigas biapoyadas “en K” y “en K invertida”, así como el esquema de las líneas isostáticas de tensiones de una viga simplemente apoyada en los extremos, representado con \cap las líneas isostáticas de compresión y con \cup las líneas isostáticas de tracción. (Imágenes propias).

En el mismo sentido, si se analizan los resultados obtenidos con las vigas en voladizo, como se muestra en la figura 2.5-47, se mantienen los resultados, la viga “en K invertida” es la que tiene el menor rendimiento y es la viga “en K” la que ofrece los resultados de mayor rendimiento estructural global. Por consiguiente, se evidencia la influencia de la forma en el rendimiento estructural, tal y como se había avanzado previamente y ejemplificado con los estudios de Aurelio Muttoni (2011).

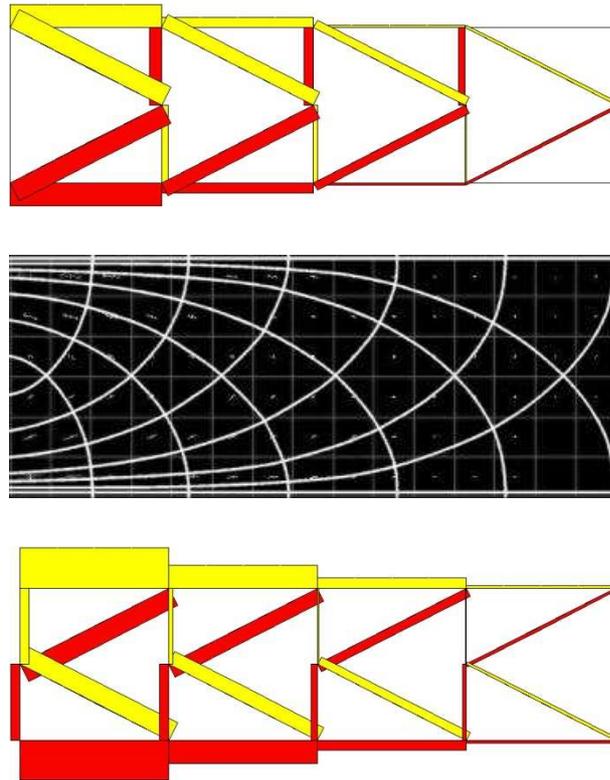


Figura 2.5-47. Diagramas de esfuerzos axiales de las vigas en voladizo “en K” y “en K invertida”, así como el esquema de las líneas isostáticas de tensiones de una viga en voladizo, representado con \cup las líneas isostáticas de compresión y con \cap las líneas isostáticas de tracción. (Imágenes propias).

Por lo tanto, las triangulaciones que orientan sus diagonales según las direcciones de las tensiones principales ofrecen los mejores resultados. De igual forma, las geometrías que difieren o se alejan de forma más evidente de la trayectoria de las líneas isostáticas del elemento resistente de alma llena equivalente, tienen claramente los resultados de menor rendimiento estructural.

3. Destacar que la viga “en X” sin montantes (viga “en X” sm) y la viga Warren también ofrecen rendimientos elevados comparándolos con el resto de celosías. En las vigas simplemente apoyadas de 35.0 metros de luz se observa que es la viga Warren la que ofrece, aunque por poco margen con respecto la viga “en K”, el mejor rendimiento estructural global.

Para el caso de la viga Warren, los resultados de elevado rendimiento son fruto de la ligereza que caracteriza dicha triangulación, mientras que en el caso de la viga “en X” sin montantes, se debe a la elevada rigidez que ofrece dicha geometría y al hecho indudable de que podría ser interpretada como una “doble viga Warren”. Añadir que en el caso de la viga “en X”, si se añaden montantes el incremento de rigidez no compensa el incremento de peso propio de la estructura, obteniéndose resultados de menor rendimiento para esta geometría con respecto a las vigas “en X” sin montantes.

4. En cuanto a las vigas Pratt y Howe, mencionar que sus rendimientos son muy parecidos quedando en los puestos intermedios de los estudios comparativos. La viga Howe ofrece resultados de rendimiento ligeramente inferiores al tener las diagonales (barras más largas) sometidas a esfuerzos de compresión.

2.5.3 Estudio comparativo final 2: peso propio celosías analizadas para una misma limitación de deformación

En el presente estudio comparativo, el segundo de los tres que se abordan, se analizan 512 modelos de vigas de celosía, en base a ocho tipos de triangulación, con el objeto de comparar el rendimiento estructural resistente R_r , de acuerdo a la expresión (2.4.20), de dichas celosías para una misma limitación de deformación según la normativa considerada.

De acuerdo a la limitación de deformación (flecha máxima), considerada en el presente estudio, se plantean dos estadios posibles de análisis que se exponen y se estudian a continuación. Dado que se parte de la hipótesis de igualdad de deformaciones, y que las luces de las vigas de celosía son las mismas para cada estudio comparativo, es suficiente utilizar el rendimiento resistente previamente mencionado.

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:

- Ocho triangulaciones o geometrías de celosía distintas. Se analizan la viga Pratt, la viga Howe, la viga “en K”, la viga “en K invertida”, la viga “en X”, la viga “en X” sin montantes, la viga Warren con montantes intercalados y la viga Warren con doble montante.
- Armaduras apoyadas en los extremos y celosías en voladizo.
- Cuatro luces consideradas:

Celosías biapoyadas: 14.0 m, 21.0 m, 28.0 m y 35.0 m.

Celosías en voladizo: 7.0 m, 10.5 m, 14.0 m, y 17.5 m.

- Cargas puntuales/distribuidas en el cordón superior.
- Uniones articuladas A-A en los extremos de las barras de relleno.
- Limitación de deformación de acuerdo a la normativa:

Tipo de estructura	Valor flecha/luz
Vigas en celosía con apoyos en los extremos	1/500
Vigas en celosía en voladizo	1/300

De acuerdo a los parámetros de diseño, y para una misma limitación de deformación de acuerdo a las bases de cálculo definidas anteriormente, se definen dos posibles estadios u opciones de análisis:

1. La primera opción de análisis posible consiste en determinar la carga máxima Q , que puede soportar cada una de las celosías de acuerdo para ELS de servicio atendiendo a la normativa utilizada y dimensionado correcto para ELU. Se analizan 384 modelos, de los cuales, 192 corresponden a vigas de celosía biapoyadas y 192 a vigas de celosía en voladizo, de acuerdo a los siguientes criterios y cantos de las celosías:
 - Se predimensionan las barras de acuerdo a las bases de cálculo conforme a las dimensiones (luz y canto) de cada caso, según las cargas definidas en las bases de cálculo.

- Todos los perfiles de los cordones y todos los perfiles de las barras de relleno, son de la misma sección.
 - Canto de la celosía. Se analizan seis cantos distintos de viga, H: 1.0, 1.4, 1.8, 2.2, 2.6 y 3.0 m.
2. La segunda opción se plantea con el mismo fin, rendimiento resistente R_r , de acuerdo a la expresión (2.4.20), para una misma limitación de deformación atendiendo a la normativa. Se analizan 128 casos, de los cuales 64 corresponden a vigas de celosía biapoyadas y 64 a vigas de celosía en voladizo, en este caso variando el grosor de los cordones para obtener la flecha admisible para un mismo estado de carga.

Dos cantos distintos entre 1.0-3.0 m según la luz de cada celosía analizada:

Viga biapoyada de 14.0 m:	1.4 y 1.6 m
Viga biapoyada de 21.0 m:	1.8 y 2.0 m
Viga biapoyada de 28.0 m:	2.2 y 2.4 m
Viga biapoyada de 35.0 m:	2.6 y 2.8 m
Viga en voladizo de 7.00 m:	1.2 y 1.4 m
Viga en voladizo de 10.5 m:	1.6 y 1.8 m
Viga en voladizo de 14.0 m:	2.0 y 2.2 m
Viga en voladizo de 17.5 m:	2.4 y 2.6 m

La carga aplicada en los nudos del cordón superior será la misma para todos los casos analizados, cambiando únicamente el peso propio de las celosías de acuerdo a la geometría de éstas, así como las dimensiones y los espesores de los perfiles de las barras que se definirán, en cada caso, para la obtención de la flecha admisible en base a los siguientes criterios de dimensionado:

- Se predimensionan las barras de acuerdo a las dimensiones de cada caso (luz y canto). Las barras de relleno serán una constante para todas las tipologías de un mismo canto, y se modificará el espesor de los cordones de forma que obtengamos la flecha admisible para cada caso.
- Se dimensionan todas las barras eligiendo el perfil de mínimo peso, dentro de las serie europea de perfiles, que cumpla todas las condiciones de dimensionado para ELU y ELS.

Los valores de los espesores de los perfiles se han elegido tomando como referencia catálogos de fabricantes estándares europeos como puede ser Grupo Condesa o similar:

- Perfiles de 150x150 mm para un espesor mínimo de 3 mm y un espesor máximo de 12.5 mm.
- Perfiles de 200x200 mm para un espesor mínimo de 4 mm y un espesor máximo de 14.2 mm.
- Perfiles de 260x260 mm para un espesor mínimo de 4 mm y un espesor máximo de 16.0 mm.
- Perfiles de 350x350 mm para un espesor mínimo de 8 mm y un espesor máximo de 16.0 mm.

Aquellas geometrías que tengan un mal comportamiento estructural, y por ello requieran grosores fuera de lo estandarizado de acuerdo a los parámetros escogidos (geometrías de las celosías y predimensionado de los perfiles), se descartarán en el análisis final de «resistencia equivalente» (estudio comparativo final 3), analizando únicamente aquellas geometrías que han presentado un mejor rendimiento estructural. Para los perfiles de clase 4 como pueden ser C-150x3, C-260x6 o C-350x8, se han definido, con el programa CLASE, las características mecánicas de la sección eficaz (A_{eff} , I_{eff} y W_{eff}), como se muestra en las figuras 2.5-48, 2.5-49 y 2.5-50.

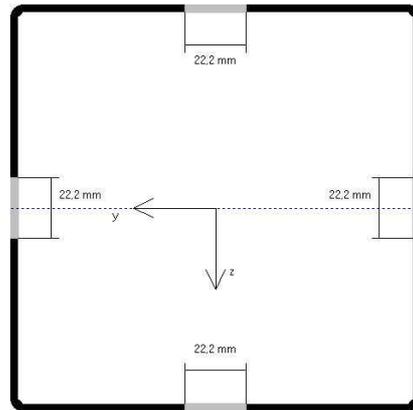
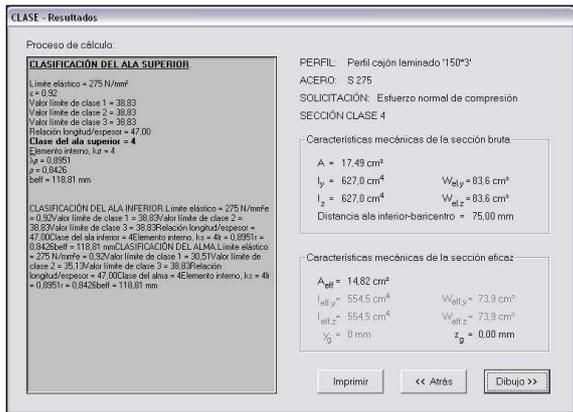


Figura 2.5-48. Clasificación y cálculo características mecánicas eficaces perfil C-150x3 mm según EUROCÓDIGO-3. (Imágenes tomadas del programa CLASE).

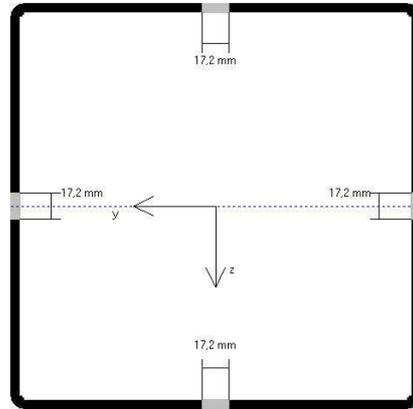
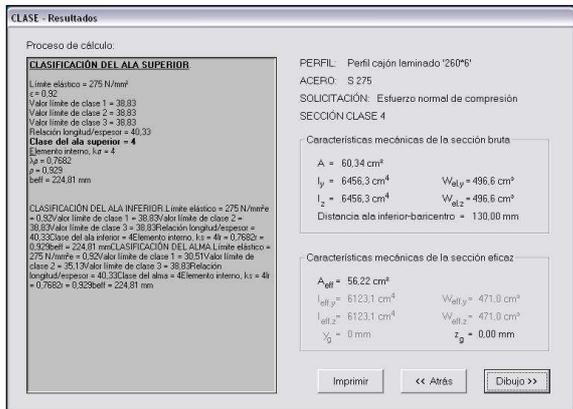


Figura 2.5-49. Clasificación y cálculo características mecánicas eficaces perfil C-260x6 mm según EUROCÓDIGO-3. (Imágenes tomadas del programa CLASE).

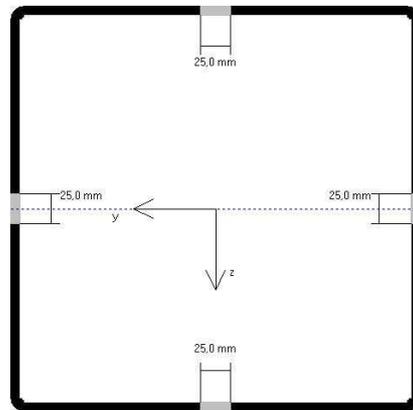
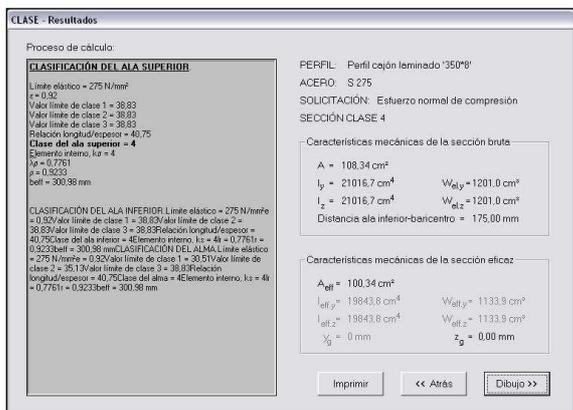


Figura 2.5-50. Clasificación y cálculo características mecánicas eficaces perfil C-350x8 mm según EUROCÓDIGO-3. (Imágenes tomadas del programa CLASE).

En las figuras 2.5-51 y 2.5-52, se presentan los resultados de rendimiento resistente obtenido en el segundo estudio comparativo, igualando deformaciones para distintos estados de carga, para ocho tipologías de vigas de celosía biapoyadas, de 14.0 m y 21.0 m de luz entre apoyos. Se muestran los resultados para cargas distribuidas en el cordón superior, con las uniones articuladas A-A en los extremos de las barras de relleno.

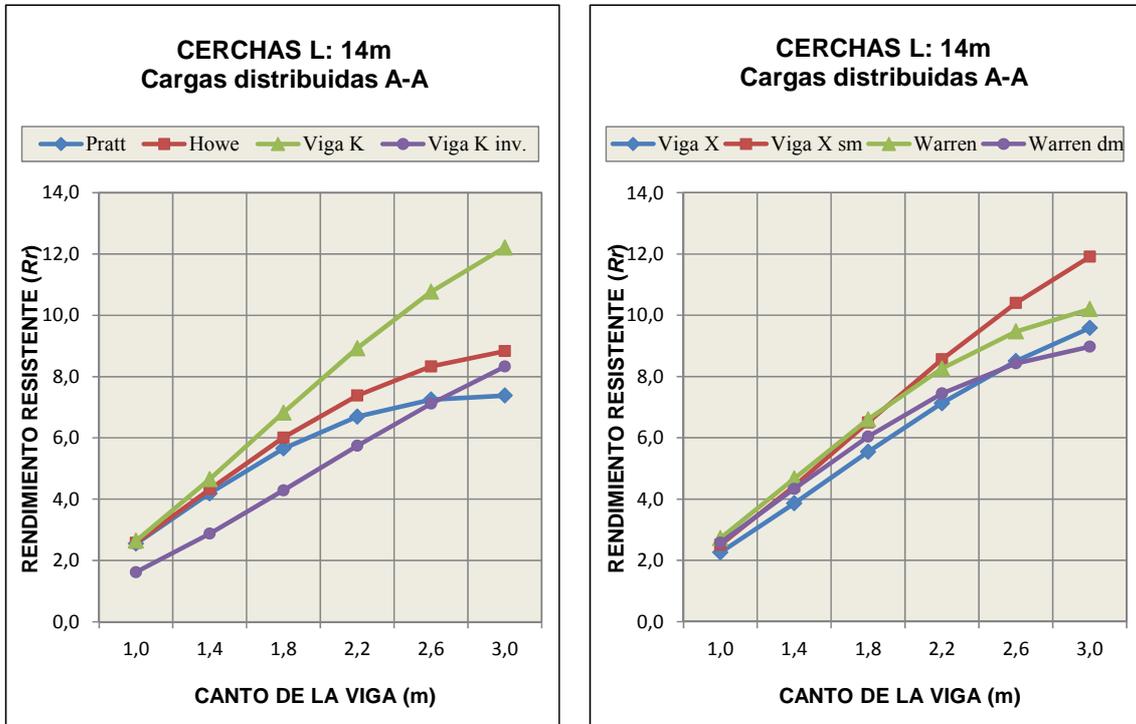


Figura 2.5-51. Rendimiento estudio 2, de 8 celosías (4+4) de 14.0 m biapoyadas para distintas cargas distribuidas en el cordón superior. Uniones articuladas A-A en las barras.

