

ANÁLISIS DEL RENDIMIENTO ESTRUCTURAL DE VIGAS VIERENDEEL

(ANALYSIS OF STRUCTURAL EFFICIENCY OF VIERENDEEL BEAM)

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

Fecha de recepción: 20-II-03

ESPAÑA

422-30

RESUMEN

El presente artículo aborda el análisis del rendimiento estructural de vigas Vierendeel. Dicha valoración se determina a través de dos índices, uno relativo al rendimiento resistente y otro al rendimiento global, que tiene en cuenta además la rigidez del conjunto a flexión. Los resultados mostrados responden al análisis y dimensionado de más de 400 vigas, en las que se han utilizado una serie de cinco modulaciones en combinación con siete valores de canto diferentes. El estudio se completa con el empleo de dos tipos de perfiles (tubular y abierto) y con la comparación de su comportamiento con el de las vigas trianguladas. Las gráficas aportadas constituyen una herramienta de gran utilidad en orden a valorar la incidencia de los parámetros de diseño de estas vigas en su rendimiento estructural, poniendo de manifiesto como conclusión más relevante la pérdida de eficiencia que se produce, en un dimensionado optimizado, con la utilización de cantos elevados, contrariamente a los criterios vigentes en las soluciones de celosía.

SUMMARY

This article approaches the analysis of the structural efficiency of the Vierendeel beams. This assessment involves two variables: one relates to the strength-efficiency and the other one to the global efficiency. (The global efficiency takes also into account the bending stiffness of the beam). The results shown reflect the analysis and dimensioning of over 400 beams, where a series of five different modulacions combined with seven different beam depths have been used. The case study finishes using two types of profiles (hollow and open section) and comparing the structural behaviour between beams and trusses. The graphs shown are a very useful tool in order to assess the effect of these beams' design parameters on their structural efficiency. The most important result of the case study is the fact that using high beam depths in an optimized dimensioning involves a decrease of the efficiency. This criteria differs from the criteria for latticed structures.

1. INTRODUCCIÓN

Los entramados en bastidor, también denominados Vierendeel por su creador, surgen a partir de las vigas en celosía, básicamente por la necesidad de permitir el paso a su través, ya sea de personas o conducciones, y por la facilidad que otorga esta tipología para la colocación de carpinterías. En consecuencia, se eliminan las posibles diagonales, de forma que los cordones del sistema se vinculan únicamente mediante montantes. En estas condiciones, las conexiones deben ser necesariamente rígidas para garantizar la adecuada estabilidad del conjunto, y las distintas barras que configuran la estructura se ven sometidas a la acción simultánea de esfuerzos axiales, cortantes y momentos flectores.

Con frecuencia, la literatura técnica sobre el tema trata esta tipología como una extensión de los modelos en celosía, reseñando las diferencias en términos de solicitaciones, de su peor comportamiento resistente y de la complejidad adicional que supone hacer uniones rígidas. No obstante, cabe plantear un estudio comparativo en que se manifiesten las posibles implicaciones de los parámetros de diseño habituales, fundamentalmente la dimensión del recuadro y el canto del entramado.

El presente desarrollo viene así a complementar un documento previo (1), en el que se analizaban los rendimientos obtenidos con sistemas Pratt, Howe, K, y Warren, en este último caso, tanto con su formato convencional como con la inclusión de diferentes montantes adicionales.

les (Figura 1). Se pretende así no sólo cuantificar de algún modo la mencionada pérdida de rendimiento, sino determinar también en qué medida los criterios de diseño analizados en el caso de las celosías pueden resultar aplicables en el proyecto de entramados en bastidor.

2. BASES DE CÁLCULO

El estudio ha comprendido el cálculo matricial de más de cuatrocientas vigas Vierendeel, siempre en el ámbito de luces medias y con soluciones de canto constante. En lo que respecta a los restantes condicionantes, se han observado los criterios descritos en los siguientes párrafos.

