

INFLUENCIA DE LOS PARÁMETROS DE DISEÑO EN EL RENDIMIENTO ESTRUCTURAL DE VIGAS DE CELOSÍA

(THE INFLUENCE OF DESIGN PARAMETERS UPON THE STRUCTURAL EFFICIENCY OF TRUSSES)

Javier Estévez Cimadevila, Dr. Arquitecto; Emilio Martín Gutiérrez, Dr. Arquitecto
Escuela Técnica Superior de Arquitectura de A Coruña

Fecha de recepción. 16-V-02

ESPAÑA

422-29

RESUMEN

En el presente artículo se aborda el estudio del rendimiento estructural de vigas de celosía considerando las tipologías más usuales. Dicho rendimiento se estudia a través de dos índices, uno relativo al rendimiento resistente y el otro al rendimiento global, lo que nos permite valorar además su comportamiento desde el punto de vista de las deformaciones. El estudio es el resultado del cálculo y dimensionado de más de 1.000 vigas con diferentes condiciones, tanto en lo que respecta a la tipología escogida como al tamaño de módulo y canto empleados en la viga. Las gráficas elaboradas permiten una clara visualización del comportamiento de las diversas estructuras analizadas y de la incidencia que, en las mismas, tiene la variación de sus condiciones de diseño. En consecuencia, las conclusiones resultantes de las gráficas de comportamiento constituyen una herramienta de gran utilidad para la valoración cualitativa de la incidencia que tienen los parámetros analizados, de forma que sirvan de orientación al proyectista en la elección de la solución idónea.

SUMMARY

This article presents a study of structural efficiency of trusses taking into consideration the most usual typologies. The above mentioned efficiency is studied by means of two indexes, one of them in relation to the resistant efficiency and the other one in relation to the global efficiency, that also permits us to evaluate its behaviour from the point of view of deformations. This study is the result of calculus and dimensioning of more than 1000 girders of different conditions, regarding the chosen typology as well as the module size and the thickness used in the girder. The worked out diagrams give us a clear visualization of the behaviour of various analyzed structures and the effect of variation of design conditions upon them. As a consequence, the conclusions resulting from the behaviour diagrams constitute a tool of great usefulness for qualitative evaluation of the effect that have the analyzed parameters which would serve as an orientation for the project maker to choose the ideal solution.

1. INTRODUCCIÓN

La utilización de vigas de celosía está ampliamente extendida como tipo estructural adecuado para la resolución de cubiertas ligeras de luces medias. Las triangulaciones más empleadas son las conocidas Warren, Pratt, Howe y viga en K. Una solución de amplia difusión, pese a su carácter hiperestático, es la triangulación en cruz de S. Andrés, si bien este tipo circunscribe fundamentalmente su uso al campo de los arriostramientos, empleando diagonales de gran esbeltez de modo que su colaboración sólo se produzca bajo las solicitaciones de tracción. Finalmente, otras tipologías como las vigas de enrejado, la denominada Petit y otras soluciones análogas de triangulación más comple-

ja están claramente en desuso por su mayor dificultad constructiva.

El cálculo de este tipo de estructuras es notablemente sencillo una vez que se han establecido los parámetros de diseño de la celosía. Básicamente, dichos parámetros son tres:

- Tipo de triangulación de los recuadros o módulos.
- Dimensión del recuadro.
- Canto de la celosía.

Habitualmente la elección de estos parámetros, especialmente el referido a la tipología de triangulación emplea-

da, obedece a razones de tipo estético o de conformación del espacio arquitectónico y no a requisitos de índole estructural, que luego se satisfacen con un adecuado dimensionado de la estructura. En otras ocasiones, la decisión respecto a los citados parámetros obedece a intuiciones estructurales del proyectista o a criterios comúnmente aceptados de relaciones canto/luz, criterios no suficientemente contrastados y cuantificados. El objetivo del presente artículo consiste, precisamente, en mostrar la incidencia que tienen, desde un punto de vista de rendimiento estructural, la elección de los criterios de diseño aludidos.

Al objeto de acotar el análisis realizado, el estudio comparativo se circunscribe al campo de las vigas de celosía de canto constante. La consideración de vigas de canto variable introduciría una casuística todavía mayor que merece ser objeto de un estudio independiente.

2. BASES DE CÁLCULO

Para abordar el estudio comparativo se ha procedido al cálculo y dimensionado de más de 1.000 celosías de acuerdo con el siguiente criterio:

1.1. Luz considerada

Se ha considerado el cálculo para una luz entre apoyos extremos de 24 m. Asimismo, se han recalculado numerosos ejemplos para luces diferentes a la señalada, al objeto

de verificar que las conclusiones extraídas son válidas con carácter general. Obviamente los resultados numéricos correspondientes a los valores de rendimiento definidos en el punto 3 varían con la luz de la celosía si bien, en términos comparativos, las conclusiones son válidas en el ámbito de las luces medias.

2.2. Tipologías de triangulación consideradas

Pratt, Howe, viga K, Warren, y 3 tipos de Warren con montantes adicionales (Figura 1).

2.3. Dimensión de recuadros

A partir de la luz entre apoyos extremos señalada, se han considerado 5 tipos que gradúan el paso desde una modulación densa y tupida a una solución muy diáfana. Las dimensiones de los recuadros se derivan del establecimiento de un número entero de recuadros válido para todas las tipologías analizadas. De los criterios anteriores resulta la siguiente secuencia de módulos: L/14, L/12, L/10, L/8 y L/6 (Figura 2).

2.4. Canto de las vigas

Se han analizado un total de 7 cantos cuya secuencia es: L/16.00, L/13.33, L/11.43, L/10.00, L/8.89, L/8.00 y L/7.27. Ello permite una casuística con soluciones cuya esbeltez cubre un amplio espectro.

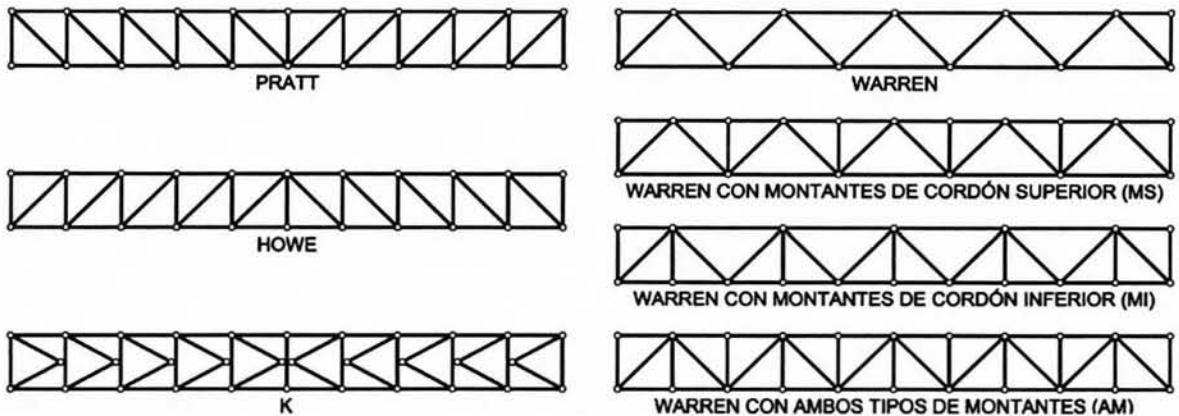


Figura 1.- Tipología analizada.