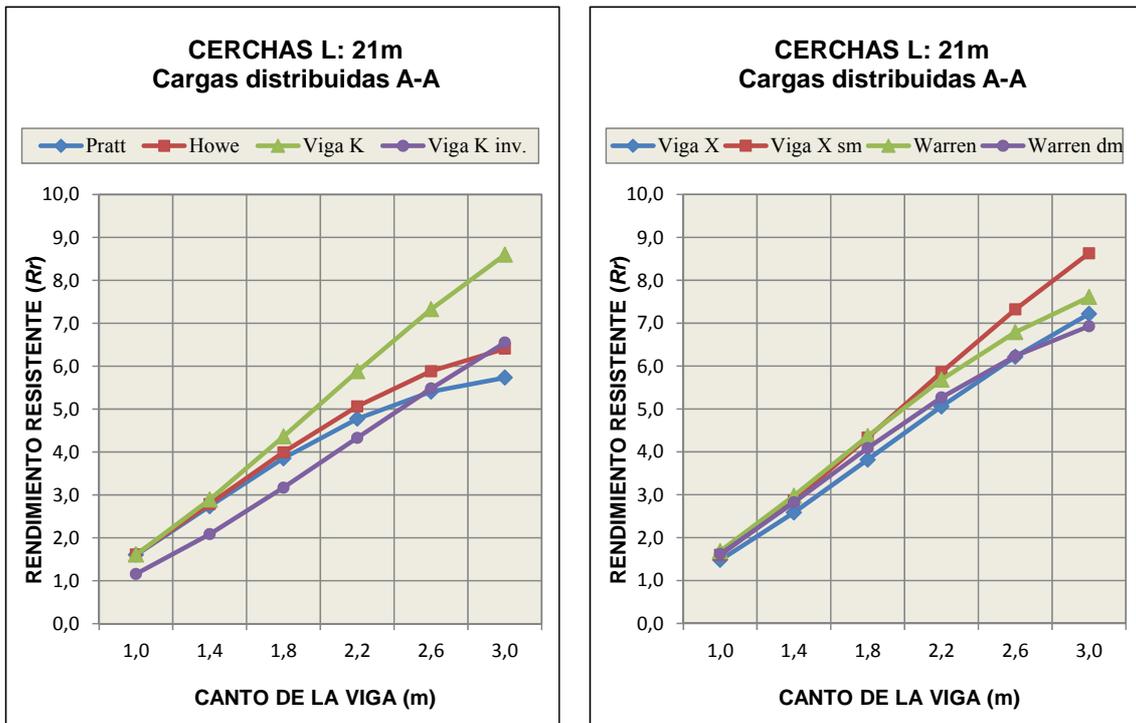


Figura 2.5-52. Rendimiento estudio 2, de 8 celosías (4+4) de 21.0 m biapoyadas para distintas cargas distribuidas en el cordón superior. Uniones articuladas A-A en las barras.

En las figuras 2.5-53 y 2.5-54, se presentan los resultados de rendimiento resistente obtenido en el segundo estudio comparativo, igualando deformaciones para distintos estados de carga, para ocho tipologías de vigas de celosía biapoyadas, de 28.0 m y 35.0 m de luz entre apoyos. Se muestran los resultados para cargas distribuidas en el cordón superior, con las uniones articuladas A-A en los extremos de las barras de relleno.

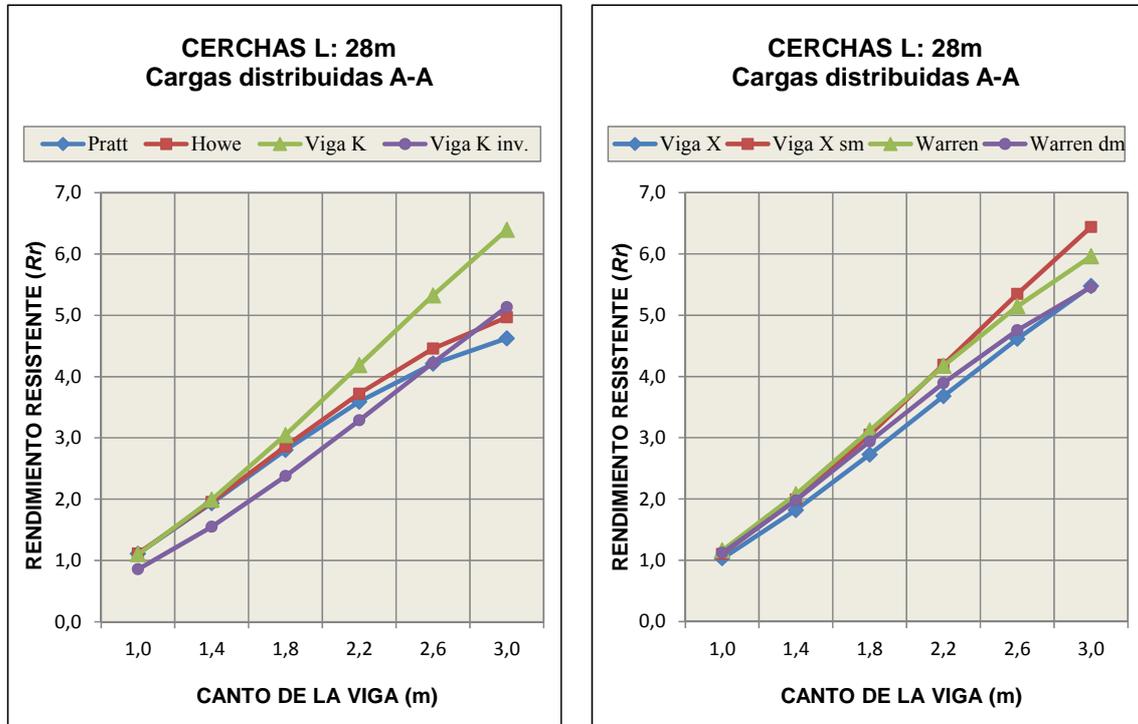


Figura 2.5-53. Rendimiento estudio 2, de 8 celosías (4+4) de 28.0 m biapoyadas para distintas cargas distribuidas en el cordón superior. Uniones articuladas A-A en las barras.

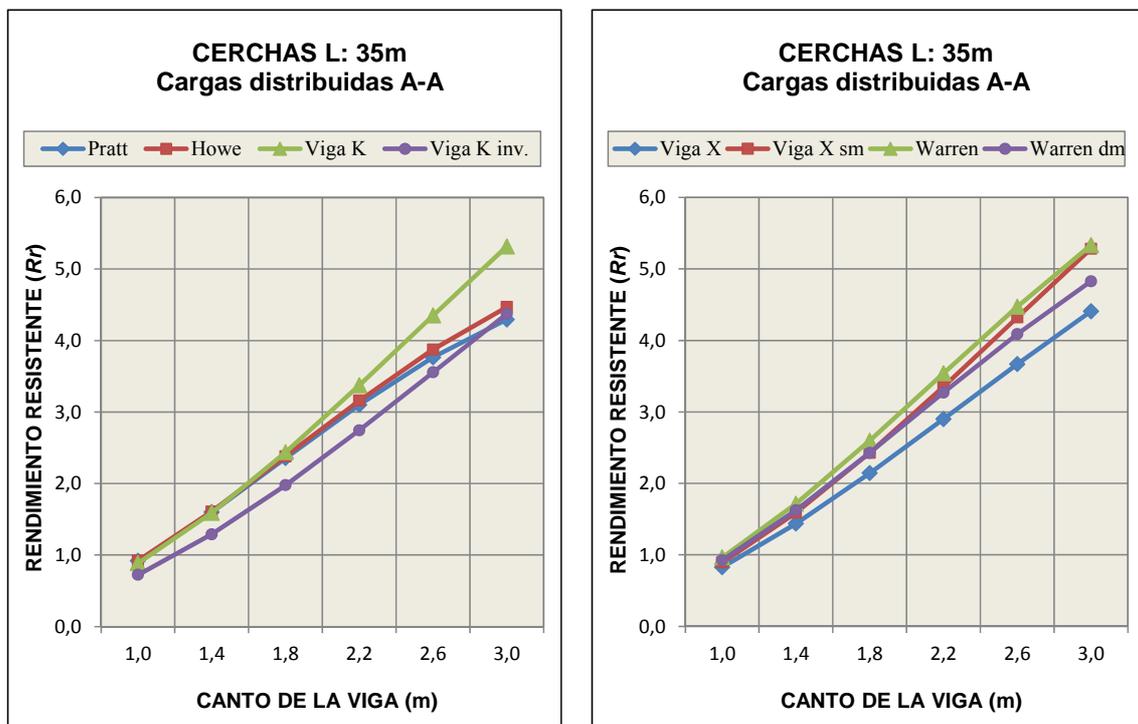
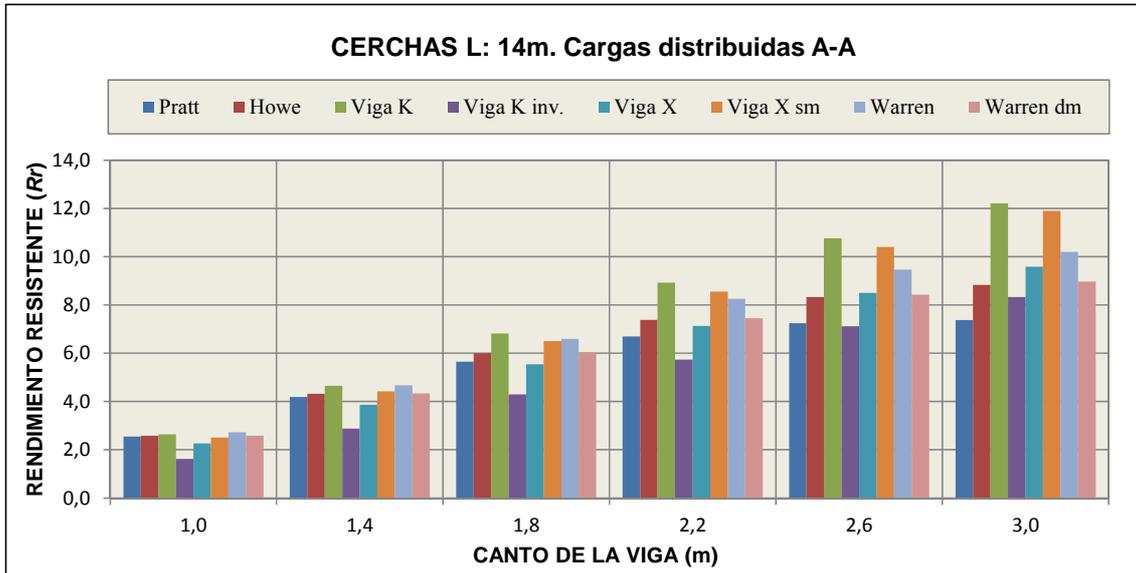


Figura 2.5-54. Rendimiento estudio 2, de 8 celosías (4+4) de 35.0 m biapoyadas para distintas cargas distribuidas en el cordón superior. Uniones articuladas A-A en las barras.

En las figuras 2.5-55 y 2.5.56 se presentan todos los resultados R_r del segundo estudio comparativo, igualando deformaciones para distintos estados de carga. En concreto, se muestran las ocho celosías, biapoyadas, de 14.0 m y 21.0 m de luz para cargas distribuidas y uniones articuladas A-A en los extremos de las barras de relleno. La tabla 2.5-9 corresponde a los resultados para las celosías de H: 1.8 m.



L: 14.0 m	Flecha	Cord.	C-150x150x5mm			Diag.	C-125x125x5mm			Peso	Q total	
H: 1.8 m	cm	m	cm ²	kg/ml	kN	m	cm ²	kg/ml	KN	KN	KN/ml	R_r
Pratt	2,800	28,00	29,0	22,31	6,25	36,28	24,0	18,46	6,70	12,95	36,577	5,651
Howe	2,800	28,00	29,0	22,31	6,25	36,28	24,0	18,46	6,70	12,95	38,889	6,008
Viga K	2,800	28,00	29,0	22,31	6,25	47,69	24,0	18,46	8,80	15,05	51,356	6,824
Viga K inv.	2,800	28,00	29,0	22,31	6,25	47,69	24,0	18,46	8,80	15,05	32,275	4,289
Viga X	2,800	28,00	29,0	22,31	6,25	56,37	24,0	18,46	10,41	16,65	46,154	5,543
Viga X sm	2,800	28,00	29,0	22,31	6,25	43,77	24,0	18,46	8,08	14,33	46,599	6,505
Warren	2,800	28,00	29,0	22,31	6,25	30,88	24,0	18,46	5,70	11,95	39,445	6,602
Warren dm	2,800	28,00	29,0	22,31	6,25	36,28	24,0	18,46	6,70	12,95	39,078	6,037

Figura 2.5-55. Rendimiento estudio 2. Resultados de 8 celosías de 14.0 m biapoyadas para distintos estados de cargas. La tabla 2.5-9 corresponde a los resultados de H: 1.8 m.

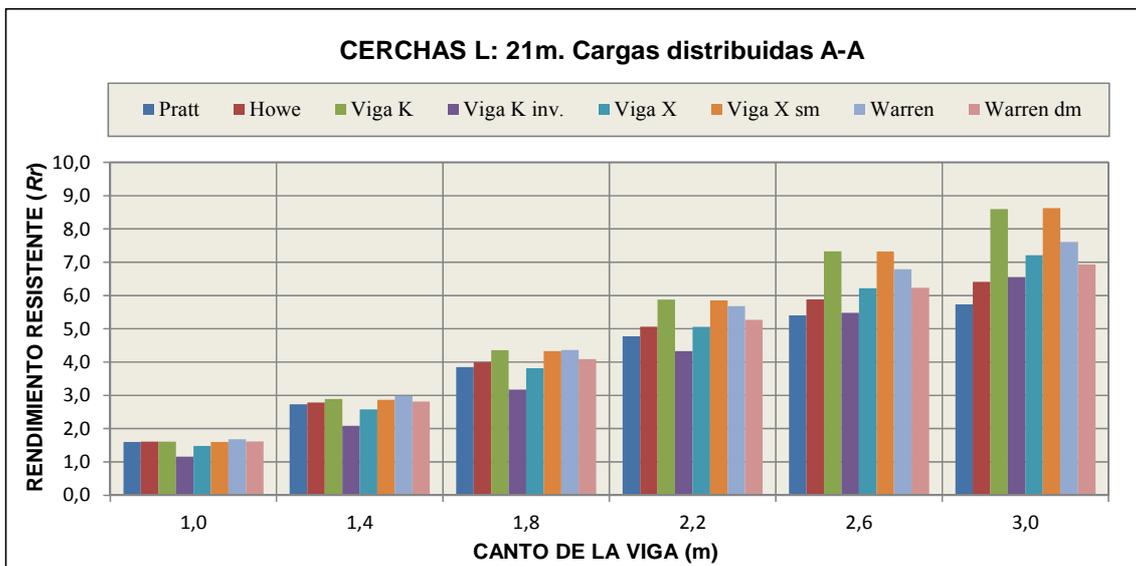
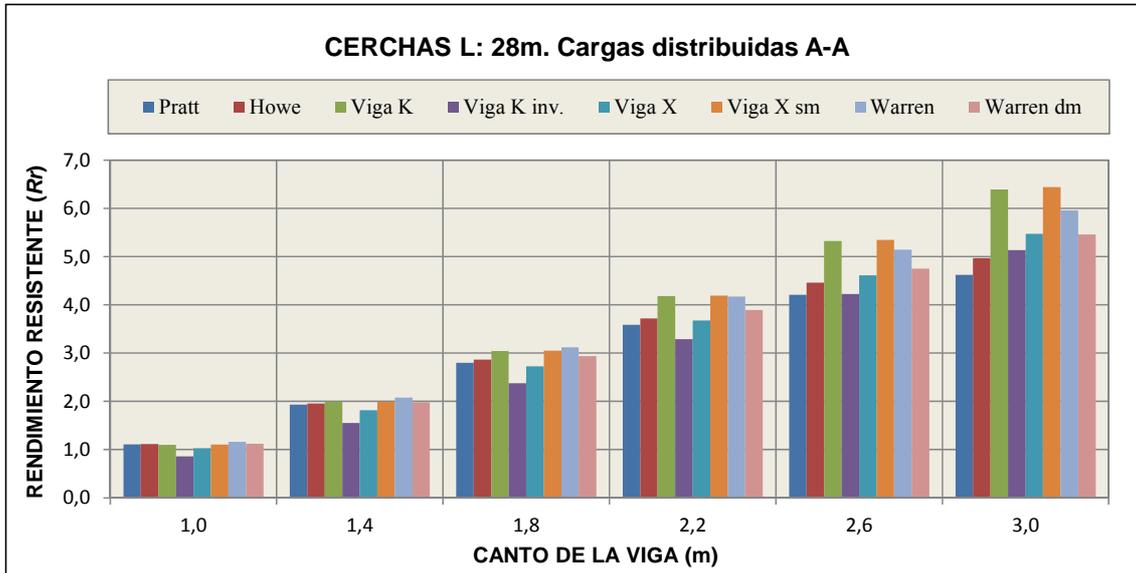


Figura 2.5-56. Rendimiento estudio 2. Resultados de ocho celosías de 21.0 m biapoyadas para distintos estados de carga.