Con objeto de contemplar un espectro de soluciones suficientemente representativo, se divide la luz entre apoyos en una serie de 5 modulaciones (L/14, L/12, L/10, L/8, L/6), y se analizan 7 valores de canto diferentes, igualmente expresados como posibles fracciones del correspondiente vano (L/16.00; L/13.33; L/11.43; L/10.00; L/8.89; L/8.00; L/7.27) (Figura 2).

En relación con las acciones consideradas, y al margen del peso propio de los perfiles resultantes, se estima una carga permanente de 50 kg/m²., y otro de igual valor para las correspondientes sobrecargas. Ambos conjuntos se aplican, de forma independiente, bien como acciones puntuales en los nudos del cordón superior (Cp), bien como

fuerzas distribuidas uniformemente sobre el mismo elemento (Cu). Con esta última alternativa se pretende cubrir aquellas situaciones en las que el apoyo de correas no se produzca siempre sobre las conexiones del entramado, consecuencia lógica del empleo de recuadros de cierta amplitud.

Como se ha indicado con anterioridad, la determinación de solicitaciones se ha efectuado con arreglo a métodos matriciales, suplementados con un proceso de optimización que selecciona, para cada barra, el perfil de menor peso que, dentro de la serie elegida, cumple con todas las condiciones de dimensionado en estado límite último. También se ha contemplado la posibilidad de mantener la sección constante a lo largo de ambos cordones, si bien tratando de forma independiente los patines superior e inferior. En lo sucesivo, para distinguir ambas opciones, las referiremos como soluciones de cordón estricto (Ce) y cordón continuo (Cc), respectivamente.

El proceso de dimensionado se ha realizado conforme a las estipulaciones contenidas en la NBE-EA 95, tanto en lo referente al establecimiento de hipótesis combinatorias y aplicación de criterios de seguridad, como en lo que respecta a la valoración de los correspondientes coeficientes de pandeo. En relación con esta última cuestión, cabe apuntar que se ha considerado impedido el desplazamiento de todos los nudos en dirección normal al plano de la viga.

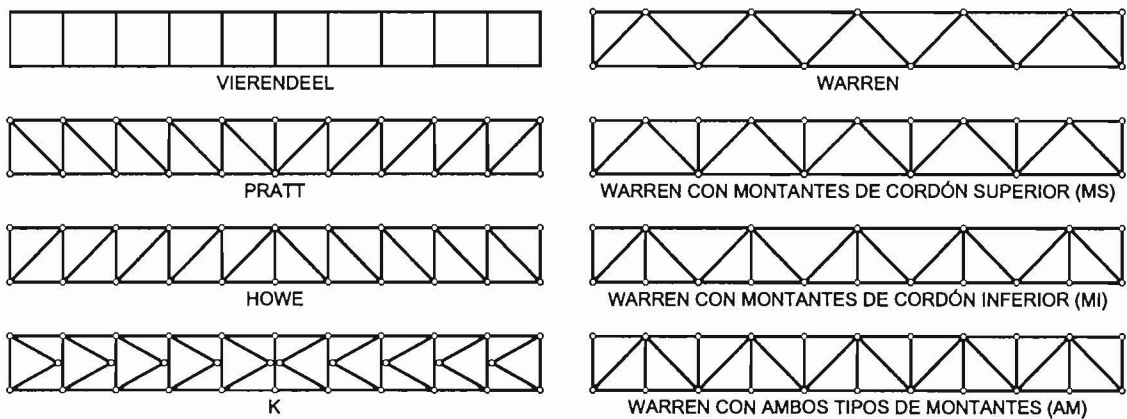


Figura 1.- Tipologías analizadas.

	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.- Casuística analizada.

Inicialmente, el estudio contempla la utilización de perfiles tubulares dentro de la serie europea de sección circular. No obstante, y como se manifiesta posteriormente, se han contemplado secciones alternativas a fin de lograr una mayor generalidad en las conclusiones.