	L / 14	L / 12	L / 10	L / 8	L / 6
L / 7,27					
L / 8,00					
L / 8,89					
L / 10,00					
L / 11,43					
L / 13,33					
L / 16,00					

Figura 2.- Casos analizados para cada tipología.

2.5. Acciones consideradas

Se han considerado las siguientes cargas, que se corresponden con una solución tipo de cubierta ligera.

- Cargas permanentes: 50 kg/m².
- Sobrecargas: 50 kg/m².

Dichas cargas se han aplicado a la estructura en dos situaciones distintas:

- Como cargas puntuales actuando en los nudos del cordón superior.
- Como carga lineal uniformemente repartida en el cordón superior. Esta hipótesis se ha utilizado para cubrir aquellos casos en que el apoyo de las correas no se produzca en los nudos de la estructura, situación ésta que puede plantearse cuando el módulo empleado tiene una elevada dimensión o cuando el material de cobertura exige una reducida separación entre correas.

6.6. Cálculo de solicitaciones y criterios de dimensionado

El cálculo de solicitaciones se ha realizado por métodos matriciales para estructuras de barras articuladas en los nudos, aplicando un proceso iterativo en orden a obtener, para cada barra, el perfil de mínimo peso dentro de la serie escogida. Los diagramas envolventes se han obtenido utilizando los coeficientes de ponderación correspondientes a la hipótesis de carga referenciada como Caso I en la NBE-EA95. En la obtención de las solicitaciones se ha prescindido de la posible incidencia que pudiera tener la solución constructiva concreta de las uniones (grado de rigidez, posibles excentricidades, etc.).

La determinación de secciones se ha realizado de acuerdo con la NBE-EA95, supuesto acero S275, con arreglo a los siguientes criterios:

- Se ha tenido en cuenta en todos los casos la flexión debida al peso propio de las barras, aún cuando la NBE sólo exige su consideración en barras que superen los 6 m de longitud.
- Los coeficientes de pandeo se han establecido de acuerdo con la citada norma, partiendo de la hipótesis según la cual todos los nudos tienen coaccionado el desplazamiento perpendicular al plano de la estructura.
- Se ha adoptado para todas las estructuras perfiles tubulares huecos de la serie europea de sección circular. Dicha elección se fundamenta en que la utilización de otros tipos de perfiles que no satisfagan la condición de simetría radial de los tubulares redondos, introduciría un nuevo parámetro que afecta al rendimiento estructural. Esto es, dependiendo de la posición relativa de la sección respecto al eje de

la barra resultarían diferentes radios de giro y módulos resistentes con respecto a los ejes principales de inercia.

En la obtención de las secciones se han contemplado dos casos diferentes:

- Dimensionado de todas las barras eligiendo el perfil de mínimo peso, dentro de la serie europea de perfiles, que cumpla con todas las condiciones de dimensionado en estado límite último.
- Igual criterio al señalado pero con la consideración de que tanto el cordón superior como el inferior, independientemente uno de otro, tengan igual sección a lo largo de toda la luz de la estructura. Este criterio se ha aplicado puesto que responde más fielmente a la realidad constructiva imperante.

La combinación de los cinco tipos de módulos, las siete variaciones de canto, los dos casos de carga y los criterios de dimensionado aludidos, elevan a 140 el número de estructuras analizadas para cada tipología.

2.7. Limitaciones de deformación

En el presente estudio no se han establecido consideraciones de deformación en los criterios de dimensionado. Ello, no obstante, no supone ninguna restricción a la interpretación de los resultados por cuanto la limitación normativa de $L/250$, establecida para vigas de cubierta, se satisface en todas las estructuras analizadas, salvo casos extremos claramente inadecuados. Además, la consideración del rendimiento global que se define en el apartado siguiente tiene en cuenta la rigidez a flexión con lo que pueden extraerse las pertinentes conclusiones al respecto.

3. EVALUACIÓN DE RENDIMIENTOS

Al objeto de dar una interpretación generalista de los resultados obtenidos en las estructuras analizadas, se han definidos dos parámetros:

· Rendimiento resistente R_r

Se trata de un parámetro adimensional que relaciona el peso de la estructura con la carga soportada. Se define como:

$$R_r = \alpha \cdot \frac{Q}{P}$$

- α = coeficiente constante de ajuste a la escala de ordenadas.
- Q = Carga total aplicada a la estructura.
- P = Peso total de la estructura.

· Rendimiento global Rg

Se trata de un parámetro adimensional que tiene en cuenta tanto el rendimiento resistente como la rigidez a flexión, al objeto de tener una visión más global de la estructura analizada. Se define como:

$$R_g = \beta \cdot R_r \cdot \frac{L}{f}$$

β = coeficiente constante de ajuste a la escala de ordenadas.

L = Luz del vano.

f = Flecha en el punto medio.

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

1.1. Tipo de triangulación

En este análisis vamos a interpretar los resultados obtenidos prescindiendo de la incidencia que puedan tener los otros dos parámetros de diseño. En primer lugar, podemos observar en las Figuras 3 a 8 los rendimientos resistentes correspondientes a dos casos de carga (puntual y uniforme) y a tres tamaños de módulos (desde el más tupido al más diáfano, con uno intermedio entre ambos). Prescindimos, por tanto, en este análisis de consideraciones de deformación.

A los efectos de entendimiento de los gráficos aportados, la nomenclatura utilizada se muestra en el cuadro 1.

Los resultados son bastante concluyentes:

Si analizamos la casuística para cargas puntuales, la solución de viga K es notoriamente menos efectiva en todos los casos. Si empleamos una dimensión de módulo pequeña, lo que conduce a un alma muy tupida, las restantes tipologías se agrupan con diferencias relativamente pequeñas. Ahora bien, esta situación no es razonable por cuanto incrementa el coste de ejecución debido al elevado número de nudos. A medida que incrementamos el tamaño del módulo, se genera una nueva "segregación" de tipologías, descolgándose la Warren y la Warren con montantes al cordón inferior, de manera que presentan similares rendimientos la Pratt, Howe y las Warren con montantes al cordón superior y con ambos montantes. Ello nos pone de manifiesto que el que las diagonales estén

traccionadas o comprimidas no genera diferencias significativas de rendimiento, salvo con módulos y cantos muy elevados, por otra parte, no habituales. Si bien las gráficas son suficientemente explicativas al respecto, es importante señalar, para tener un orden de magnitud que, con los cantos y módulos habituales (en torno a L/10), las diferencias de rendimiento resistente se mueven en un entorno del 5%.

Si consideramos ahora el caso de carga uniforme se mantiene el bajo rendimiento de la viga K y vemos que las Warren que no disponen de montantes al cordón superior se ven claramente penalizadas por la flexión del cordón, lo que lleva a rendimientos muy bajos cuando empleamos módulos de dimensión elevada.

Para completar el panorama observemos los gráficos representados en las Figuras 9 a 14, donde se han plasmado los mismos resultados pero teniendo en cuenta también la rigidez a flexión, a través del rendimiento global. En estos casos, puede resultar sorprendente la pérdida de rendimiento de la viga Pratt, consecuencia de que la ligereza conseguida gracias al dimensionado a tracción de las diagonales conduce a deformaciones mayores al tener menores secciones resistentes. Por el contrario, las vigas Warren sin montante y las que tienen montante superior consiguen un elevado rendimiento.

Conviene poner de manifiesto, asimismo, el interés de los resultados correspondientes a las Figuras 10 y 13 relativas a módulos de tamaño medio, donde las diferencias de rendimiento global de las tipologías que hemos señalado como más adecuadas, son prácticamente despreciables.