En las figuras 2.5-57 y 2.5-58 se presentan todos los resultados R_r del estudio comparativo 2, igualando deformaciones para distintos estados de carga. En concreto, se muestran las ocho celosías biapoyadas, de 28.0 m y 35.0 m de luz para cargas distribuidas y uniones articuladas A-A en los extremos de las barras de relleno. La tabla 2.5-10 corresponde a los resultados para las celosías de H: 2.2 m.



L: 28.0 m	Flecha	Cord.	C-260x260x14.2			Diag.	C-200x200x6			Peso	Q total	
H: 2.2 m	cm	m	cm ²	kg/ml	kN	m	cm ²	kg/ml	KN	KN	KN/ml	R_r
Pratt	5,600	56,00	140	107,4	60,15	82,38	46,6	35,82	29,51	89,65	32,173	3,589
Howe	5,600	56,00	140	107,4	60,15	82,38	46,6	35,82	29,51	89,65	33,356	3,721
Viga K	5,600	56,00	140	107,4	60,15	103,5	46,6	35,82	37,09	97,24	40,682	4,184
Viga K inv.	5,600	56,00	140	107,4	60,15	103,5	46,6	35,82	37,09	97,24	31,966	3,287
Viga X	5,600	56,00	140	107,4	60,15	127,4	46,6	35,82	45,62	105,8	38,897	3,678
Viga X sm	5,600	56,00	140	107,4	60,15	94,36	46,6	35,82	33,80	93,94	39,372	4,181
Warren	5,600	56,00	140	107,4	60,15	66,98	46,6	35,82	23,99	84,14	35,108	4,173
Warren dm	5,600	56,00	140	107,4	60,15	82,38	46,6	35,82	29,51	89,65	34,899	3,893

Figura 2.5-57. Rendimiento estudio 2. Resultados de 8 celosías de 28.0 m biapoyadas para distintos estados de cargas. La tabla 2.5-10 corresponde a los resultados de H: 2.2 m.

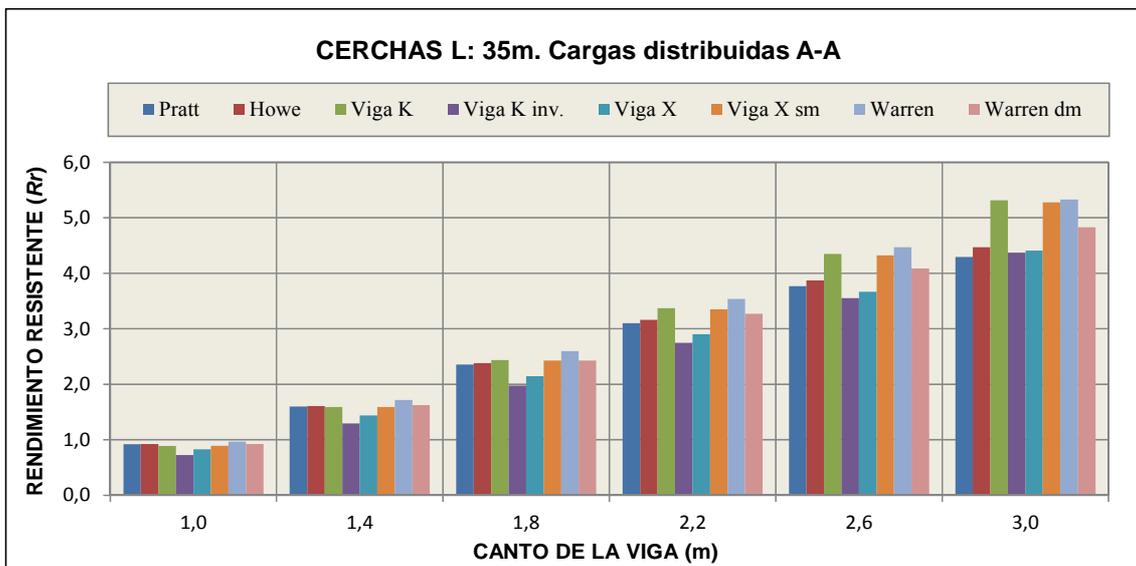


Figura 2.5-58. Rendimiento estudio 2. Resultados de ocho celosías de 35.0 m biapoyadas para distintos estados de carga.

En las figuras 2.5-59 y 2.5-60, se presentan los resultados de rendimiento resistente obtenido en el segundo estudio comparativo, igualando deformaciones para distintos estados de carga, para ocho tipologías de vigas de celosía con un voladizo de 7.0 m y 10.5 m de longitud. Se muestran los resultados para cargas distribuidas en el cordón superior, con las uniones articuladas A-A en los extremos de las barras de relleno.

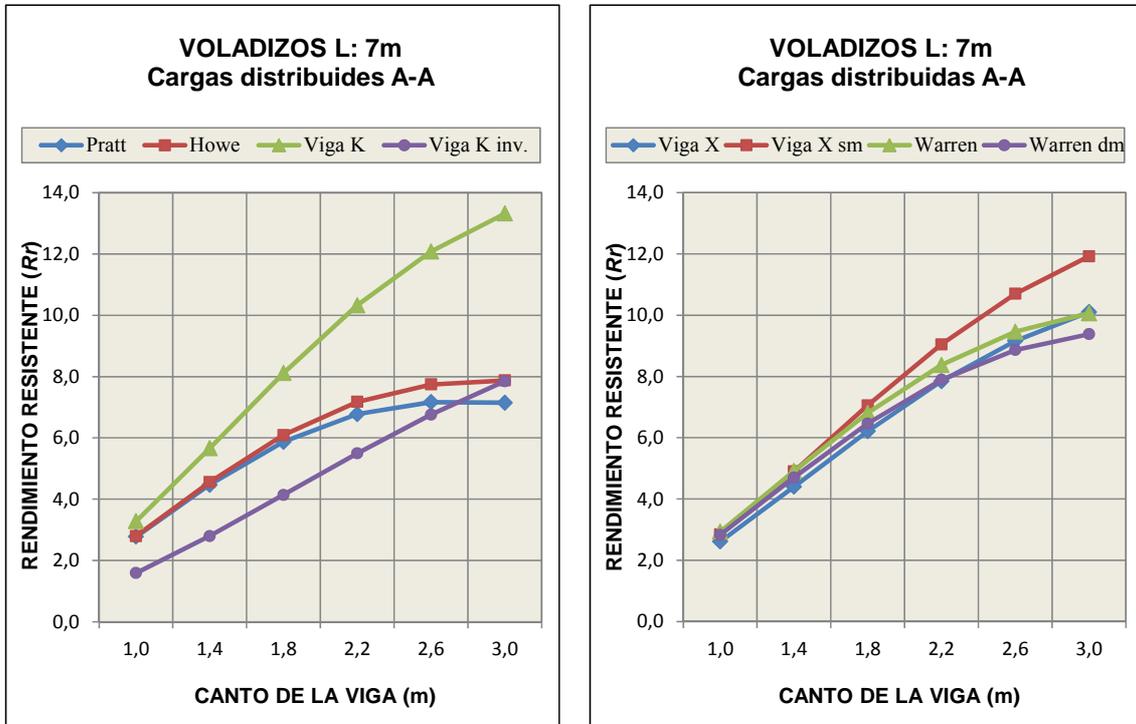


Figura 2.5-59. Rendimiento estudio 2, de ocho celosías (4+4) de 7.0 m en voladizo para distintas cargas distribuidas. Uniones articuladas A-A en las barras de relleno.

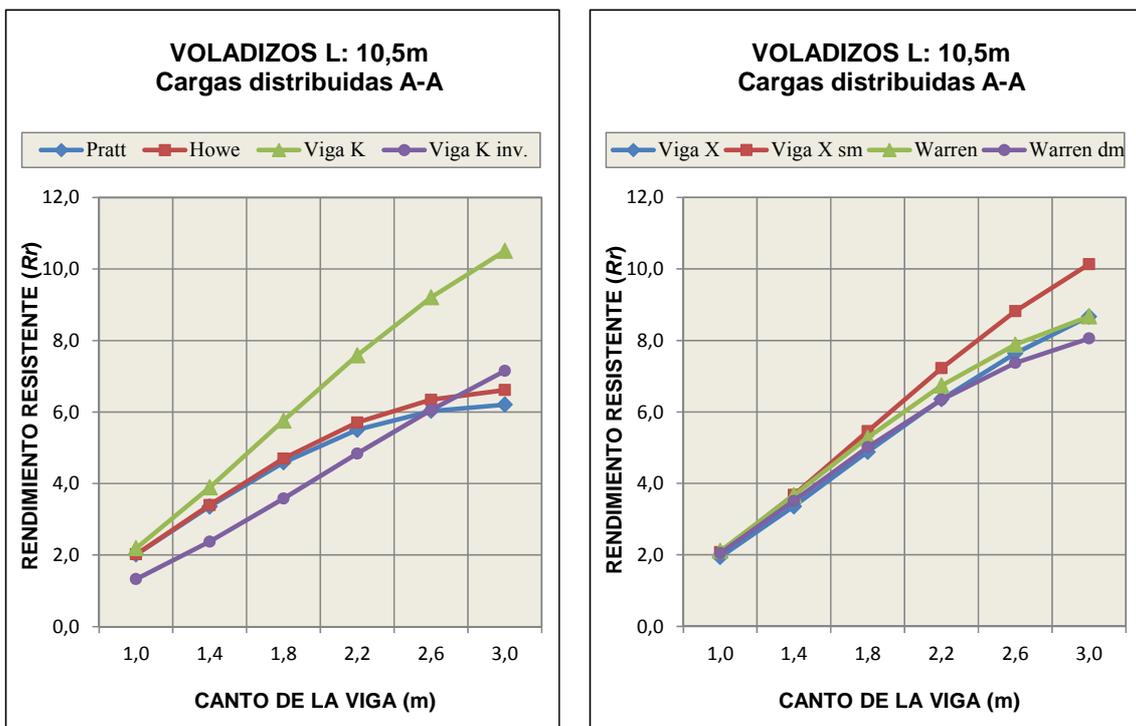


Figura 2.5-60. Rendimiento estudio 2, de ocho celosías (4+4) de 10.5 m en voladizo para distintas cargas distribuidas. Uniones articuladas A-A en las barras de relleno.

En las figuras 2.5-61 y 2.5-62, se presentan los resultados de rendimiento resistente obtenido en el segundo estudio comparativo, igualando deformaciones para distintos estados de carga, para ocho tipologías de vigas de celosía con un voladizo de 14.0 m y 17.5 m de longitud. Se muestran los resultados para cargas distribuidas en el cordón superior, con las uniones articuladas A-A en los extremos de las barras de relleno.

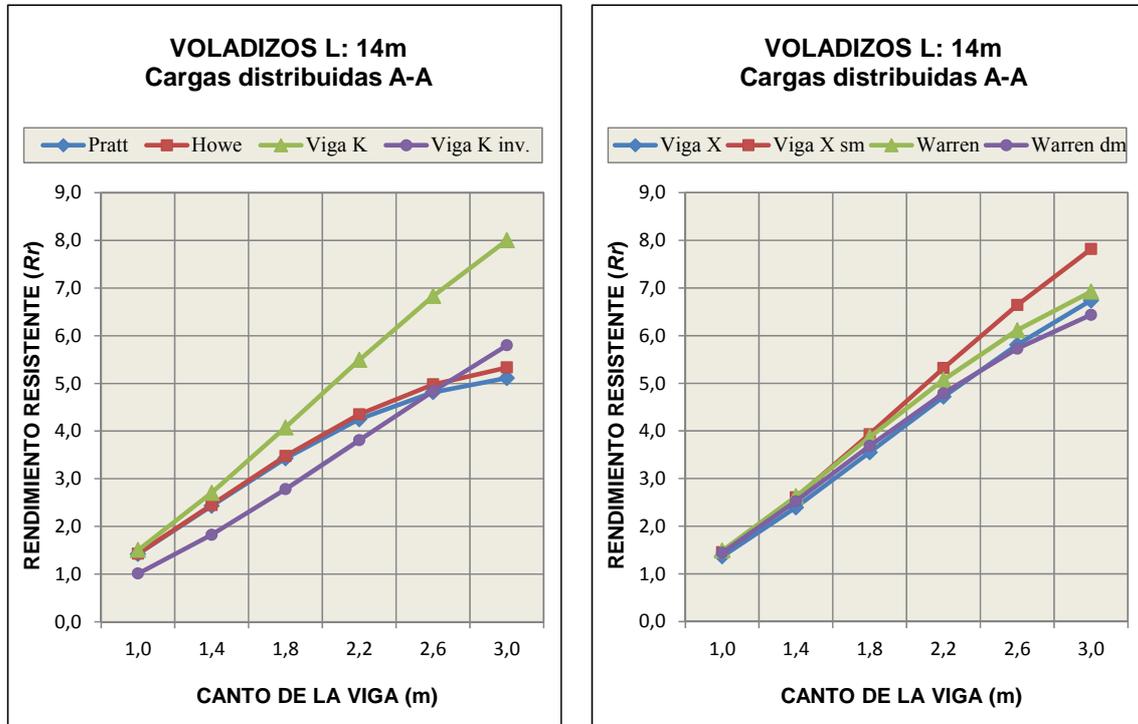


Figura 2.5-61. Rendimiento estudio 2, de ocho celosías (4+4) de 14.0 m en voladizo para distintas cargas distribuidas. Uniones articuladas A-A en las barras de relleno.