En todos los casos propuestos se ha verificado una limitación de flecha de magnitud $L/250$, válida según criterios normativos para soluciones de cubierta. En consecuencia, se entienda cada viga analizada como la alternativa de menor peso que cumple dicha restricción de forma simultánea con los restantes condicionantes derivados de la consideración de estados límites últimos.

3. EVALUACIÓN DE RENDIMIENTOS

Al igual que en el estudio precedente, se han manejado dos parámetros adimensionales con la pretensión de ilustrar comparativamente las diferencias de rendimiento existentes entre las distintas alternativas planteadas. El primero, denominado rendimiento resistente (R_r), relaciona el peso final del entramado con el total de carga soportada; mientras que el segundo, designado como rendimiento global (R_g), modifica al anterior valorando también la rigidez del conjunto. Con estas premisas, se define:

· Rendimiento resistente R_r

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

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 R_g

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

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. Deformada y solicitaciones

En primer término, se hace necesario ilustrar las diferencias de comportamiento más evidentes entre los entramados Vierendeel y las vigas de celosía. En las Figuras 3 a 6 se han representado la deformada y los diagramas de esfuerzos ca-

racterísticos propios de esta tipología. La variación de axiles se asemeja a la de las vigas trianguladas, en la medida en que presenta mayores valores en las secciones correspondientes a la mayor flexión de la viga lineal equivalente. Ello deriva de que la citada flexión da lugar a pares de fuerzas aplicados en los cordones. Por el contrario, los diagramas de cortantes en la viga equivalente, que originan en las celosías esfuerzos axiales en diagonales y montantes, se convierten en este caso, debido a los enlaces rígidos, en flexiones de magnitud muy acusada, con importancia creciente a medida que nos aproximamos a los apoyos, donde los cortantes adquieren sus valores más elevados. Este comportamiento servirá para explicar, tal y como se muestra en el apartado siguiente, las diferencias de rendimiento entre las citadas tipologías.

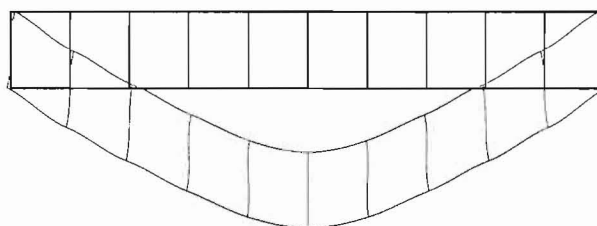


Figura 3.- Deformada.

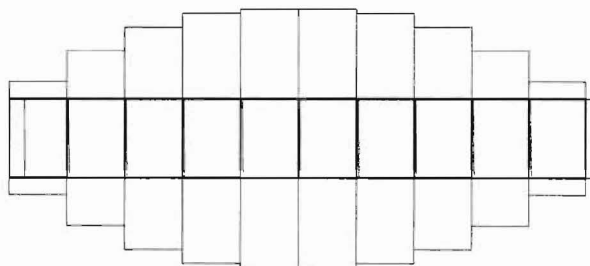


Figura 4.- Esfuerzos axiales.

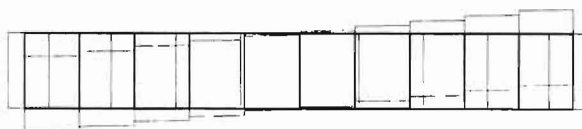


Figura 5.- Esfuerzos cortantes.

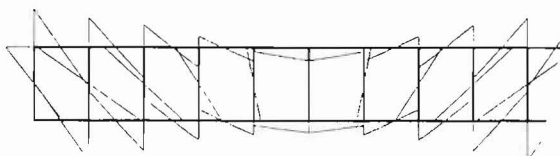


Figura 6.- Momentos flectores.

4.2. Canto del entramado

Las Figuras 7 a 10 muestran los rendimientos resistente y global relativos a vigas Vierendecl constituidas por perfiles tubulares de sección circular.