En resumen, podemos concluir:

- Si el problema es exclusivamente resistente y podemos disponer de correas que transmitan las cargas en los nudos, las tipologías idóneas son la Pratt, la Warren con montante superior y la Warren con ambos montantes.
- Si el problema es resistente pero los apoyos de correas no coinciden con los nudos de la estructura podríamos considerar, además de las anteriores, la tipología Howe.
- Si el problema no sólo es resistente sino también de deformaciones, o si pretendemos conseguir el máximo rendimiento manejando simultáneamente ambos conceptos, deberíamos considerar la Warren y las Warren con montante superior o ambos montantes, cuando las cargas se encuentran aplicadas en los nudos, prescindiendo de la

CUADRO 1

Rr: Rendimiento resistente	M1: Dimensión del módulo M=L/14
Rg: Redimiento global	M2: Dimensión del módulo M=L/10
Cp: Cargas puntuales en nudos	M3: Dimensión del módulo M=L/6
Cu: Carga uniforme en cordón superior	H1 Canto de la celosía H=L/16
Cc: Cordones con dimensionado uniforme	H2 Canto de la celosía H=L/10
Ce: Cordones con dimensionado estricto	H3 Canto de la celosía H=L/7.27

Warren sin montantes, si las cargas generan flexión en el cordón superior.

Finalmente, tenemos que señalar que se han completado los estudios anteriores recalculando las vigas con el crite-

rio de un dimensionado estricto de cordones. Si bien se trata de una solución inusual tanto por razones de tipo estético como constructivo, tenemos que manifestar que los resultados obtenidos siguen validando las conclusiones expresadas.

Figura 3.- Rendimiento resistente. Rr-Cp-Cc-M1.

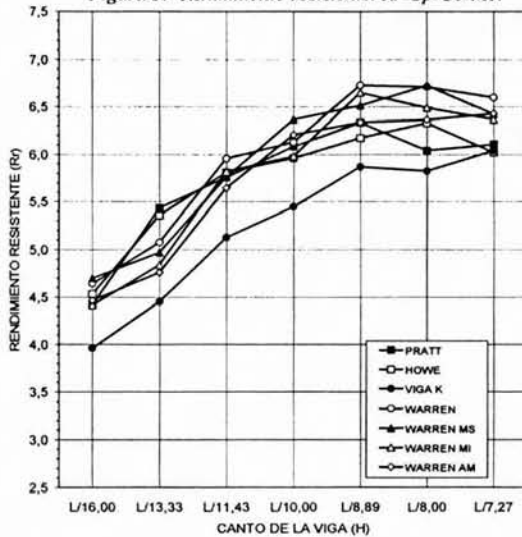


Figura 6.- Rendimiento resistente. Rr-Cu-Cc-M1.

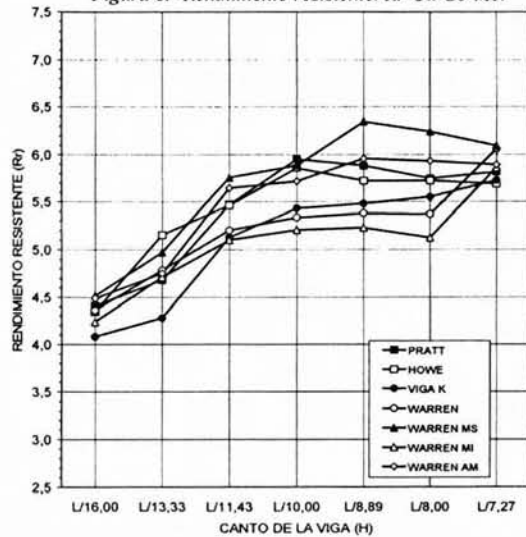


Figura 4.- Rendimiento resistente. Rr-Cp-Cc-M2.

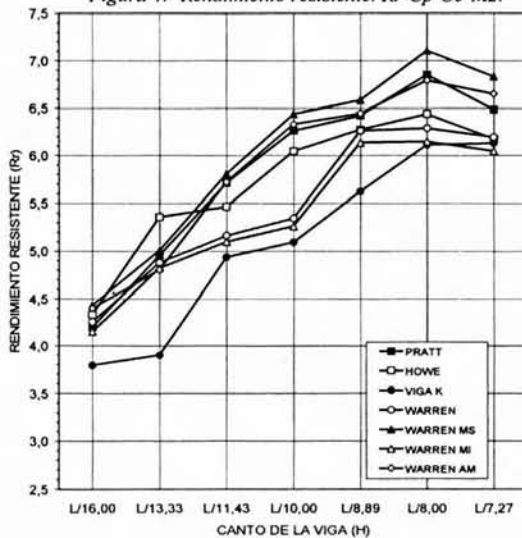


Figura 7.- Rendimiento resistente. Rr-Cu-Cc-M2.

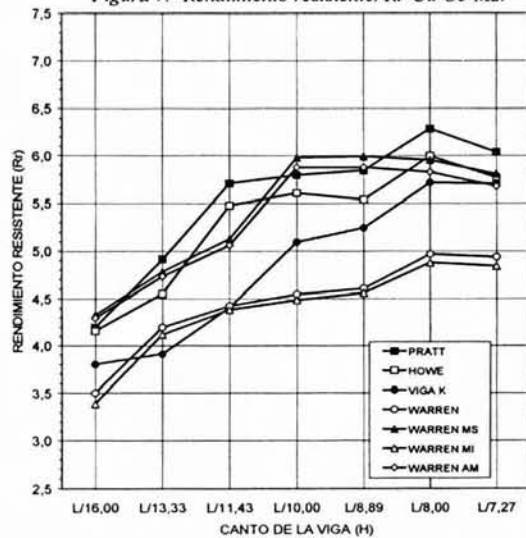


Figura 5.- Rendimiento resistente. Rr-Cp-Cc-M3.