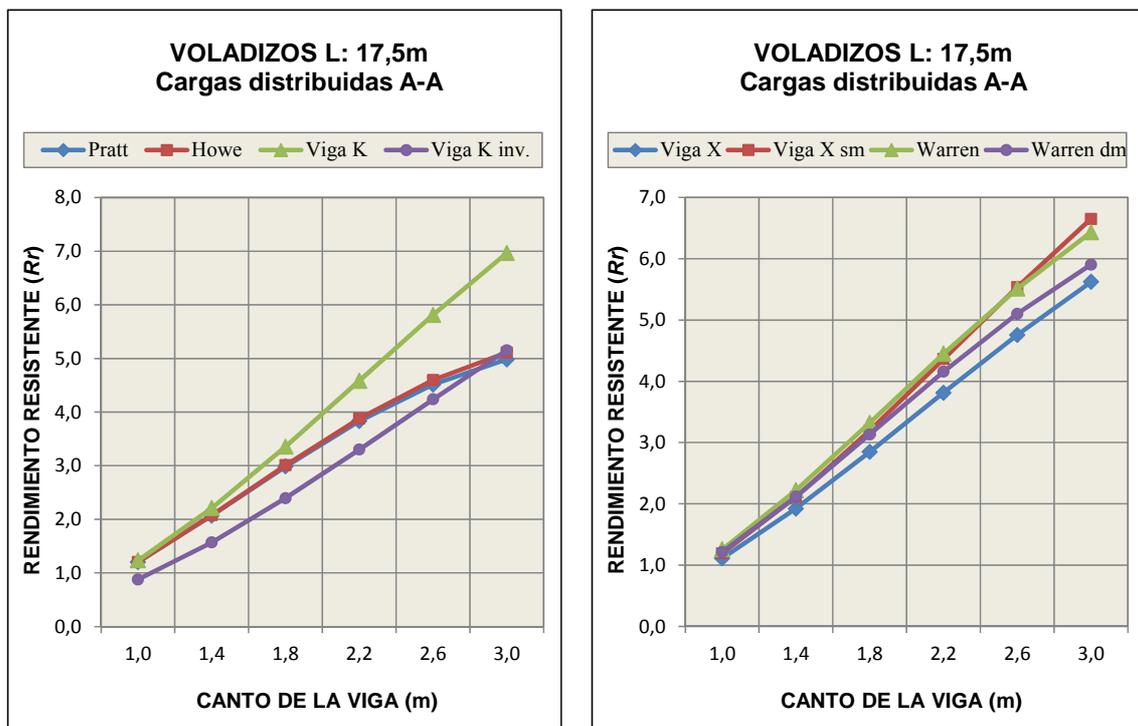
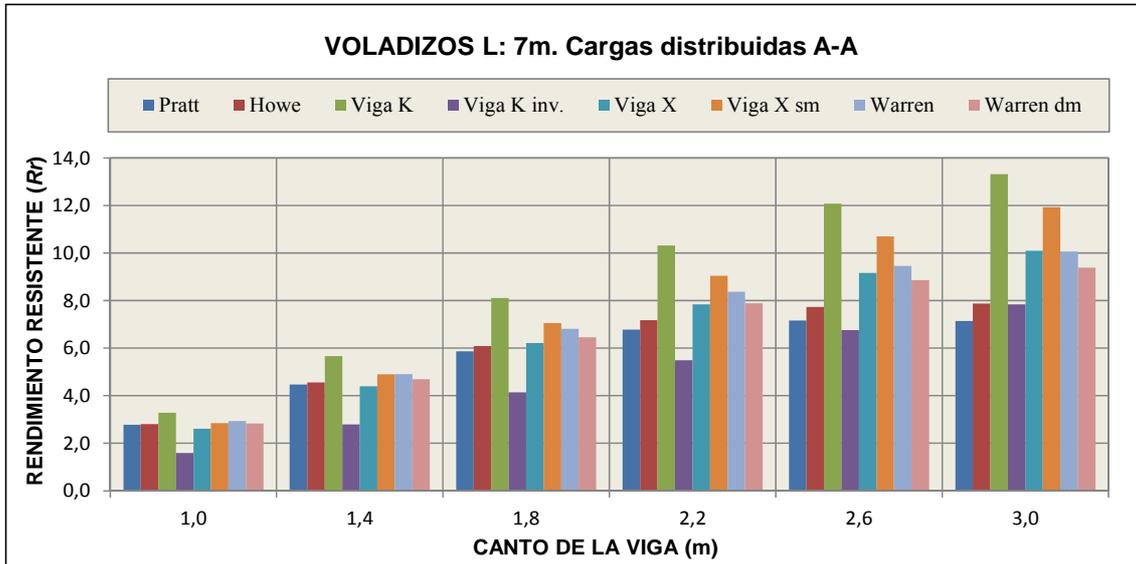


Figura 2.5-62. Rendimiento estudio 2, de ocho celosías (4+4) de 17.5 m en voladizo para distintas cargas distribuidas. Uniones articuladas A-A en las barras de relleno.

En las figuras 2.5-63 y 2.5-64 se presentan todos los resultados R_r del segundo estudio comparativo, igualando deformaciones para distintos estados de carga. En concreto, se muestran las ocho celosías con un voladizo de 7.0 y 10.5 m de luz para cargas distribuidas y uniones articuladas A-A en los extremos de las barras de relleno. La tabla 2.5-11 corresponde a los resultados para las celosías de H: 1.8 m.



Lv: 7.0 m	Flecha	Cord.	C-150x150x5mm			Diag.	C-125x125x5mm			Peso	Q total	
H: 1.8 m	cm	m	cm ²	kg/ml	kN	m	cm ²	kg/ml	kN	KN	kN/ml	R_r
Pratt	2,333	14,00	29,0	22,31	3,12	19,04	24,0	18,46	3,52	6,64	43,303	5,870
Howe	2,333	14,00	29,0	22,31	3,12	19,04	24,0	18,46	3,52	6,64	44,922	6,090
Viga K	2,333	14,00	29,0	22,31	3,12	24,74	24,0	18,46	4,57	7,69	69,337	8,113
Viga K inv.	2,276	14,00	29,0	22,31	3,12	24,74	24,0	18,46	4,57	7,69	35,369	4,139
Viga X	2,333	14,00	29,0	22,31	3,12	29,08	24,0	18,46	5,37	8,49	58,631	6,213
Viga X sm	2,333	14,00	29,0	22,31	3,12	23,68	24,0	18,46	4,37	7,50	58,759	7,055
Warren	2,333	14,00	29,0	22,31	3,12	17,24	24,0	18,46	3,18	6,31	47,718	6,810
Warren dm	2,333	14,00	29,0	22,31	3,12	19,04	24,0	18,46	3,52	6,64	47,661	6,461

Figura 2.5-63. Rendimiento estudio 2. Resultados de 8 celosías de 7.0 m en voladizo para distintos estados de cargas. La tabla 2.5-11 corresponde a los resultados de H: 1.8 m.

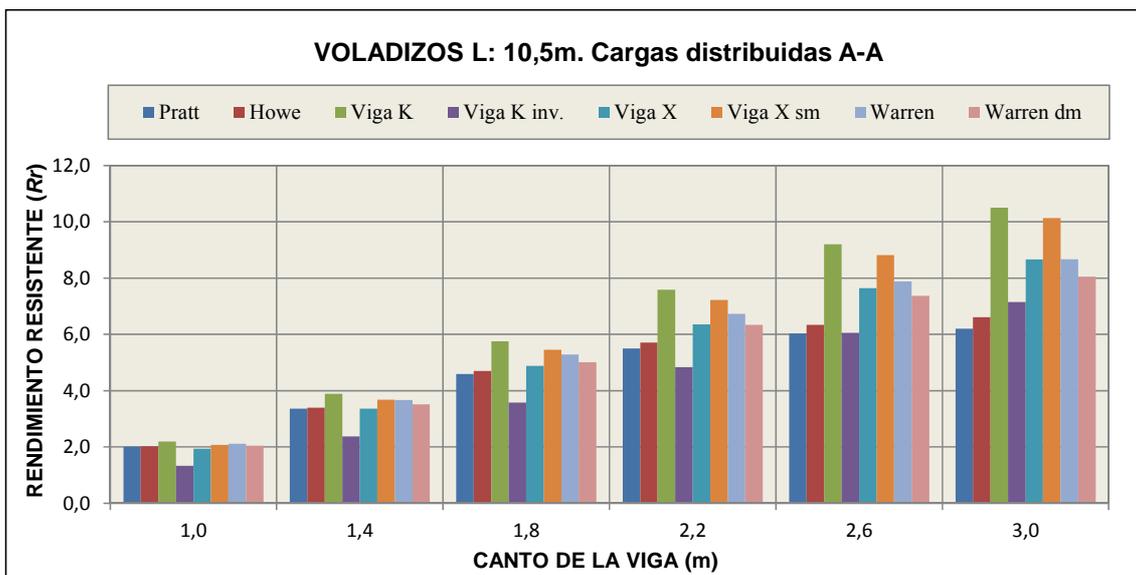
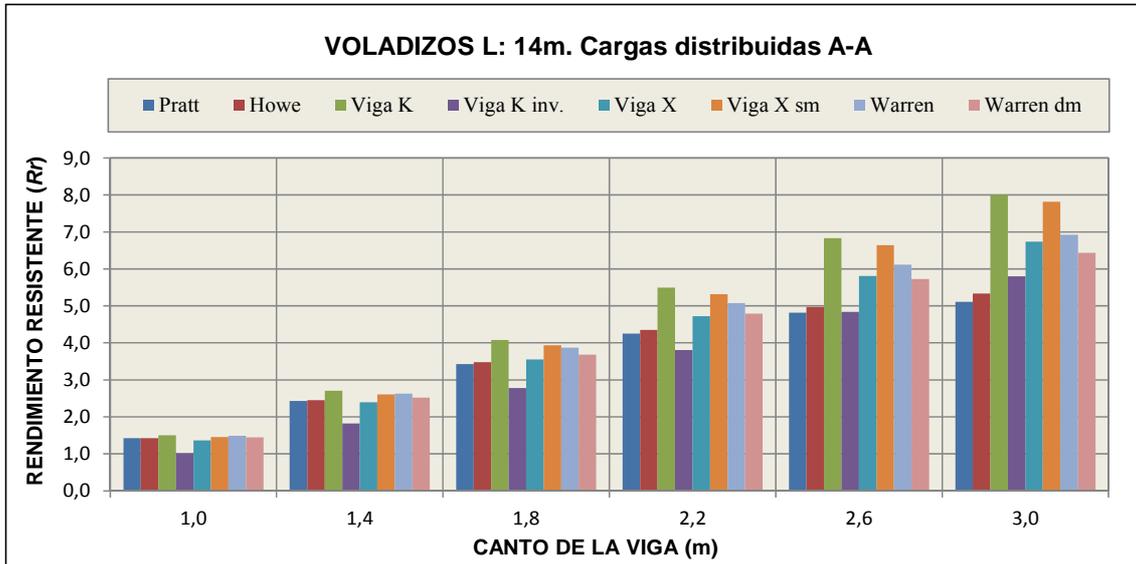


Figura 2.5-64. Rendimiento estudio 2. Resultados de ocho celosías de 10.5 m en voladizo para distintos estados de cargas.

En las figuras 2.5-65 y 2.5-66 se presentan todos los resultados R_r del segundo estudio comparativo, igualando deformaciones para distintos estados de carga. En concreto, se muestran las ocho celosías con un voladizo de 14.0 y 17.5 m de luz para cargas distribuidas y uniones articuladas A-A en los extremos de las barras de relleno. La tabla 2.5-12 corresponde a los resultados para las celosías de H: 2.2 m.



Lv: 14.0 m	Flecha	Cord.	C-260x260x14.2			Diag.	C-200x200x6			Peso	Q	
H: 2.2 m	cm	m	cm ²	kg/ml	kN	m	cm ²	kg/ml	kN	KN	kN/ml	R_r
Pratt	4,667	28,00	140	107.4	30,07	42,29	46,6	35,82	15,15	45,22	38,425	4,249
Howe	4,667	28,00	140	107.4	30,07	42,29	46,6	35,82	15,15	45,22	39,335	4,349
Viga K	4,667	28,00	140	107.4	30,07	52,87	46,6	35,82	18,94	49,01	53,828	5,491
Viga K inv.	4,667	28,00	140	107.4	30,07	52,87	46,6	35,82	18,94	49,01	37,329	3,808
Viga X	4,667	28,00	140	107.4	30,07	64,78	46,6	35,82	23,20	53,28	50,281	4,719
Viga X sm	4,667	28,00	140	107.4	30,07	49,38	46,6	35,82	17,69	47,76	50,773	5,315
Warren	4,667	28,00	140	107.4	30,07	35,69	46,6	35,82	12,78	42,86	43,490	5,074
Warren dm	4,667	28,00	140	107.4	30,07	42,29	46,6	35,82	15,15	45,22	43,315	4,789

Figura 2.5-65. Rendimiento estudio 2. Resultados de 8 celosías de 14.0 m en voladizo para distintos estados de cargas. La tabla 2.5-12 corresponde a los resultados de H: 2.2 m.

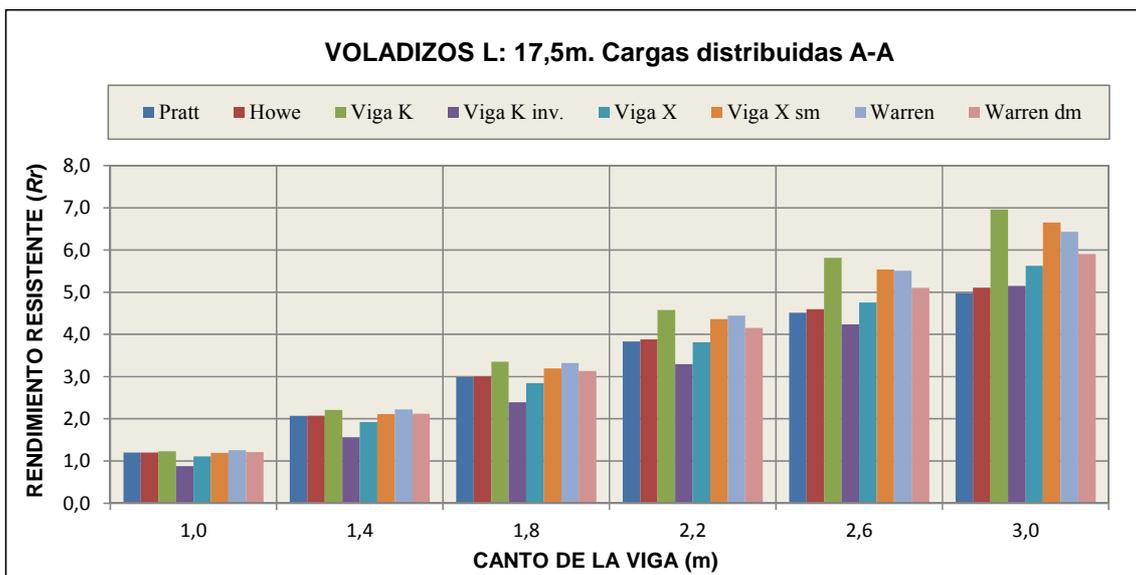


Figura 2.5-66. Rendimiento estudio 2. Resultados de ocho celosías de 17.5 m en voladizo para distintos estados de cargas.

En las figuras 2.5-67 y 2.5-68, se presentan los resultados de rendimiento resistente obtenido en el segundo estudio comparativo, igualando deformaciones ajustando el grosor de los perfiles de los cordones, para ocho tipologías de vigas de celosía biapoyadas, de 14.0 m, 21.0 m, 28.0 m y 35.0 m de luz entre apoyos. Se muestran los resultados para las mismas cargas puntuales en los nudos superiores, con las uniones articuladas A-A en los extremos de las barras de relleno.