En primer lugar, se aprecia que las soluciones mediante cordón estricto implican un mejor rendimiento resistente, derivado de la optimización desarrollada en términos de reducción de peso. Por el contrario, la alternativa de cordones continuos consigue mejorar la rigidez de la viga a costa de incrementos de peso propio poco significativos, lo que se traduce en un rendimiento global netamente superior al conseguido con el dimensionado estricto. En consecuencia, los resultados vienen así a apoyar la técnica habitual de mantener la sección de los cordones a lo largo de toda la estructura, opción que, por otra parte, tiende a

simplificar la ejecución de conexiones y mejora la imagen del conjunto.

Las dos primeras ilustraciones (Figuras 7 y 8) llaman la atención en la medida en que presentan trazados sensiblemente descendentes, de forma que mayores cantos de entramado conducen a menores rendimientos resistentes, contrariamente a las conclusiones que se extraen del análisis de rendimientos en las vigas de celosía.

La pérdida de rendimiento estructural con el incremento de canto supone una singularidad, en principio sorprendente, pero fácilmente justificable a partir del análisis del comportamiento resistente de esta tipología. La Figura 11 muestra un modelo simplificado consistente en asumir la existencia de rótulas ficticias en los puntos medios de cordones y montantes de cada recuadro, en coincidencia con

Figura 7.- Rendimiento resistente. Rr-Cu.

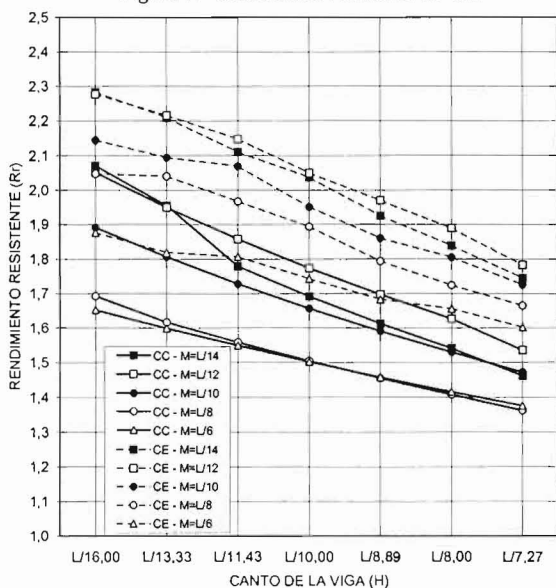


Figura 8.- Rendimiento resistente. Rr-Cp.

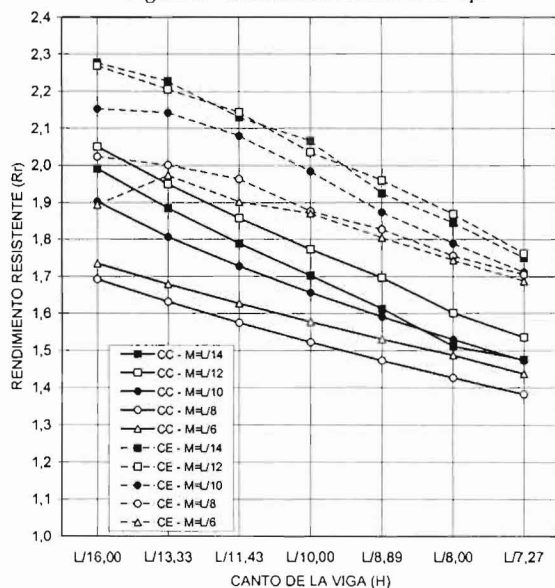


Figura 9.- Rendimiento global. Rg-Cu.