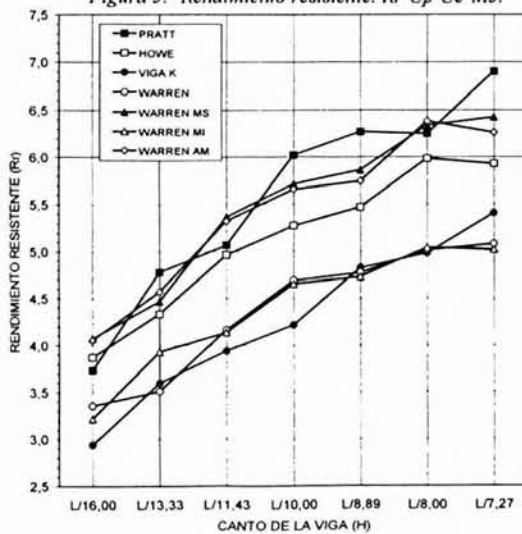
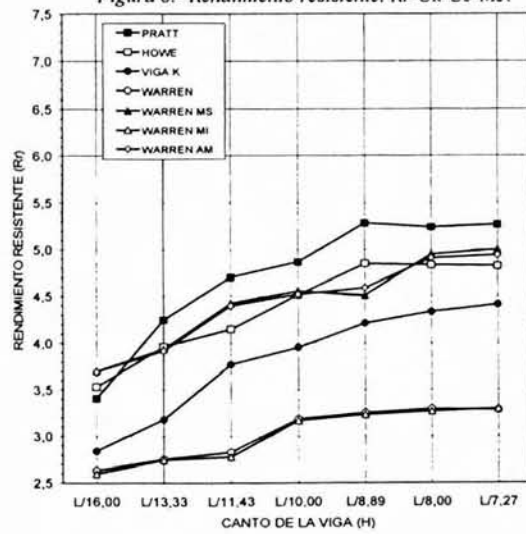
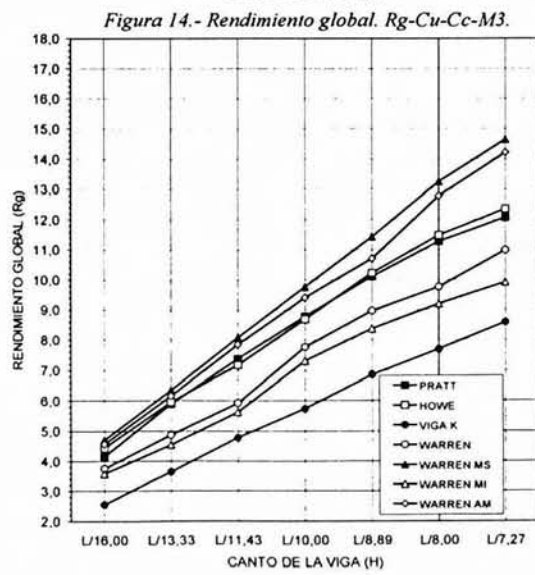
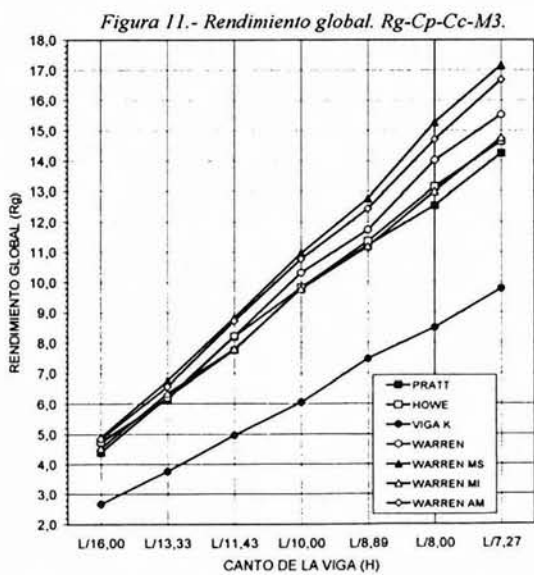
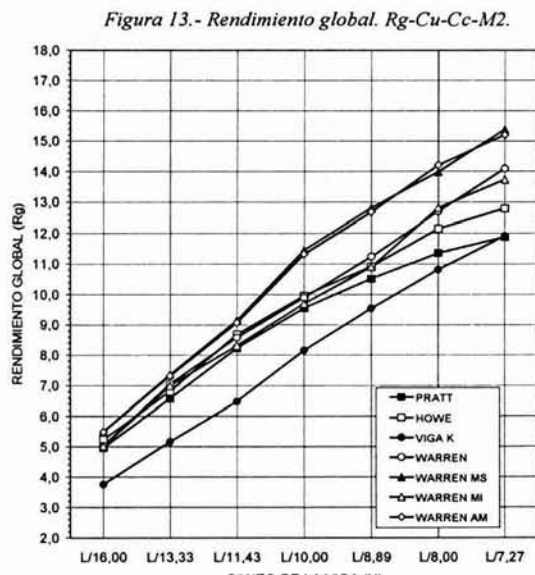
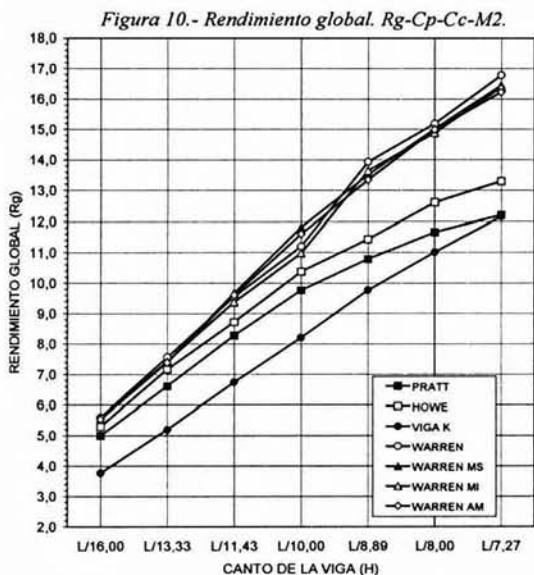
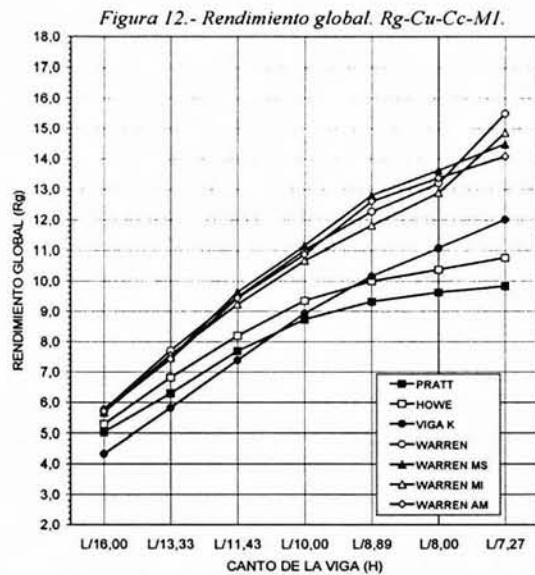
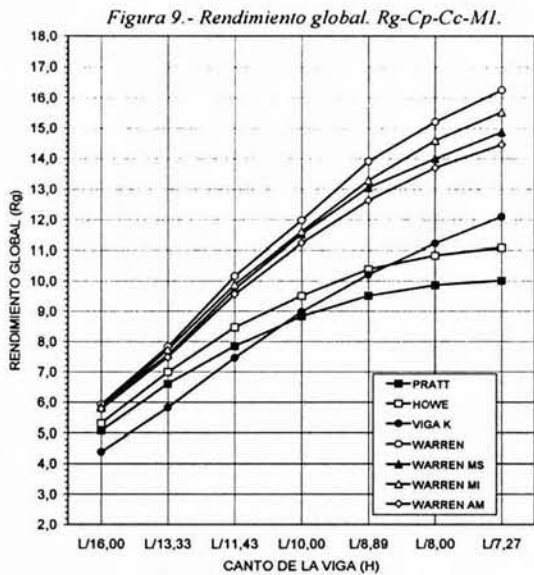


Figura 8.- Rendimiento resistente. Rr-Cu-Cc-M3.





4.2. Dimensión del recuadro

En el presente apartado, se analiza la incidencia de la modulación de la viga considerando, para cada tipología, siete tamaños de cantos diferentes y, alternativamente, un

dimensionado estricto de sus elementos o la consideración de continuidad en ambos cordones. Del análisis de las Figuras 15 a 20 se desprende que el rendimiento resistente se reduce de forma sensible a medida que aumenta la dimensión del módulo, aspecto que se muestra especial-

Figura 15.- Rendimiento resistente. Viga Pratt.