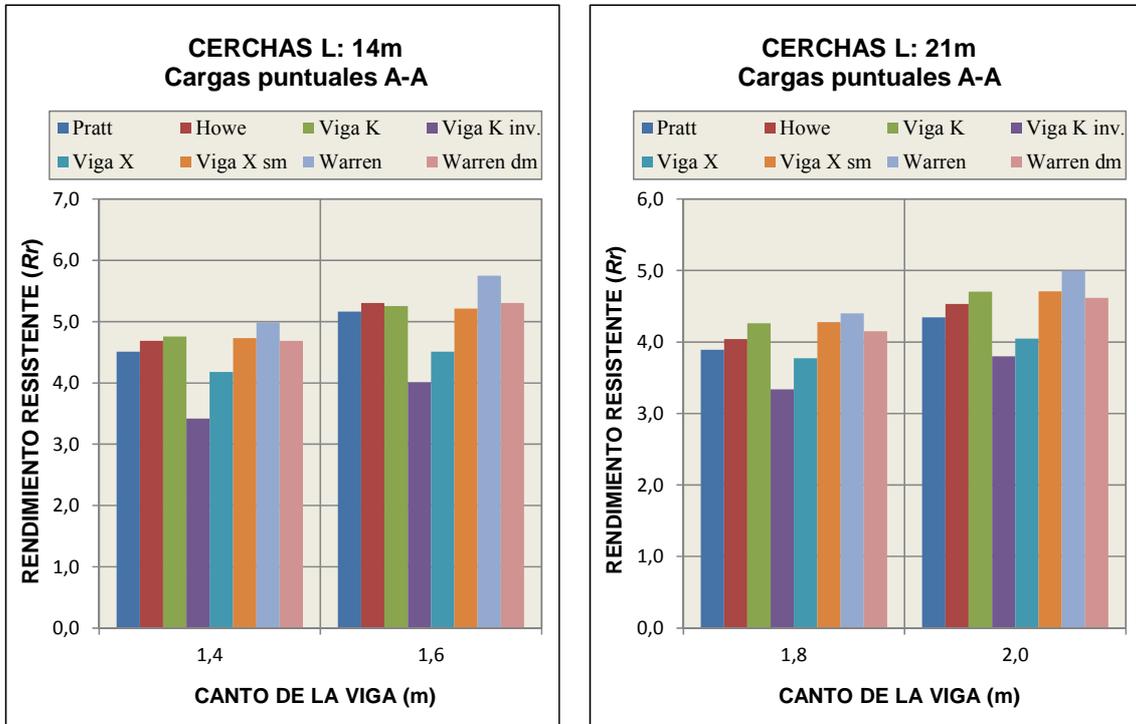


Figura 2.5-67. Rendimiento estudio 2. Resultados de ocho celosías de 14.0 m y 21.0 m biapoyadas para cargas puntuales. Uniones articuladas A-A en las barras de relleno.

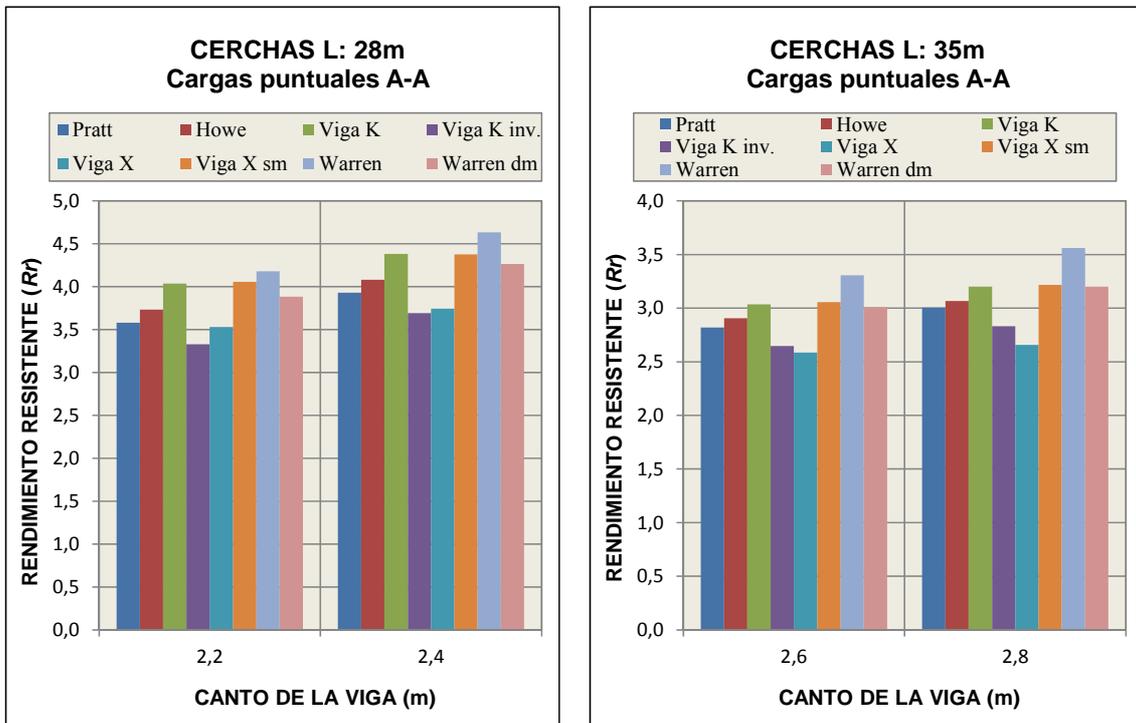


Figura 2.5-68. Rendimiento estudio 2. Resultados de ocho celosías de 28.0 m y 35.0 m biapoyadas para cargas puntuales. Uniones articuladas A-A en las barras de relleno.

En las figuras 2.5-69 y 2.5-70, se presentan los resultados de rendimiento resistente obtenido en el segundo estudio comparativo, igualando deformaciones ajustando el grosor de los perfiles de los cordones, para ocho tipologías de vigas de celosía con un voladizo de 7.0 m, 10.5 m, 14.0 m y 17.5 m de longitud. Se muestran los resultados para las mismas cargas puntuales en los nudos superiores, con las uniones articuladas A-A en los extremos de las barras de relleno.

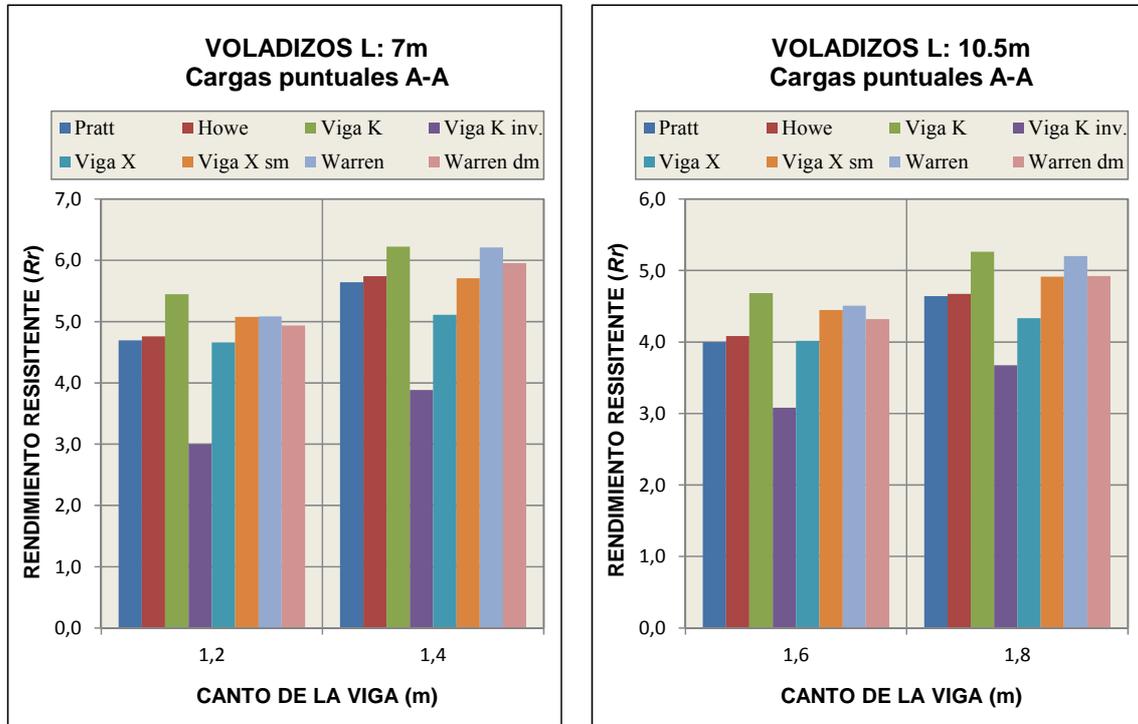


Figura 2.5-69. Rendimiento estudio 2. Resultados de ocho celosías de 7.0 m y 10.5 m en voladizo para cargas puntuales. Uniones articuladas A-A en las barras de relleno.

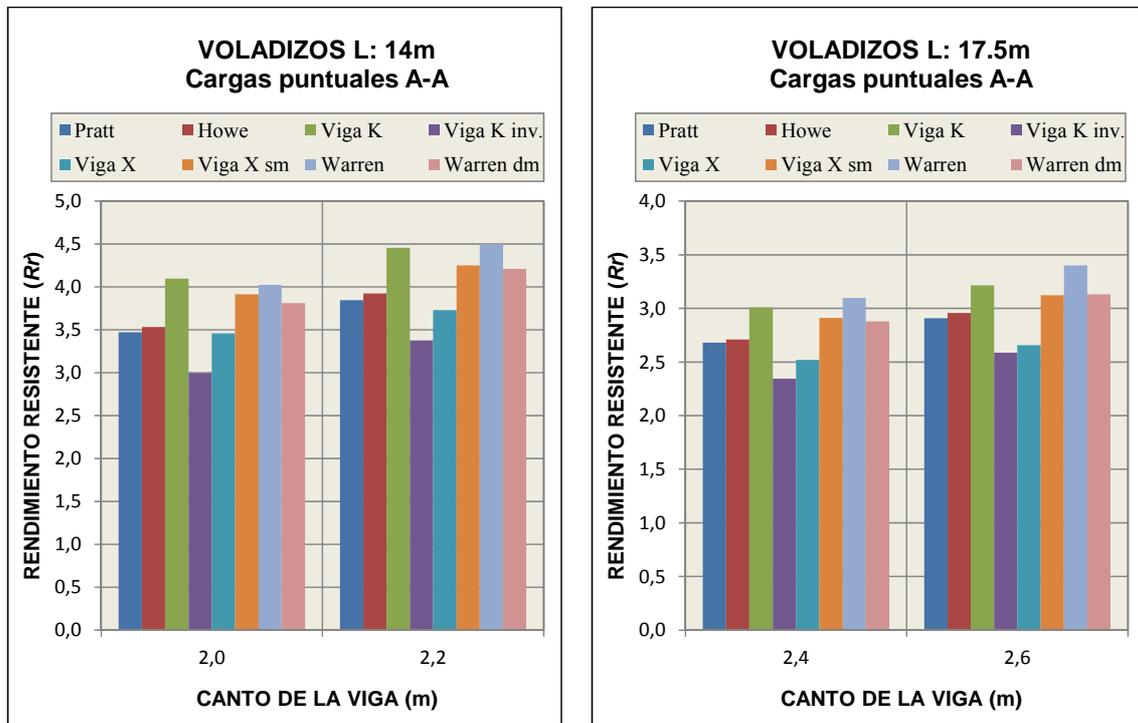


Figura 2.5-70. Rendimiento estudio 2. Resultados de ocho celosías de 14.0 m y 17.5 m en voladizo para cargas puntuales. Uniones articuladas A-A en las barras de relleno.

2.5.3.1 Conclusiones estudio comparativo final 2

De acuerdo a los resultados del segundo estudio comparativo final, sobre el rendimiento resistente de ocho geometrías de vigas de celosía con cargas repartidas en los cordones superiores o cargas puntuales en los nudos, según el caso, y con uniones articuladas en los extremos de las barras, se extraen las conclusiones que se describen a continuación:

1. En términos generales, los resultados obtenidos siguen la tendencia preponderante descrita en el estudio básico inicial y el primer estudio comparativo para todas las luces y cantos estudiados:
 - Vigas biapoyadas para luces de 14.0, 21.0, 28.0 y 35.0 m y cantos entre 1.0 y 3.0 m.
 - Vigas en voladizo para luces de 7.0, 10.5, 14.0 y 17.5 m y cantos entre 1.0 y 3.0 m.
2. Cabe destacar que en el segundo estudio comparativo, por lo general, se mantiene la tendencia preponderante de acuerdo a los estudios realizados anteriormente, para ambas opciones de análisis de dicho estudio:
 - Opción 1: Igualando deformaciones para un mismo dimensionado de los perfiles, variando la carga distribuida aplicada en el cordón superior.
 - Opción 2: Igualando deformaciones para un mismo estado de cargas puntuales en los nudos variando el grosor de los perfiles de los cordones.

La viga “en K” obtiene los resultados de rendimiento más elevados en la primera opción de análisis para todas las longitudes de celosía y cantos analizados. No obstante, de acuerdo a la segunda opción de análisis, la viga Warren y la viga “en X” sin montantes obtienen, para determinadas longitudes y cantos, los mayores rendimientos resistentes de todas las geometrías analizadas, incluso con valores superiores a la viga “en K” (del orden de un 5-10%). Por lo tanto, la viga Warren y la viga “en X”, junto con la viga “en K”, son tres geometrías de armaduras altamente eficaces desde el punto de vista estructural (función estructural), de acuerdo a sus características geométricas (forma), identificando de forma clara la trayectoria de las direcciones principales de los elementos resistentes de alma llena equivalentes según sus sollicitaciones.

En este mismo contexto, la viga “en K invertida” claramente ofrece los rendimientos estructurales menores en todos los casos analizados en el estudio segundo comparativo final (entre un 25-35% inferior a las vigas de mayor rendimiento), reforzando el planteamiento de optimización que establece Aurelio Muttoni (2011), en base a la disposición de las barras de relleno de acuerdo a la geometría arco-tirante.

3. Las deformaciones para ELS (flecha máxima admisible) son válidas como «parámetro de control» para determinar el rendimiento y la eficiencia estructural de las estructuras de entramado o vigas de celosía.

Tras determinar la viabilidad de las deformaciones como «parámetro de control» en el estudio sobre el rendimiento estructural de vigas de celosía, en el siguiente estudio comparativo final 3, se pretende establecer si la resistencia admisible para ELU (perfiles estrictos de acuerdo al concepto de «resistencia equivalente»), también, es un parámetro de control válido para el análisis de dicho rendimiento.

2.5.4 Estudio comparativo final 3: peso propio celosías para «resistencia equivalente» de todas las barras

En el tercer y definitivo estudio comparativo se analizan 128 celosías de distintas triangulaciones con el objetivo de valorar el rendimiento global según la expresión (2.4.21) de cada una de las tipologías estudiadas para una «resistencia equivalente» de todas las barras, para determinar si este concepto es válido, también, como «parámetro de control».

Se analizan las celosías de acuerdo a las siguientes variables:

- Celosías apoyadas en los extremos y celosías en voladizo.
- Ocho triangulaciones distintas: viga Pratt, viga Howe, viga “en K”, viga “en K invertida”, viga Warren, viga “en X”, viga “en X” sin montantes, viga Warren con montantes intercalados y viga Warren con doble montante.
- Dos cantos distintos entre 1.0-3.0m según la luz de cada celosía analizada:

Viga biapoyada de 14.0 m:	1.4 y 1.6 m
Viga biapoyada de 21.0 m:	1.8 y 2.0 m
Viga biapoyada de 28.0 m:	2.2 y 2.4 m
Viga biapoyada de 35.0 m:	2.6 y 2.8 m
Viga en voladizo de 7.00 m:	1.2 y 1.4 m
Viga en voladizo de 10.5 m:	1.6 y 1.8 m
Viga en voladizo de 14.0 m:	2.0 y 2.2 m
Viga en voladizo de 17.5 m:	2.4 y 2.6 m

- Cuatro luces distintas:

Celosías apoyadas:	14.0, 21.0, 28.0 y 35.0 m.
Celosías en voladizo:	7.0, 10.5, 14.0, y 17.5 m.

Los criterios de dimensionado para el tercer estudio comparativo final son los siguientes:

- Dimensionado de todas las barras eligiendo el perfil de mínimo peso, dentro de la serie europea de perfiles, que cumpla todas las condiciones de dimensionado correcto («resistencia equivalente») para estados límite últimos.
- Uniones articuladas A-A en los extremos de las barras de relleno.
- Cargas puntuales en los nudos del cordón superior.
- No hay limitación de deformación (flecha máxima).
- Se tienen en cuenta los efectos de pandeo a nivel barra y a nivel sección, así como las características geométricas y mecánicas de los perfiles de clase 4.

En las figuras 2.5-71 y 2.5-72, se presentan los resultados de rendimiento global obtenido en el tercer estudio comparativo, para un dimensionado estricto de las barras para una «resistencia equivalente» de todas ellas, para ocho tipologías de vigas de celosía biapoyadas, de 14.0 m, 21.0 m, 28.0 m y 35.0 m de luz entre apoyos. Se muestran los resultados para las mismas cargas puntuales en los nudos superiores, con las uniones articuladas A-A en los extremos de las barras de relleno.