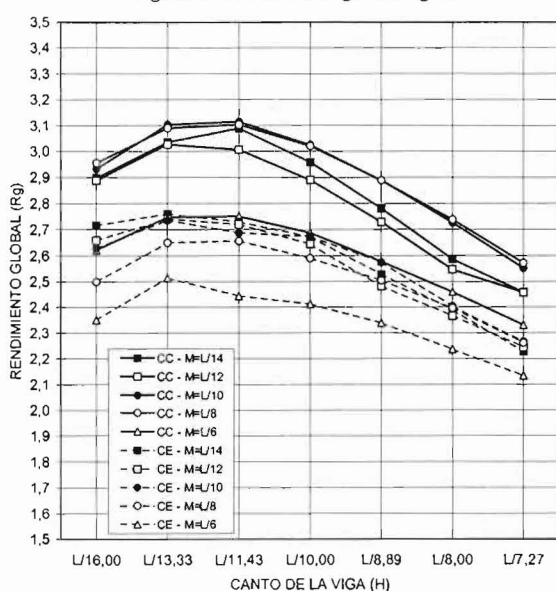
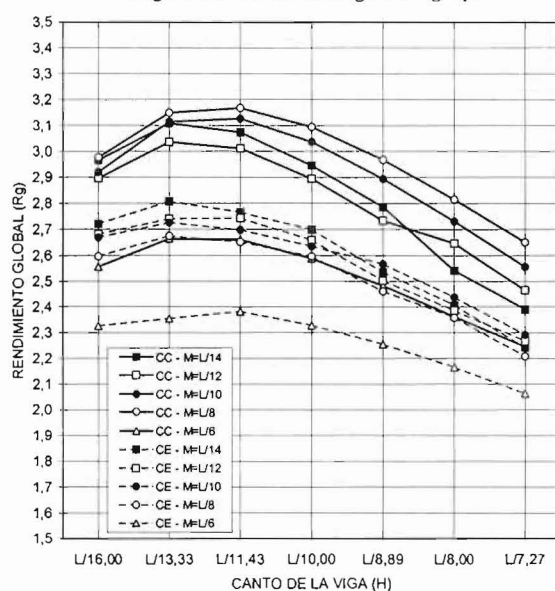


Figura 10.- Rendimiento global. Rg-Cp.



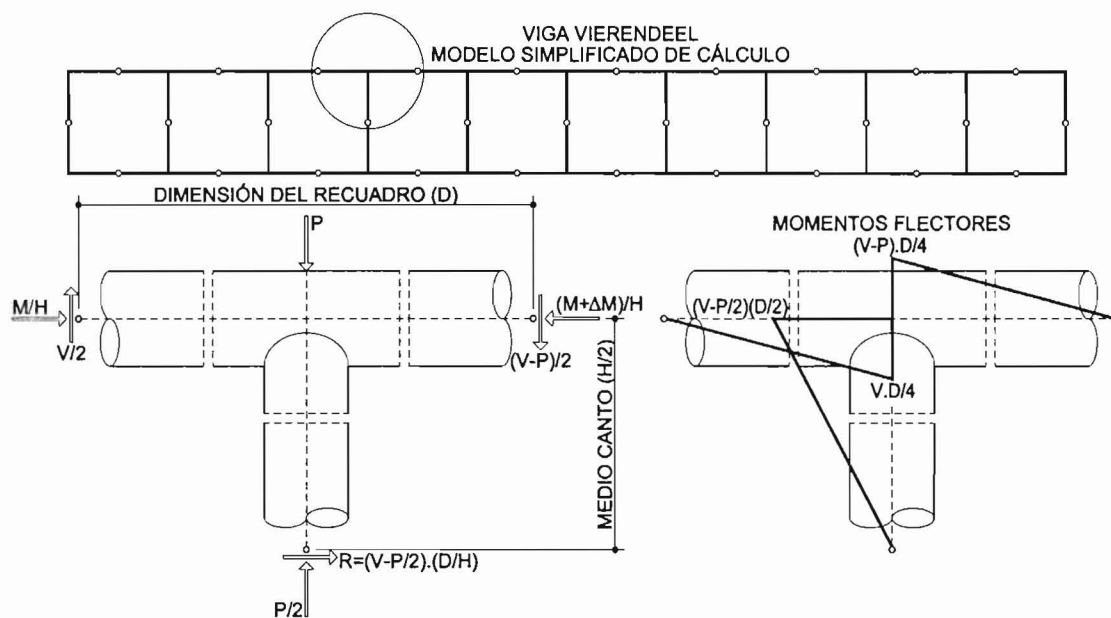


Figura 11.- Modelo simplificado de cálculo.