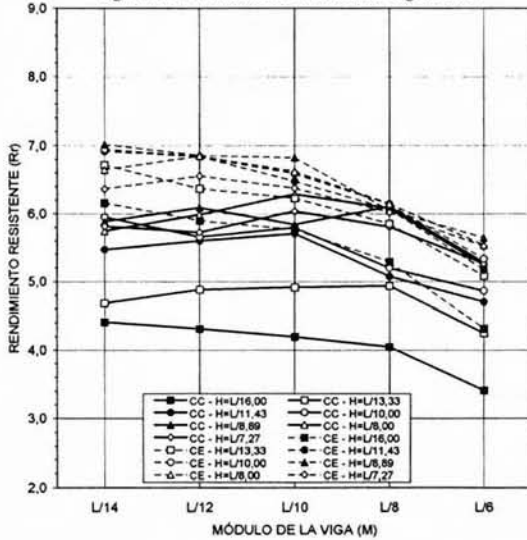


Figura 18.- Rendimiento resistente. Viga Warren.

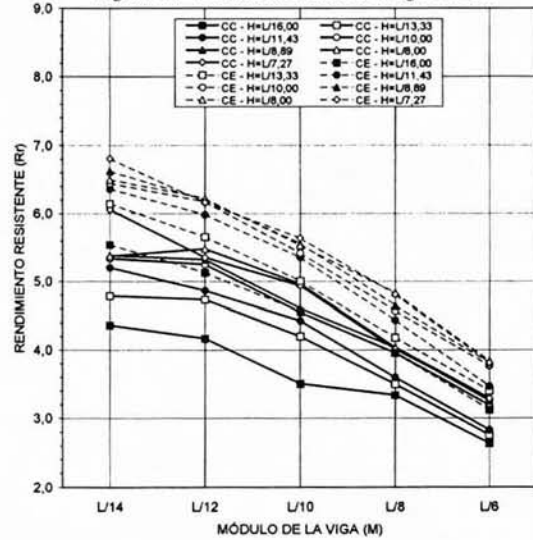


Figura 16.- Rendimiento resistente. Viga Howe.

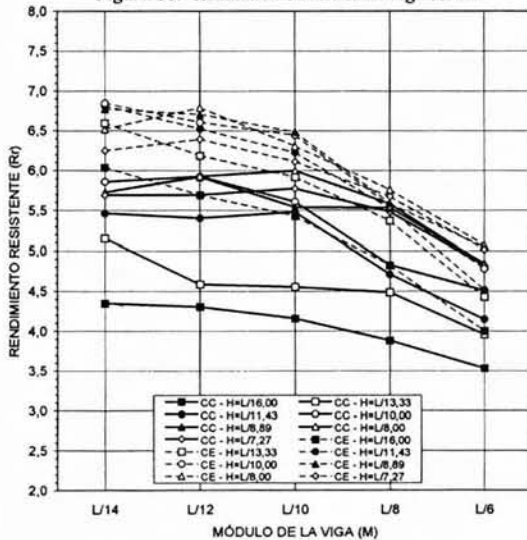


Figura 19.- Rendimiento resistente. Viga Warren MI.

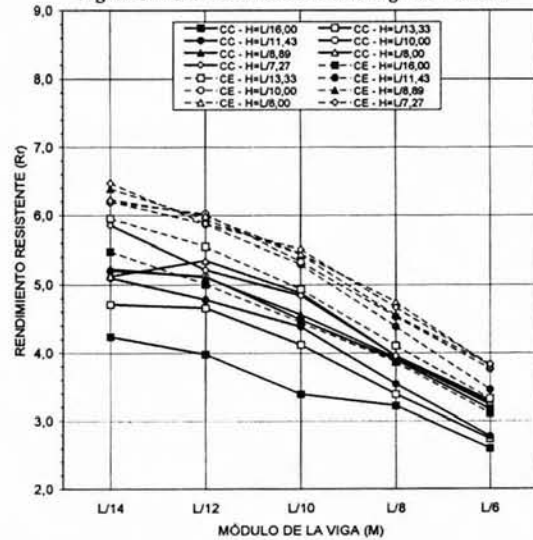


Figura 17.- Rendimiento resistente. Viga K.

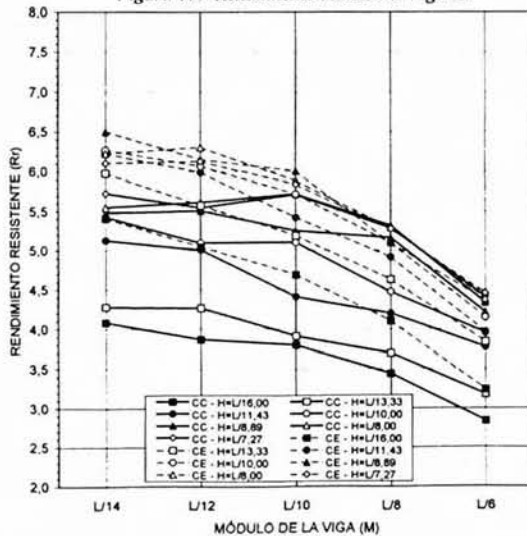
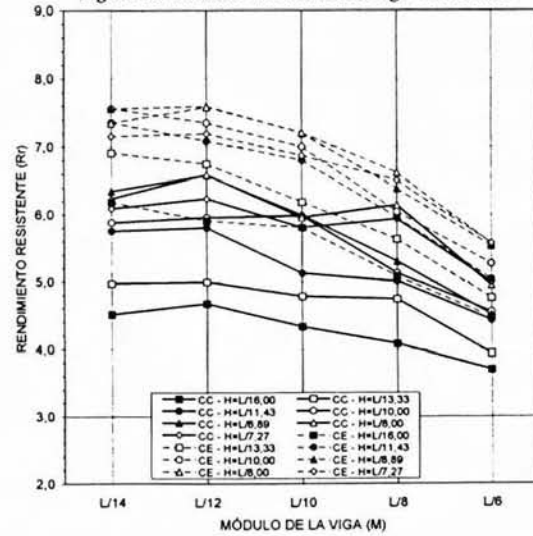


Figura 20.- Rendimiento resistente. Viga Warren MS.



mente pronunciado en el caso de las vigas K, Warren, y Warren con montantes a cordón inferior.

Por otra parte, el rendimiento global reseñado en las Figuras 21 a 26 no experimenta variaciones significativas, salvo para los casos antes citados, donde no parece conveniente acudir a una modulación que supere el valor medio ($L/10$).

Respecto a las diferencias existentes entre dimensionado estricto o con cordones continuos, tenemos que señalar que dicha diferencia es apreciable desde el punto de vista resistente, pues tendemos a alcanzar un estado equitensional en todas las barras. Sin embargo, este efecto se aminora apreciablemente cuando consideramos el rendimiento global, que tiene en cuenta el comportamiento frente a deformaciones, pues el sobredimensionado de cordones compensa en gran medida su incremento de peso con una menor deformación del conjunto. Teniendo en cuenta esto y considerando la simplicidad constructiva y la mejora estética que ello supone, parece claro que compensa el empleo de cordones continuos, criterio por otra parte habitual en las construcciones.

A la vista de los resultados obtenidos, se puede concluir que una dimensión de módulo medio (en torno a $L/10$) conjuga razonablemente los requisitos de diafanidad con unos adecuados rendimientos, especialmente en los tipos reseñados. Esto es, unas longitudes excesivas de cordón entre nudos consecutivos penalizan el comportamiento cualitativo del sistema, mientras que una excesiva

discretización no aporta mejoras significativas e incrementa el coste de ejecución de la estructura por el mayor número de uniones.