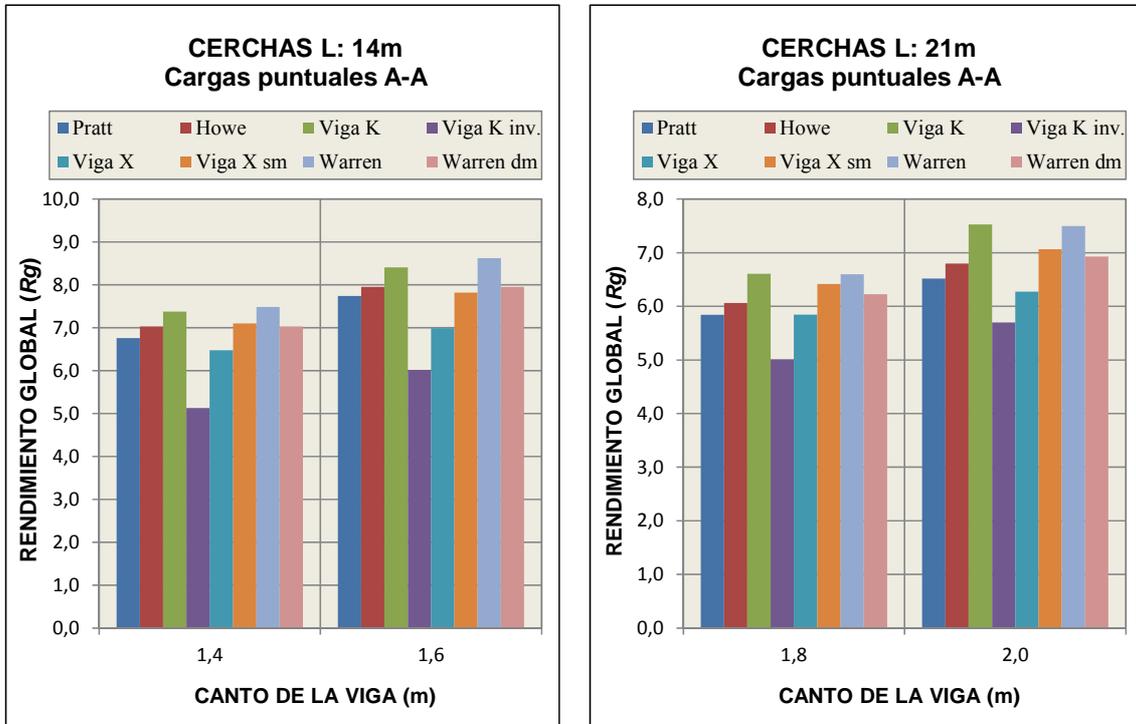


Figura 2.5-71. Rendimiento estudio 3. Resultados de ocho celosías de 14.0 m y 21.0 m biapoyadas para cargas puntuales. Uniones articuladas A-A en las barras de relleno.

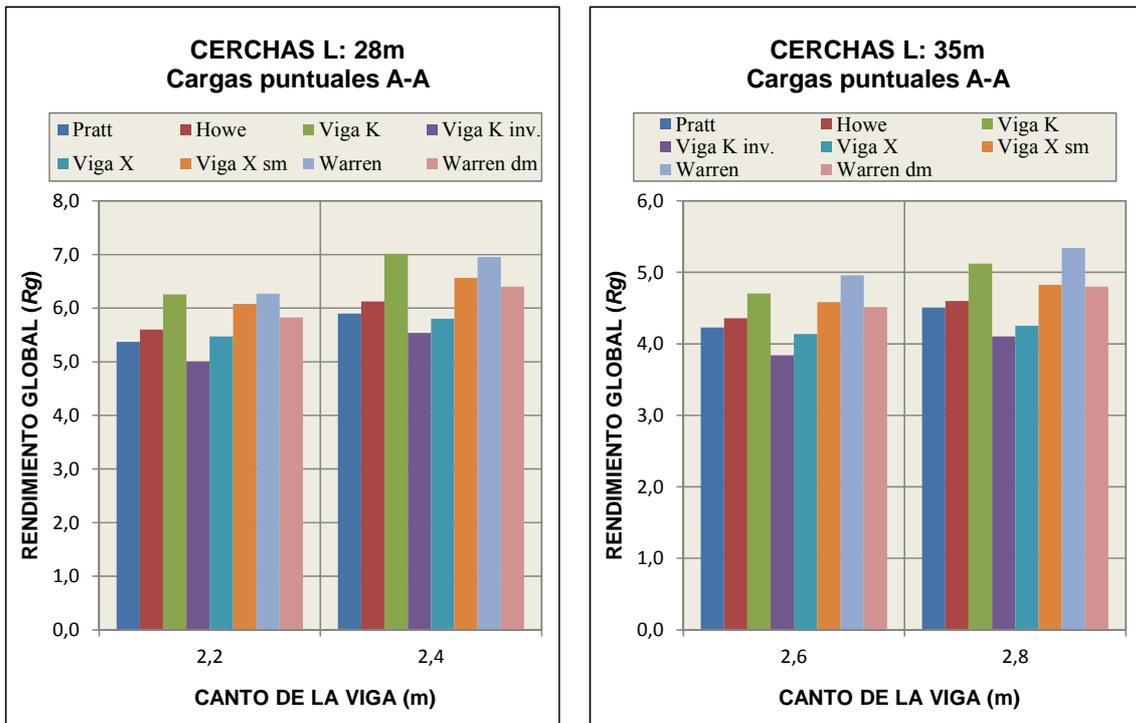


Figura 2.5-72. Rendimiento estudio 3. Resultados de ocho celosías de 28.0 m y 35.0 m biapoyadas para cargas puntuales. Uniones articuladas A-A en las barras de relleno.

En las figuras 2.5-73 y 2.5-74, se presentan los resultados de rendimiento global obtenido en el tercer estudio comparativo, para un dimensionado estricto de las barras para una «resistencia equivalente» de todas ellas, para ocho tipologías de vigas de celosía con un voladizo de 7.0 m, 10.5 m, 14.0 m y 17.5 m de longitud. Se muestran los resultados para las mismas cargas puntuales en los nudos superiores, con las uniones articuladas A-A en los extremos de las barras de relleno.

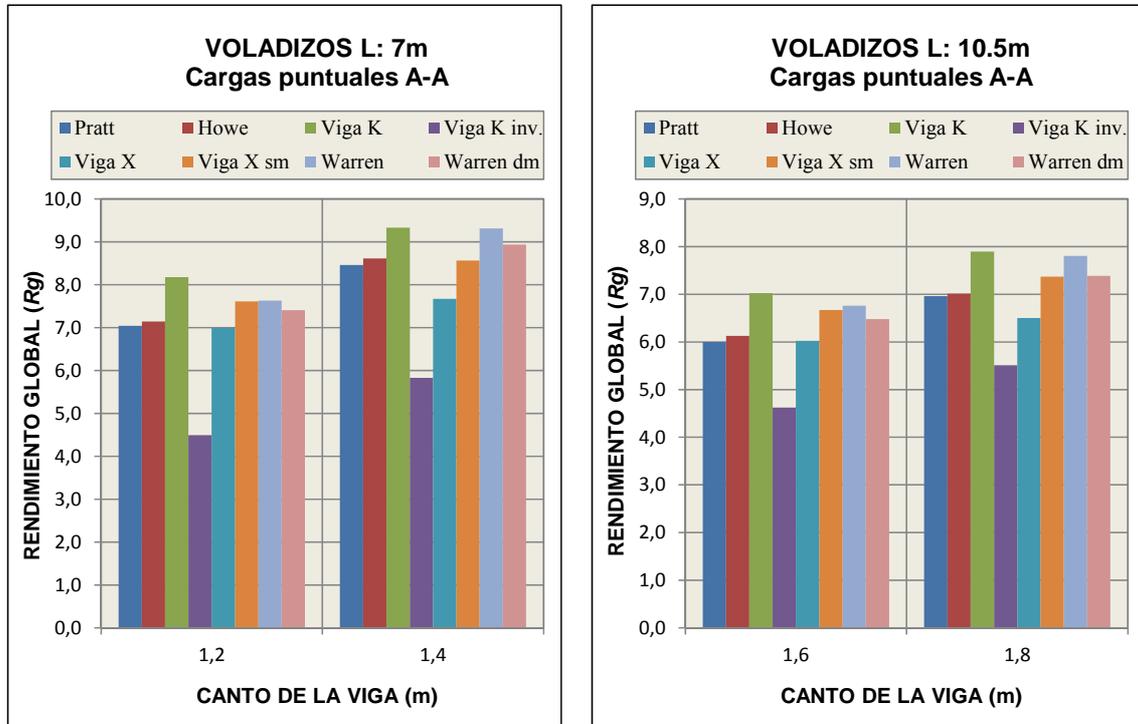


Figura 2.5-73. Rendimiento estudio 3. Resultados de ocho celosías de 7.0 m y 10.5 m en voladizo para cargas puntuales. Uniones articuladas A-A en las barras de relleno.

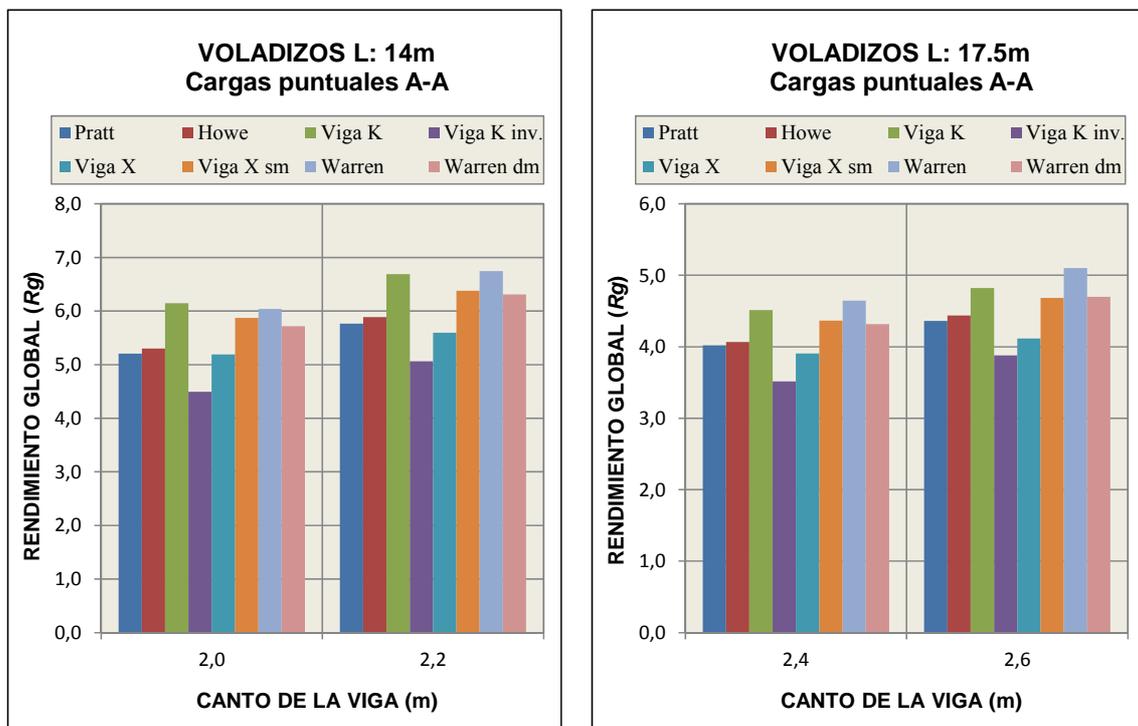


Figura 2.5-74. Rendimiento estudio 3. Resultados de ocho celosías de 14.0 m y 17.5 m en voladizo para cargas puntuales. Uniones articuladas A-A en las barras de relleno.

2.5.4.1 Conclusiones estudio comparativo final 3

De acuerdo a los resultados del tercer estudio comparativo final, sobre el rendimiento global de ocho geometrías de vigas de celosía con cargas puntuales en los nudos del cordón superior y con uniones articuladas A-A en los extremos de las barras, se extraen las conclusiones que se describen a continuación:

1. En términos generales, los resultados obtenidos siguen la tendencia preponderante descrita en el estudio básico inicial y los estudios comparativos 1 y 2 para todas las luces y cantos estudiados:
 - Vigas biapoyadas para luces de 14.0, 21.0, 28.0 y 35.0 m y cantos entre 1.0 y 3.0 m.
 - Vigas en voladizo para luces de 7.0, 10.5, 14.0 y 17.5 m y cantos entre 1.0 y 3.0 m.
2. La viga “en K”, la viga Warren y la viga “en X” sin montantes, obtienen los resultados de rendimiento más elevados en base al dimensionado estricto de los perfiles («resistencia equivalente») para todas las longitudes de celosía y cantos analizados, dadas sus características geométricas para una transmisión “lógica” de las cargas desde su punto de aplicación a los soportes.

Nuevamente, la viga “en K invertida” ofrece la menor eficiencia estructural con respecto al resto de armaduras. El rendimiento de dicha triangulación puede ser del orden de un 25-35% inferior con respecto las geometrías o vigas de celosía de mayor rendimiento, dependiendo de las dimensiones (luz y canto) consideradas.

3. El dimensionado estricto para ELU («resistencia equivalente» de todas las barras) es también válido como «parámetro de control» para determinar el rendimiento y la eficiencia estructural de las estructuras de entramado o de celosía.
4. De acuerdo a los resultados de rendimiento estructural de vigas en celosía de distintas geometrías, en base al dimensionado estricto de las barras para ELU, los resultados de rendimiento estructural son mayores que los obtenidos en los estudios de acuerdo a la limitación de deformación como «parámetro de control». Ello se debe a la reducción del peso propio de las armaduras al dimensionar todas las barras para una misma resistencia (dimensionado estricto), sin que ello conlleve un incremento destacable de las flechas, produciendo un incremento del rendimiento estructural global.

2.6 Resultados, evaluación y conclusiones finales correspondientes del rendimiento estructural de vigas de celosía planas

A continuación se presentan las gráficas resumen de acuerdo a los resultados expuestos en los comparativos finales 1, 2 y 3, realizados anteriormente acerca del rendimiento estructural de vigas en celosía biapoyadas y en voladizo para distintas luces y cantos.

Estudio comparativo final 1: deformaciones máximas igualando los perfiles de todas las tipologías para un mismo estado de cargas.

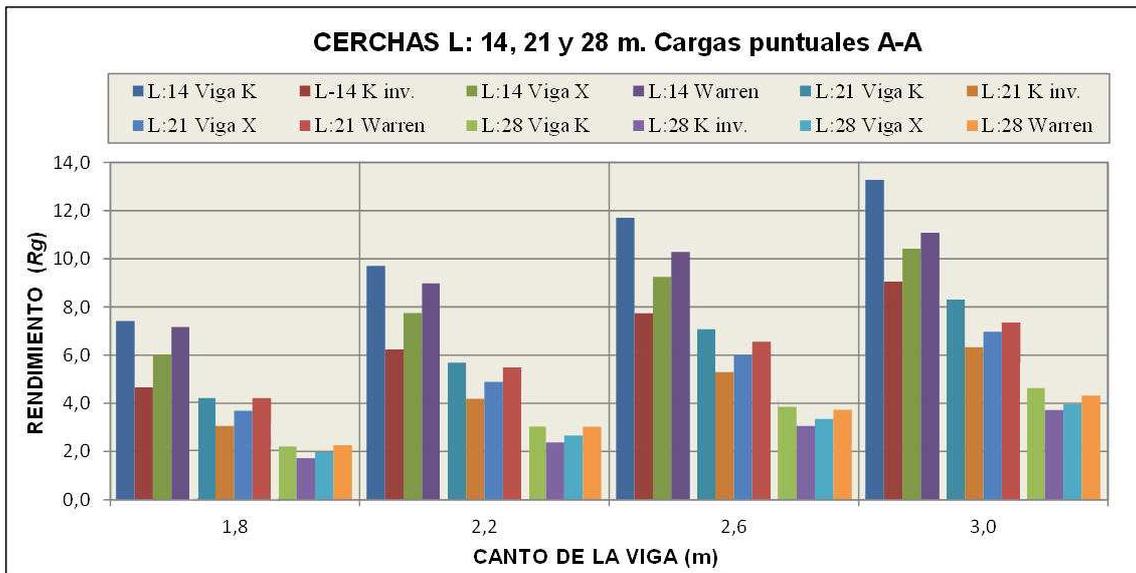


Figura 2.6-1. Rendimiento comparativo 1. Resumen resultados con cuatro tipologías de celosías biapoyadas en los extremos para unas luces de 14.0, 21.0 y 28.0 m con cargas puntuales en los nudos del cordón superior.