los valores de momento nulo (2,3). Dicha hipótesis, adoptada igualmente en el cálculo simplificado de vigas alveoladas, muestra una precisión aceptable en los ámbitos sometidos a esfuerzos más elevados, originándose una mayor imprecisión del modelo a medida que los esfuerzos se hacen menos significativos desde el punto de vista dimensionado del perfil.

Del estudio estático del modelo en T definido entre rótulas se deduce que los esfuerzos de flexión en cordones y montante dependen únicamente de los cortantes actuantes en las rótulas ficticias y de la dimensión del recuadro. En consecuencia, un incremento de canto de la viga no origina, en el modelo simplificado, variaciones del momento soportado por las barras. Por tanto, una mayor altura del entramado da lugar a un incremento de peso derivado del empleo de montantes de mayor longitud pero de igual sección, lo que se traduce en una pérdida de rendimiento resistente.

Las Figuras 12 y 13 nos muestran, con un cálculo riguroso, los diagramas de momentos flectores correspondientes a tres vigas de distinto canto. Puede observarse cómo los valores de flector obtenidos no muestran una variación significativa, lo que valida la explicación precedente.

En el caso del rendimiento global (Figuras 9 y 10), las conclusiones son bastante similares, si bien aquí las gráficas siguen una curva escasamente pronunciada, igualmente con valores óptimos correspondientes a fracciones relativamente bajas ($L/13.33$ a $L/11.43$).

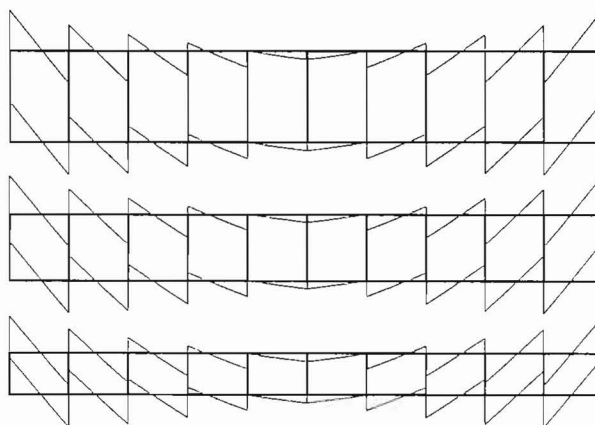


Figura 12.- Momentos flectores en cordones.

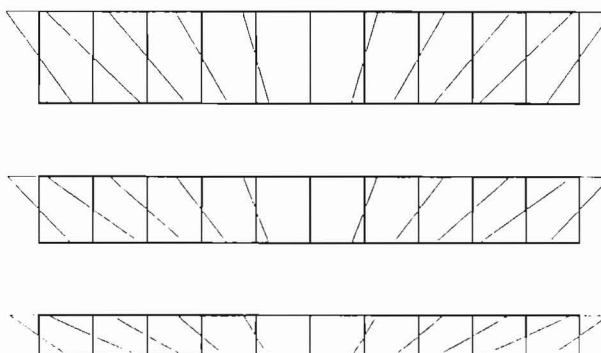


Figura 13.- Momentos flectores en montantes.

4.3. Dimensión del recuadro

Del análisis de las Figuras 14 a 17 se desprende que las modulaciones pequeñas penalizan el rendimiento resistente. Al mismo tiempo, la incidencia de dicho parámetro en el rendimiento global genera diferencias poco acusadas. Si tenemos en cuenta que la utilización de recuadros de reducida dimensión origina un incremento en el número de uniones y, por tanto, un mayor coste de ejecución del entramado, la conclusión parece clara en el sentido de optimizar la solución estructural con recuadros de dimensión importante en combinación con cantos reducidos.