4.3. Canto de la celosía

El canto de la viga ha sido tradicionalmente uno de los parámetros de diseño más relevantes por su implicación en el comportamiento resistente y en la mayor o menor deformabilidad del sistema. Los resultados obtenidos reflejan, por regla general y como era previsible, que un incremento en dicha magnitud supone mejoras tanto en el rendimiento resistente (Figuras 27 a 32) como en el global (Figuras 33 a 38). No obstante, las diferencias en el primer parámetro resultan poco acusadas para valores superiores a la dimensión media ($L/10$), por lo que esta cifra puede ser un buen referente en la medida en que conlleva unos buenos rendimientos con una ocupación razonable del entramado estructural. Esta cuestión viene así a ratificar los criterios clásicos de predimensionado que suelen situar el canto necesario en torno al citado cociente.

Es interesante señalar un último aspecto que puede verificarse en las gráficas tanto de este apartado, como en las correspondientes al anterior. Puede observarse que, independientemente de la tipología escogida, las soluciones más idóneas se localizan en vigas con dimensiones de módulo y canto del mismo orden de magnitud, lo que por otra parte es claramente favorable desde el punto de vista constructivo, pues facilita la ejecución de los enlaces.

Figura 21.- Rendimiento global. Viga Pratt.

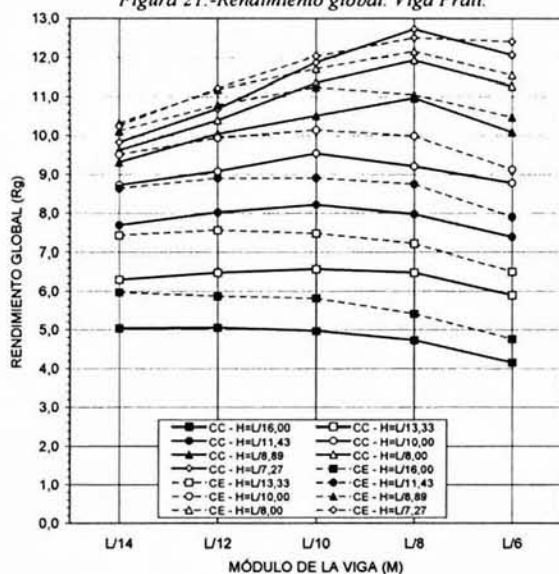


Figura 24.- Rendimiento global. Viga Warren.

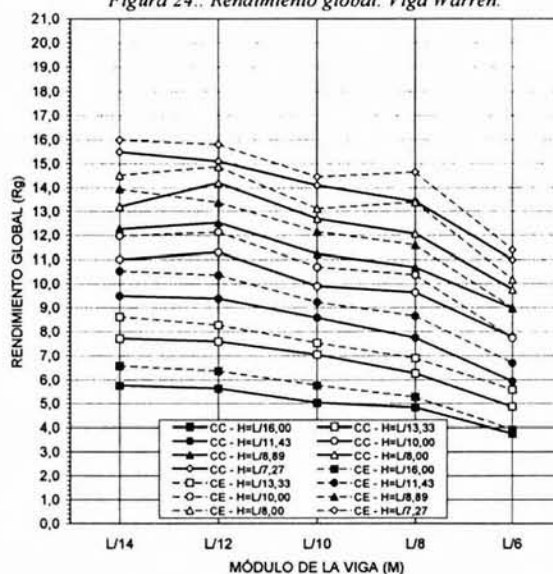


Figura 22.- Rendimiento global. Viga Howe.

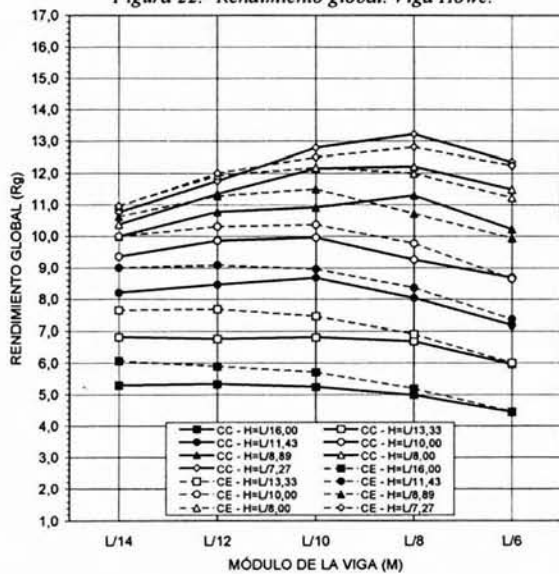


Figura 25.- Rendimiento global. Viga Warren MI.

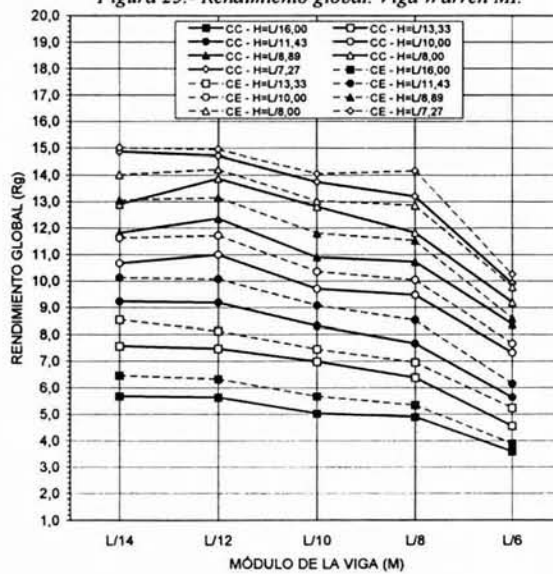


Figura 23.- Rendimiento global. Viga K.

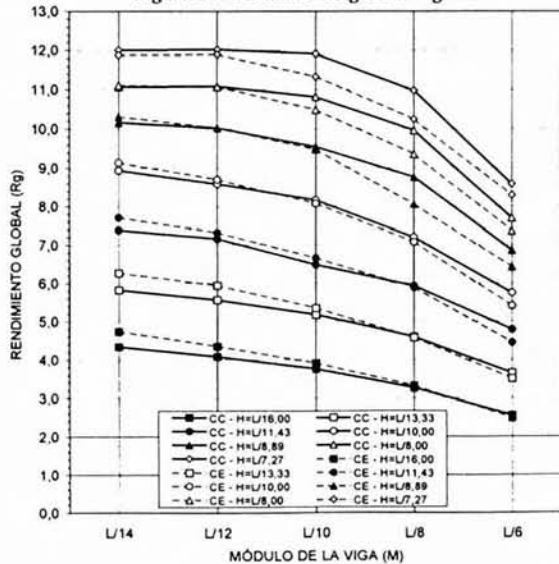


Figura 26.- Rendimiento global. Viga Warren MS.

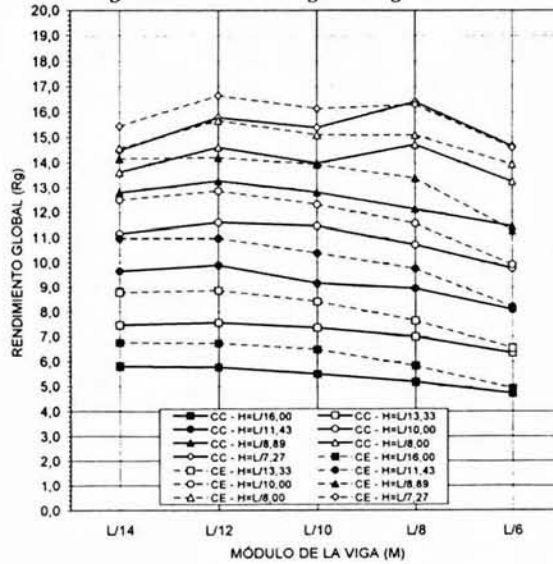


Figura 27.- Rendimiento resistente. Viga Pratt.