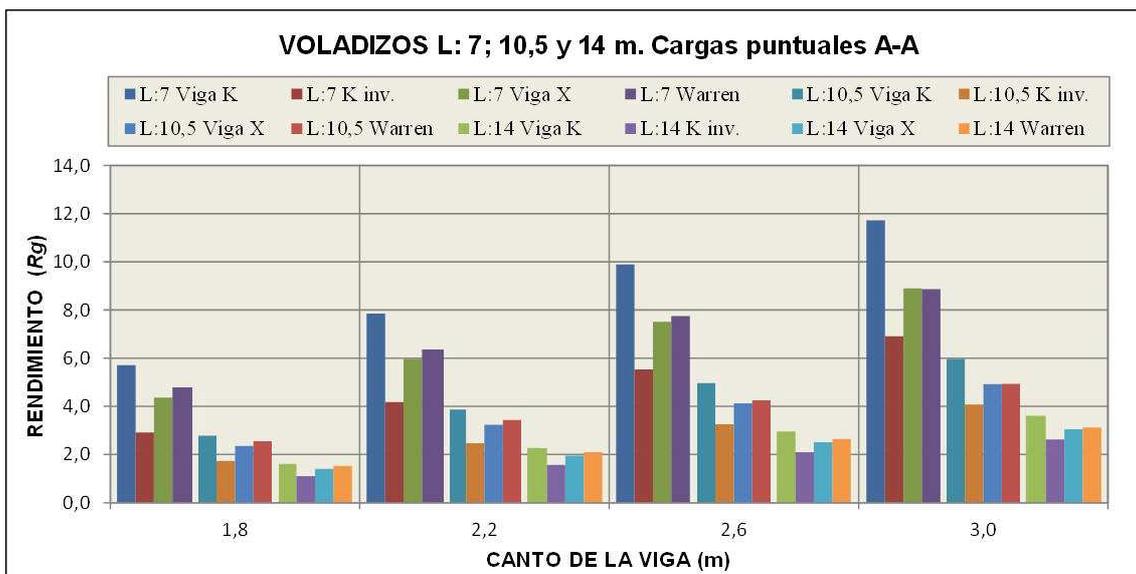


Figura 2.6-2. Rendimiento comparativo 1. Resumen resultados con cuatro tipologías de celosías con un voladizo de 7.0, 10.5 y 14.0 m con cargas puntuales en los nudos del cordón superior.

En las anteriores figuras 2.6-1 y 2.6-2, se muestran los resultados correspondientes al rendimiento de vigas de celosía biapoyadas en los extremos, para una luces de 14.0 m, 21.0 m y 28.0 m, mientras que en el caso de las vigas en voladizo, se muestran las luces de 7.0 m, 10.5 m y 14.0 m. Los resultados mostrados corresponden a las cuatro tipologías más representativas de todos los modelos analizados en el primer estudio comparativo, realizando especialmente aquellas que han obtenido un resultado más significativo.

Estudio comparativo final 2: peso propio celosías analizadas para una misma limitación de deformación.

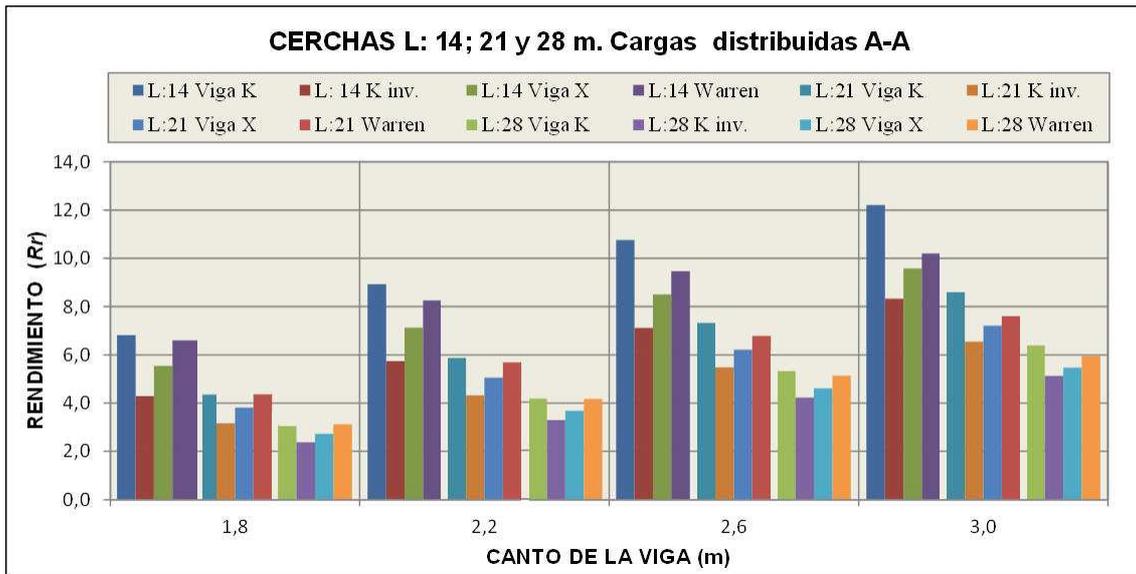


Figura 2.6-3. Rendimiento comparativo 2. Resumen resultados con cuatro tipologías de celosías biapoyadas en los extremos para unas luces de 14.0, 21.0 y 28.0 m con cargas distribuidas en el cordón superior.

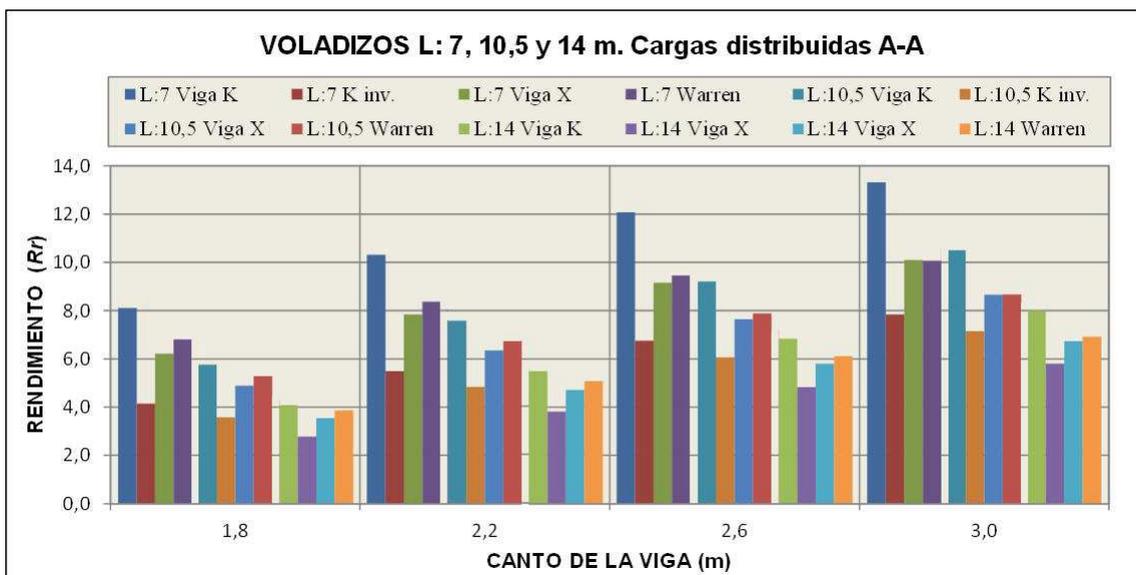


Figura 2.6-4. Rendimiento comparativo 2. Resumen resultados con cuatro tipologías de celosías en voladizo para unas luces de 7.0, 10.5 y 14.0 m con cargas distribuidas en el cordón superior.

En las anteriores figuras 2.6-3 y 2.6-4, se muestran los resultados correspondientes al rendimiento de vigas de celosía biapoyadas en los extremos, para una luz de 14.0 m, 21.0 m y 28.0 m, mientras que en el caso de las vigas en voladizo, se muestran las luces de 7.0 m, 10.5 m y 14.0 m. Los resultados mostrados corresponden a las cuatro tipologías más representativas de todos los modelos analizados en el segundo estudio comparativo, realizando especialmente aquellas que han obtenido un resultado más significativo.

Estudio comparativo final 3: peso propio celosías analizadas para una misma «resistencia equivalente» de las barras.

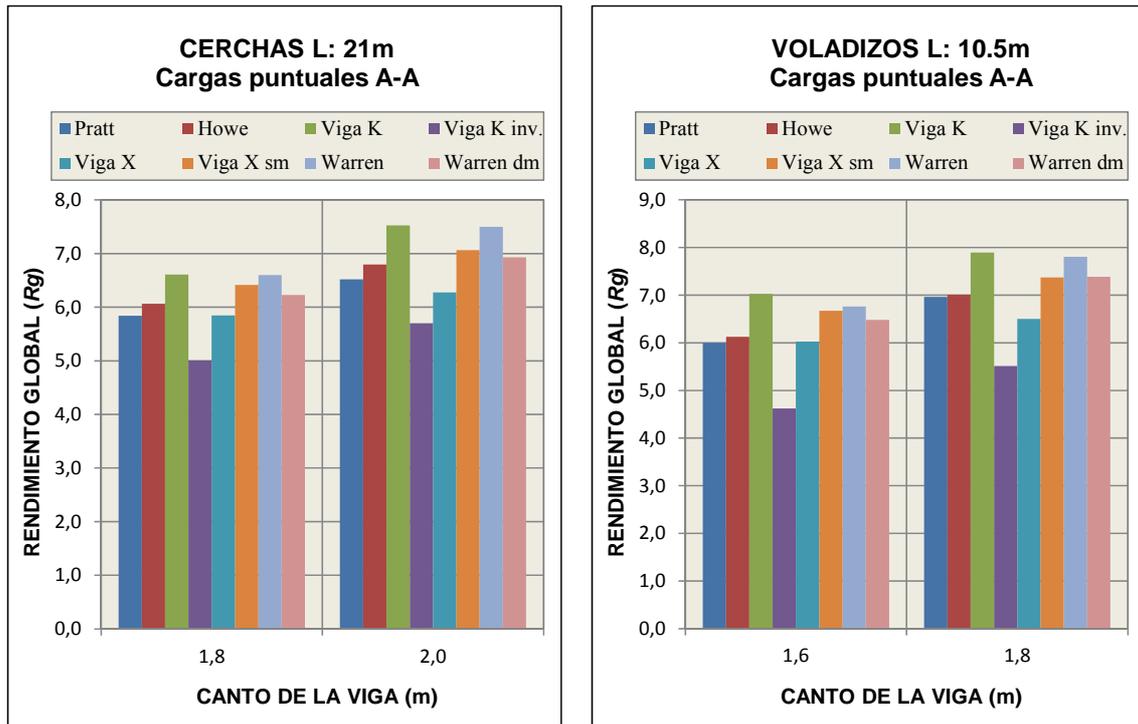


Figura 2.6-5. Rendimiento estudio 3. Resumen resultados de ocho celosías de 21.0 m biapoyadas y 10.5 m en voladizo para cargas puntuales en los nudos del cordón superior. Uniones articuladas A-A en los extremos de las barras de relleno.

En la figura 2.6-5 se presentan los resultados correspondientes al rendimiento estructural de vigas de celosía biapoyadas en los extremos, para una luz de 21.0 metros, mientras que en el caso de las vigas en voladizo, se muestran los resultados para una luz de 10.5 metros para las ocho geometrías analizadas.

De acuerdo a los resultados expuestos en este epígrafe, se extraen las conclusiones finales del presente capítulo en base a los estudios comparativos realizados acerca del rendimiento estructural de vigas de celosía:

- La influencia en el rendimiento estructural de vigas de celosía, con cargas uniformemente distribuidas aplicadas en los cordones superiores frente a cargas puntuales equivalentes en los nudos, no es significativa. Para los casos estudiados, tanto para estados límite de servicio como para estados límite últimos, la pérdida de rendimiento en el caso de cargas distribuidas ha sido del orden del 2%.

Asimismo, la disminución del rendimiento estructural de celosías de acuerdo de sus barras de relleno se articulen, o no, en los extremos, ha sido del mismo

orden que en el caso anterior, inferior a un 2%, de forma que se trata de una opción de cálculo que no influye de forma relevante en los resultados obtenidos. Por ello, para los estudios modelizados, se han articulado las barras de relleno, disminuyendo así los momentos flectores y, en consecuencia, los esfuerzos de cortante.

Ambos resultados demuestran que, el hecho de modelizar y analizar celosías con cargas puntuales o distribuidas con barras articuladas o rígidas, la influencia es prácticamente despreciable. Sin ir más lejos, las decisiones tomadas en el diseño de vigas de celosía en estos aspectos no irán vinculados al análisis, sino que dependerán de los aspectos constructivos y económicos de dichas armaduras.

- En todos los comparativos realizados, los resultados obtenidos con limitación de deformaciones (estados límite de servicio) y limitación de tensiones (estados límite últimos), se han obtenido los mismos resultados de rendimiento para las distintas triangulaciones analizadas. Con ello, se confirma que ambos «parámetros de control» son válidos para determinar el rendimiento global y resistente de estructuras de entramado, en este caso, para estructuras de celosía.
- Las celosías cuyo diseño identifica las líneas isostáticas de los elementos resistentes de alma llena equivalentes tienen un mejor rendimiento y, por lo tanto, eficiencia estructural. En este sentido, generalmente, las celosías que ofrecen un mejor comportamiento estructural son la viga “en K”, la viga Warren y la viga “en X” sin montantes, tanto en vigas biapoyadas como en vigas en voladizo, con un rendimiento superior de hasta el 30-45% con respecto a las armaduras de menor rendimiento y de un 10-15% con respecto a al rendimiento promediado para todas las triangulaciones de un mismo estudio comparativo.

En las figuras 2.6-6 y 2.6-7 se muestran las geometrías de las viga “en K”, las cuales ofrecen, por lo general, un mejor rendimiento estructural, ya que la orientación de sus barras de relleno permite que los esfuerzos axiales se transmitan de forma más “lógica” y racional, de acuerdo a la estructura arco-tirante y a las líneas isostáticas, las cuales se muestran en las figuras 2.6-8 y 2.6-9, obteniendo, así, estructuras más óptimas y eficientes.

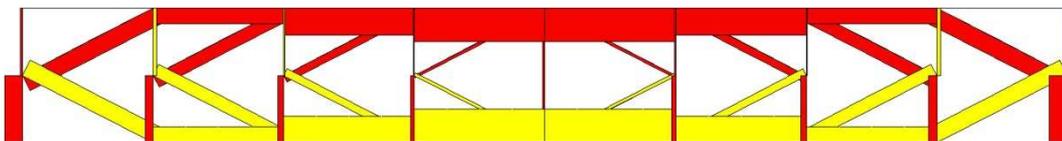


Figura 2.6-6. Diagrama de esfuerzos axiales de la viga “en K” con apoyos en los extremos de luz L: 14.0 m y canto H = 1.8 m.

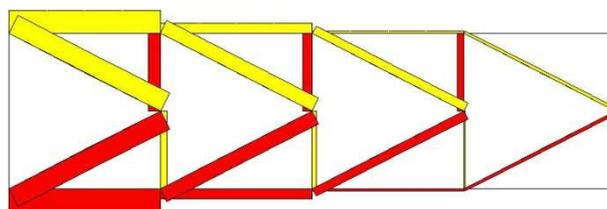


Figura 2.6-7. Diagrama de esfuerzos axiales de la viga “en K” en voladizo de luz L: 7.0 m y canto H: 1.8 m.

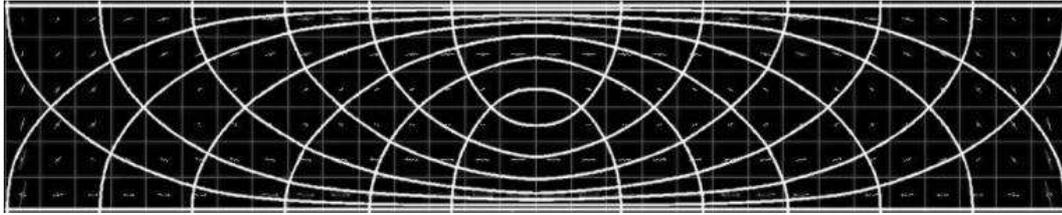


Figura 2.6-8. Líneas isostáticas de la viga biapoyada con carga distribuida en la parte superior. (Imagen propia adaptada del SAP 2000 v.15).