4.4. Series de perfiles

En las Figuras 18 a 21 se analizan comparativamente los resultados obtenidos considerando perfiles tubulares de la serie europea con sección circular y elementos HEB. Se aprecia que estos últimos se sitúan por debajo de los tubulares tanto en términos resistentes como de rigidez, por lo que resulta oportuno que el diseño tienda a soluciones cerradas con inercias principales en el mismo orden de magnitud. Esta solución aporta la ventaja adicional de una masividad mucho más favorable para tratamientos posteriores de la estructura, tanto en lo que respecta a la protección frente a la corrosión como frente al fuego.

Figura 14.- Rendimiento resistente. Rr-Cu.

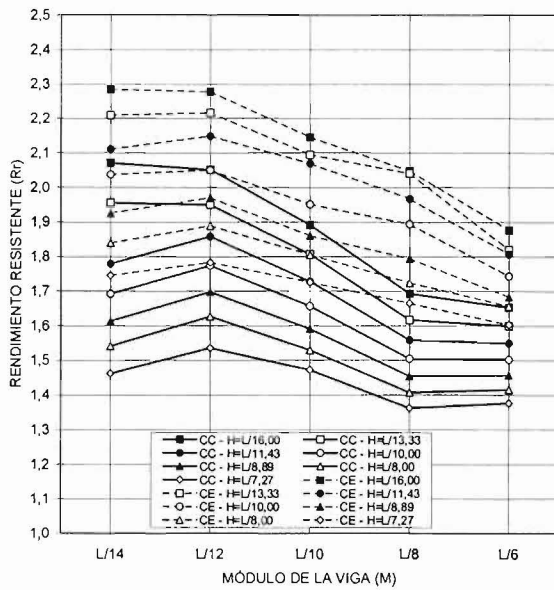


Figura 15.- Rendimiento resistente. Rr-Cp.

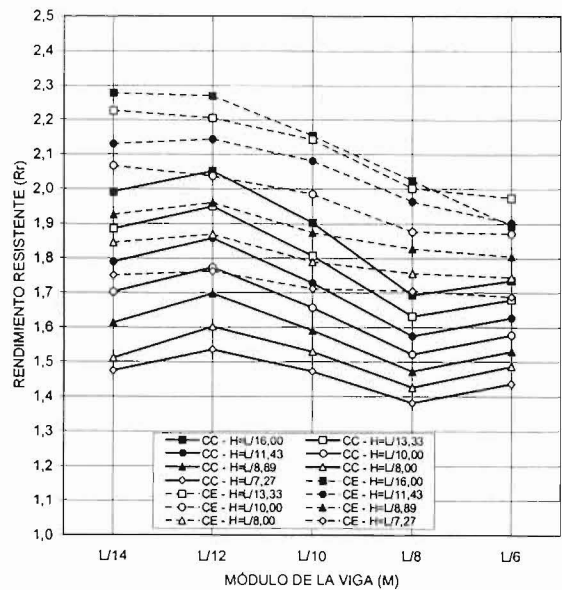


Figura 16.- Rendimiento global. Rg-Cu.

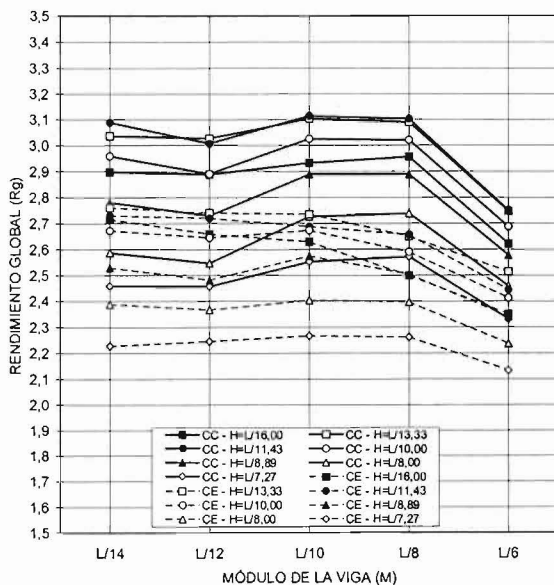


Figura 17.- Rendimiento global. Rg-Cp.