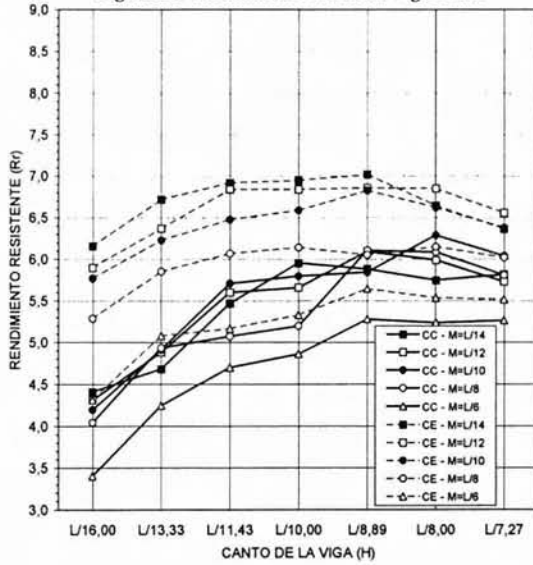


Figura 30.- Rendimiento resistente. Viga Warren.

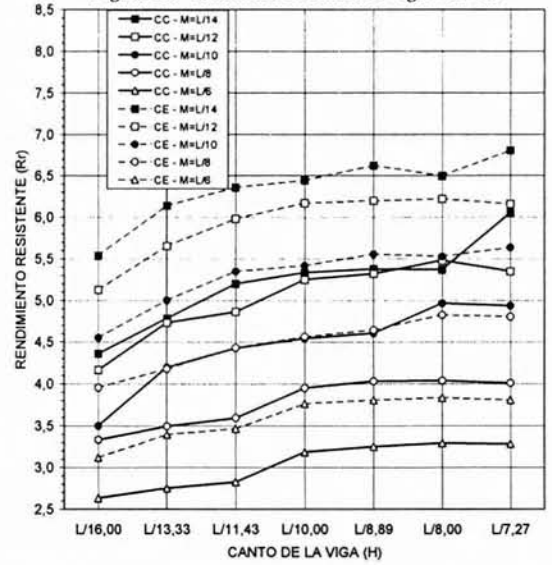


Figura 28.- Rendimiento resistente. Viga Howe.

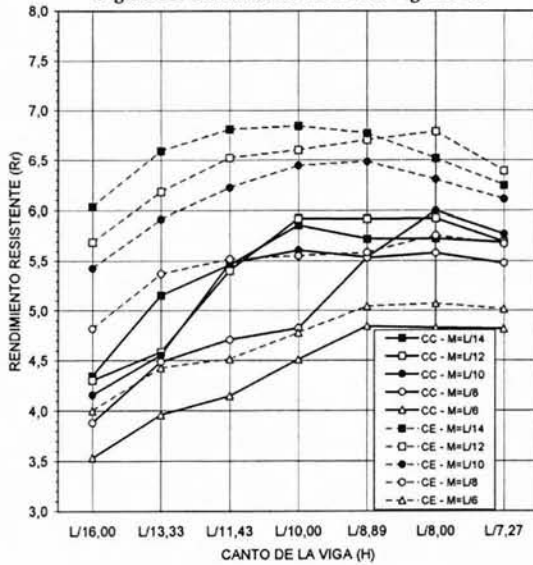


Figura 31.- Rendimiento resistente. Viga Warren MI.

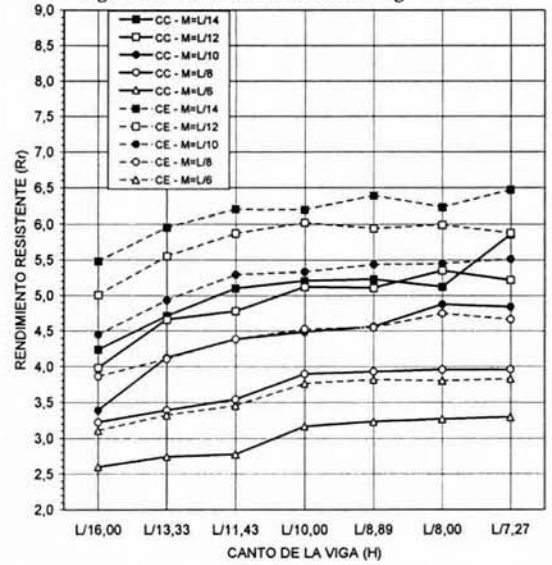


Figura 29.- Rendimiento resistente. Viga K.

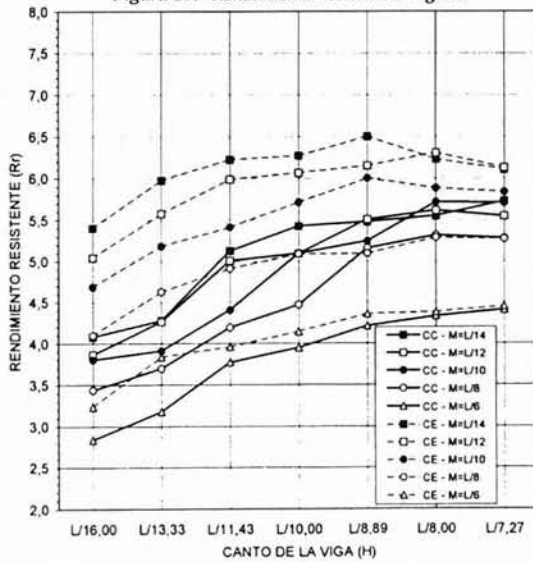


Figura 32.- Rendimiento resistente. Viga Warren MS.

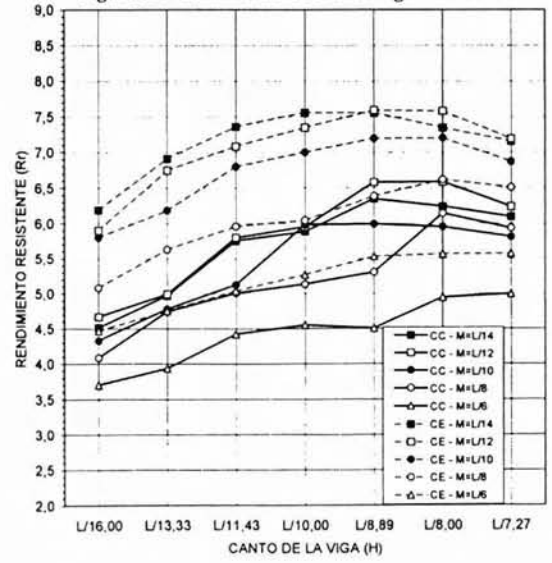


Figura 33.- Rendimiento global. Viga Pratt.