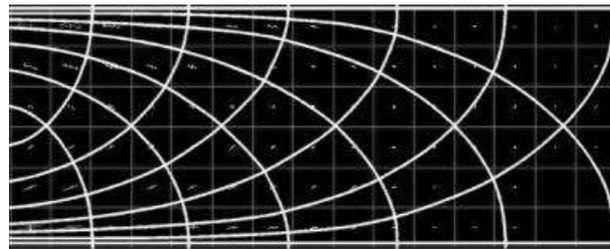


Figura 2.6-9. Líneas isostáticas de viga en voladizo con carga distribuida en la parte superior. (Imagen propia adaptada del SAP 2000 v.15).

En el mismo sentido, la viga Warren, la cual se muestra en la figura 2.6-10, merece una mención especial. Debido a su distribución de las barras y ligereza visual, también ofrece un rendimiento estructural elevado, muy parecido a la viga “en K”, e incluso en algunos casos, aunque de forma aislada, ofrece el mayor rendimiento. No obstante, es necesario destacar que la viga Warren tiene diagonales de grandes dimensiones, si lo comparamos con el resto de triangulaciones, trabajando a tracción y compresión alternativamente, con la limitación para estados límite últimos que ello conlleva. Sin embargo, el número de nudos que constituyen dicha celosía, hacen de ella, una tipología más económica que triangulaciones como la viga “en K” y la viga “en X”, compensando así el incremento de sección de las barras sometidas a compresión por efectos locales de pandeo.

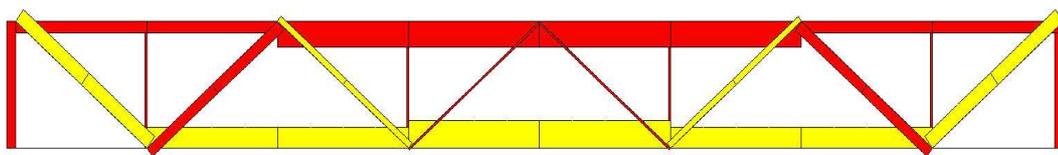


Figura 2.6-10. Diagrama de esfuerzos axiales viga Warren con apoyos en los extremos de luz L : 14.0 m y canto H : 1.8 m.

- Finalmente, destacar que las armaduras tienen un mejor comportamiento estructural cuando su geometría identifica la trayectoria de las direcciones principales y, en definitiva de las líneas isostáticas de los elementos resistentes de alma llena equivalentes de acuerdo al estado de cargas actuante.

En este contexto, es sumamente representativo comparar los resultados de la viga “en K” y la viga “en K invertida”. Para un mismo peso propio de las estructuras, el rendimiento de ambas geometrías es meridianamente opuesto, ya que en el caso de la viga “en K”, se obtiene un rendimiento superior del orden del 25-35% con respecto a la viga “en K invertida”, dependiendo de las dimensiones (luz y canto) consideradas.

2.7 Aplicación de los resultados obtenidos a estructuras de entramado espaciales

De acuerdo a los resultados obtenidos en los estudios comparativos realizados anteriormente, acerca del rendimiento estructural de armaduras, se desprende que la disposición de las barras de relleno influye de forma significativa en la eficiencia de las estructuras de entramado. En este contexto, de igual forma que se ha estudiado el comportamiento estructural de la viga “en K” y la viga “en K invertida” en dos dimensiones, se puede implementar este concepto de optimización, en base a la orientación de las barras según la trayectoria de las direcciones principales según sus solicitaciones, en el análisis de estructuras de mayor complejidad, como son, por ejemplo, las estructuras de entramado espaciales conformadas por vigas de celosía en las dos direcciones. En la figura 2.7-1 se muestran dos estructuras espaciales (armaduras en dos direcciones) con disposiciones de las barras “en K” y “en K invertida”, respectivamente, de acuerdo a las cargas gravitatorias actuantes.

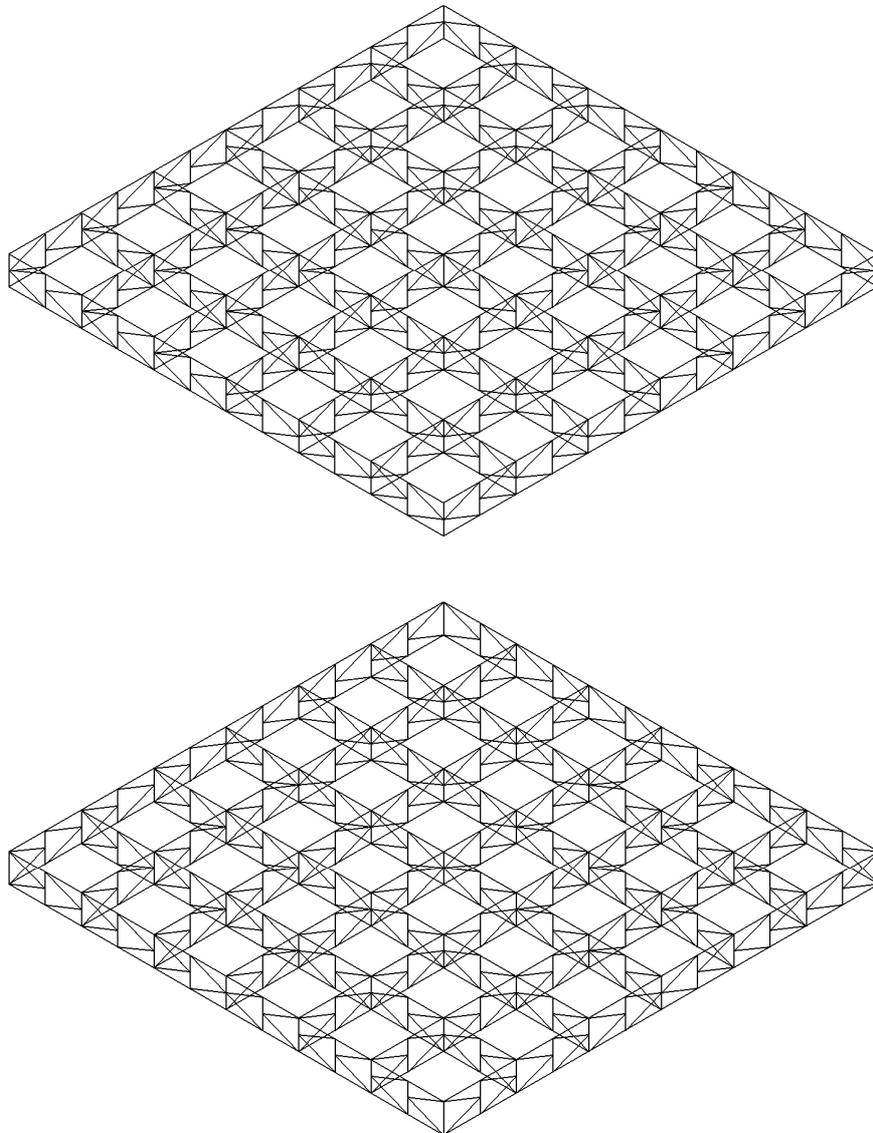
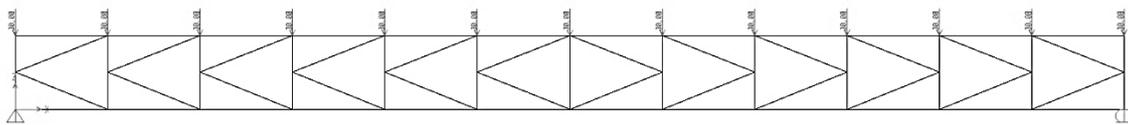


Figura 2.7-1. Esquemas mallas espaciales de celosías en dos direcciones (estructuras espaciales) con diagonales “en K” y “en K invertida” respectivamente según las solicitaciones actuantes.

Los sistemas estructurales espaciales de la figura 2.7-1 se proponen para realizar un comparativo básico sobre el rendimiento estructural de sistemas de entramado conforme a los estudios presentados, a modo de introducción al análisis de estructuras espaciales como sistemas estructurales envolventes de edificios en altura. El estudio de mallas envolventes, según su diseño arquitectónico y análisis estructural, se tratará posteriormente para abordar el objetivo fundamental del presente trabajo de investigación.

Se analizan y comparan los resultados (deformaciones para ELS) de dos mallas espaciales conformadas por celosías en dos direcciones para un mismo estado de cargas gravitatorias (definidas en las bases de cálculo del apartado 2.4.1), con una modulación de 2.5 m entre montantes, con unas dimensiones totales en planta de 30x30 m y para un canto constante de 2.5 m. Todas las barras son perfiles tubulares cuadrados (cordones: C-300x15 mm, barras de relleno: C-200x10 mm) y, por lo tanto, con las mismas características mecánicas a nivel sección, de forma que ambas estructuras se caracterizan por tener el mismo peso propio.

En la figura 2.7-2 se muestra el comportamiento estructural (deformaciones) de la malla espacial conformada por armaduras “en K”, es decir, con las diagonales orientadas de acuerdo a la estructura arco-tirante.



Desplazamiento vertical en el punto central (flecha máxima): 51,333 mm.

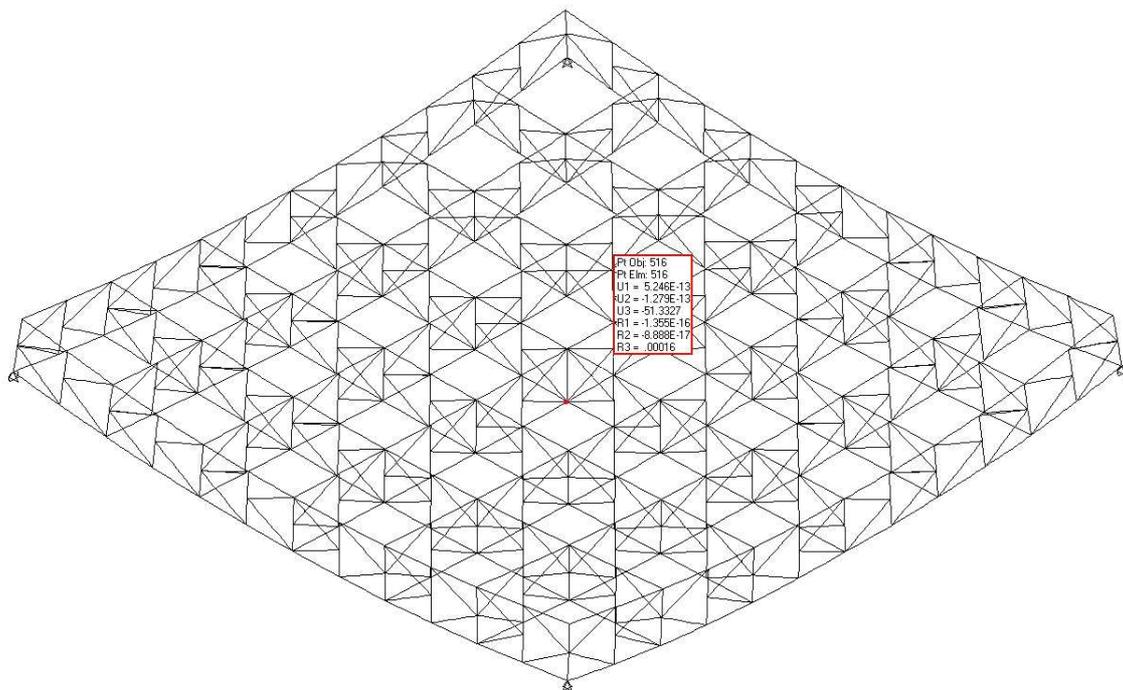
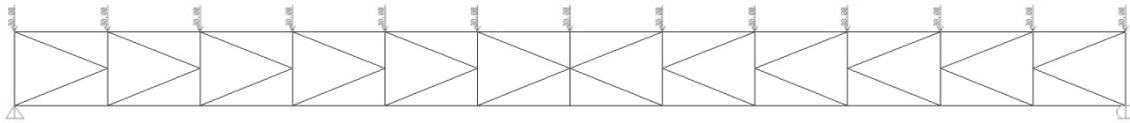


Figura 2.7-2. Comportamiento estructural (deformaciones) de la malla espacial conformada por armaduras “en K”, con las diagonales orientadas de acuerdo a la estructura arco-tirante. (Imagen propia tomada del SAP v.15).

En la figura 2.7-3 se muestra el comportamiento estructural (deformaciones) de la malla espacial conformada por armaduras “en K invertida”, es decir, con las diagonales no orientadas de acuerdo a la estructura arco-tirante.



Desplazamiento vertical en el punto central (flecha máxima): 63,610 mm.

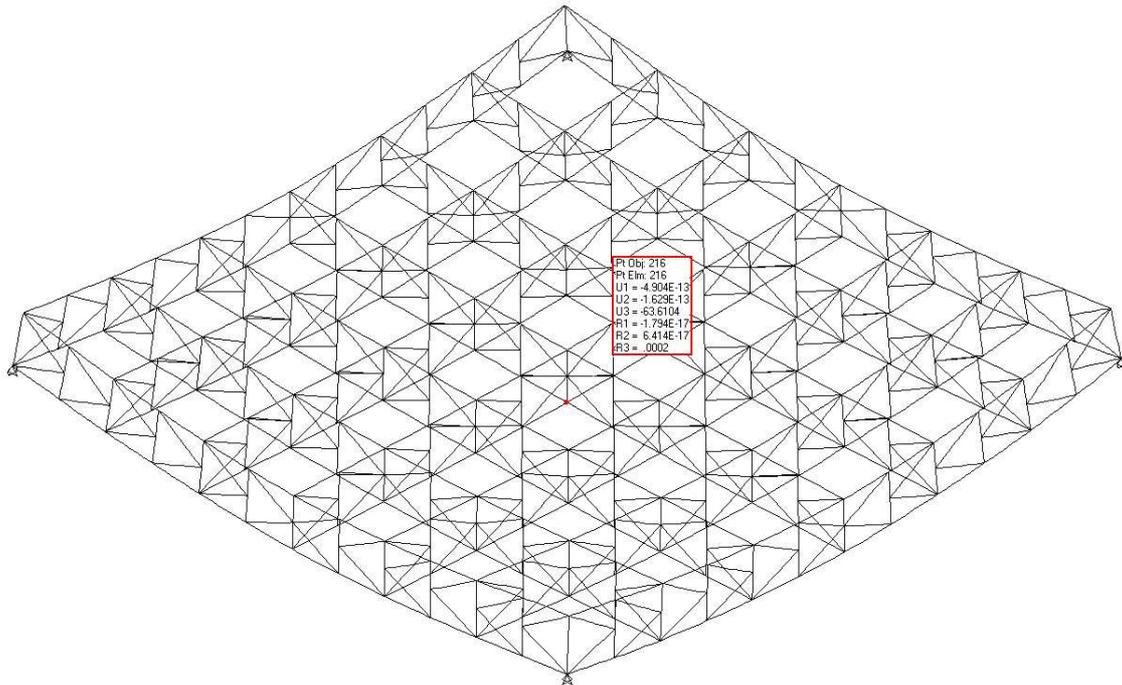


Figura 2.7-3. Comportamiento estructural (deformaciones) de la malla espacial conformada por armaduras “en K invertida”, con las diagonales no orientadas de acuerdo a la estructura arco-tirante. (Imagen propia tomada del SAP v.15).

De acuerdo a los resultados obtenidos según las mallas espaciales analizadas en el comparativo básico para un mismo estado de cargas, condiciones de equilibrio y cantidad de material resistente (peso propio estructuras), se desprende que en caso de la malla de armaduras “en K” el rendimiento se incrementa en un 23,9% ($63,610/51,333 = 1,239$) con respecto a la malla espacial “en K invertida”. Por lo tanto, de igual forma que en estructura de entramado en dos dimensiones (vigas de celosía), las estructuras espaciales malladas que adaptan su geometría a la trayectoria de las direcciones principales de los elementos equivalentes de alma llena, según sus solicitaciones, son más óptimas y eficientes.

Las mallas espaciales como elementos resistentes en arquitectura se exponen en el tercer capítulo, a través de un recorrido historicista de su evolución y utilización en distintos proyectos. Asimismo, su uso como sistema estructural envolvente en edificios en altura se tratará y analizará en los capítulos cuarto y quinto, abordando, así, el objetivo principal de la presente Tesis.