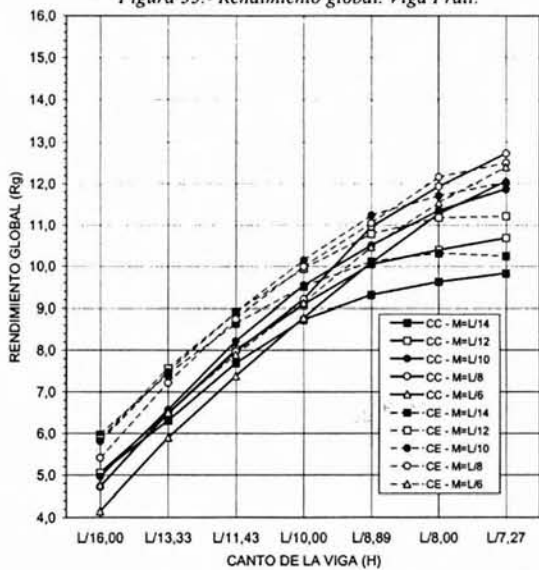


Figura 36.- Rendimiento global. Viga Warren.

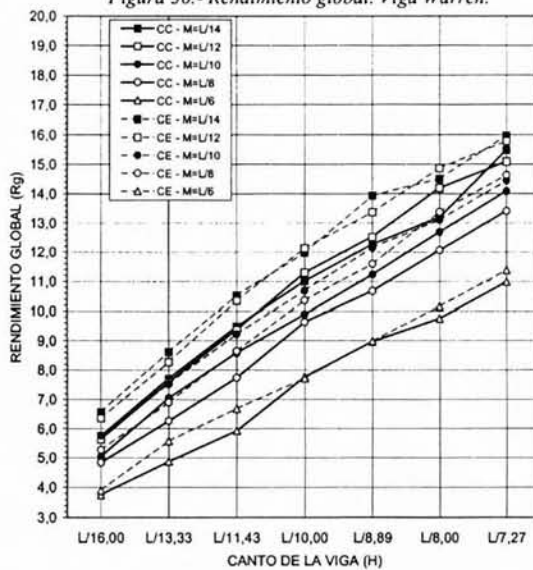


Figura 34.- Rendimiento global. Viga Howe.

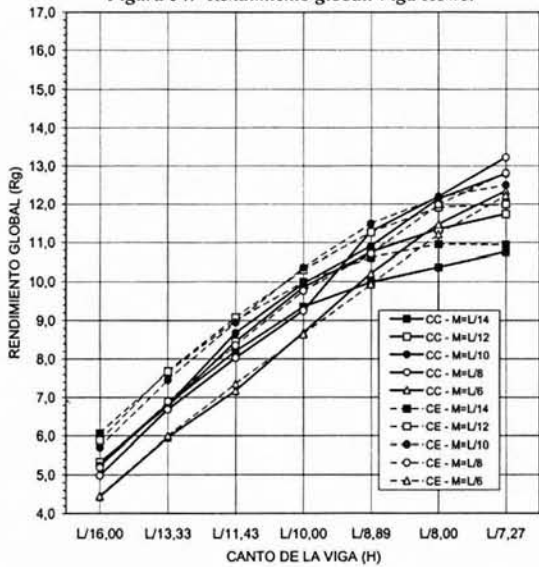


Figura 37.- Rendimiento global. Viga Warren MI.

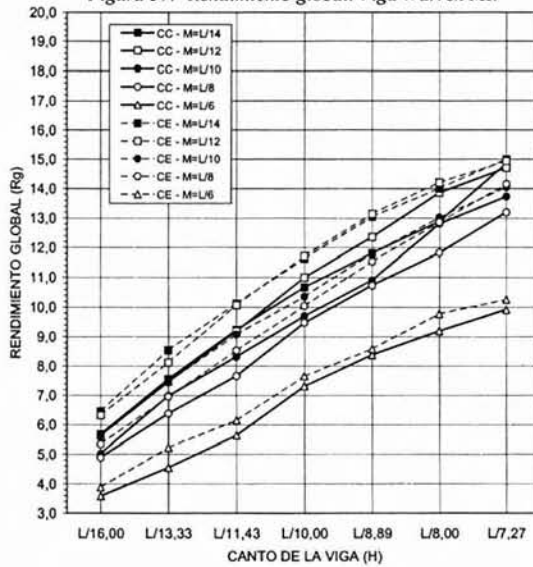


Figura 35.- Rendimiento global. Viga K.

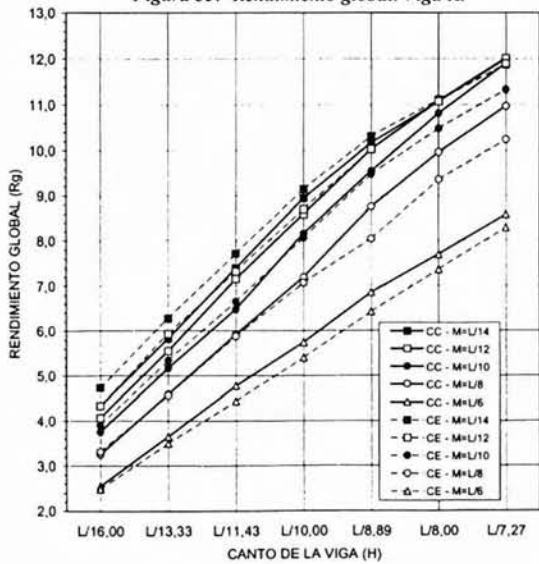
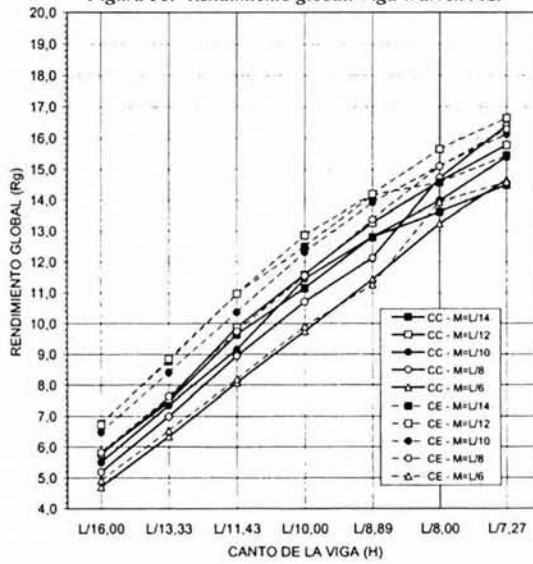


Figura 38.- Rendimiento global. Viga Warren MS.



5. CONCLUSIONES

Los resultados aportados en el presente artículo constituyen una herramienta útil para orientar el diseño de las vigas de celosía en el ámbito de luces medias.

Desde un punto de vista resistente las tipologías más adecuadas son la Pratt, la Warren con montante superior y la Warren con ambos montantes, con diferencias entre ellas poco significativas. La viga Howe también debería ser considerada si las cargas aplicadas no coinciden con los nudos de la estructura. La consideración de un criterio exclusivamente resistente no supone ninguna limitación, por cuanto en el ámbito de los cantos y módulos que hemos establecido como más adecuados, todas ellas cumplen con las limitaciones normativas de flecha para cubiertas.

Desde un punto de vista de rendimiento global, las tipologías más adecuadas son la Warren sin montantes, siempre y cuando las cargas se apliquen en los nudos, y las Warren con montante superior y ambos montantes, en todos los casos.

Las tipologías señaladas, en combinación con un canto medio de los analizados (en el entorno de $L/10$) y un tamaño de módulo del mismo orden de magnitud, constituyen la solución globalmente más adecuada.

Finalmente, se puede formular una conclusión adicional: la tipología de viga en K no se justifica, en ningún caso, con criterios de rendimiento, situación que fundamentalmente deriva de la mayor densidad de diagonales, dentro de cada recuadro, frente a una triangulación simple.

* * *