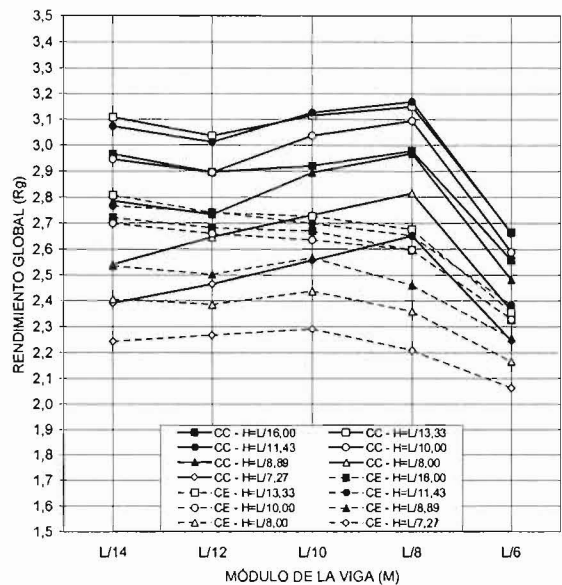


Figura 18.- Rendimiento resistente. Rr-Cu-Cc.

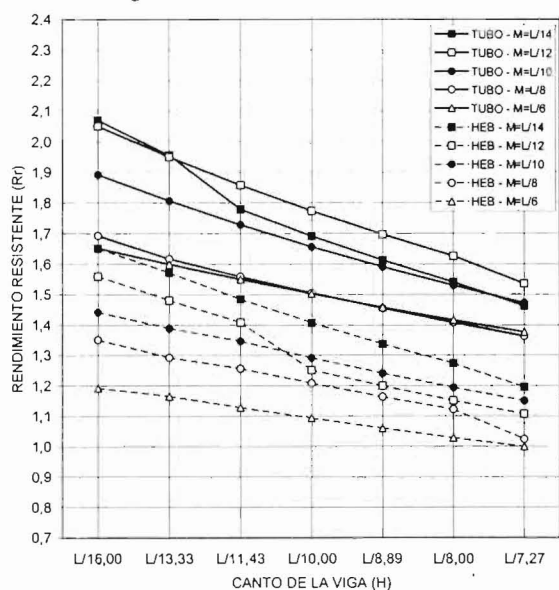


Figura 19.- Rendimiento resistente. Rr-Cu-Ce.

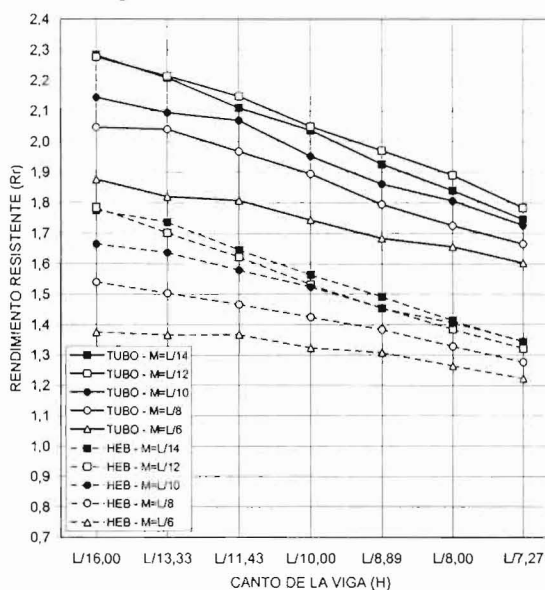


Figura 20.- Rendimiento global. Rg-Cu-Cc.

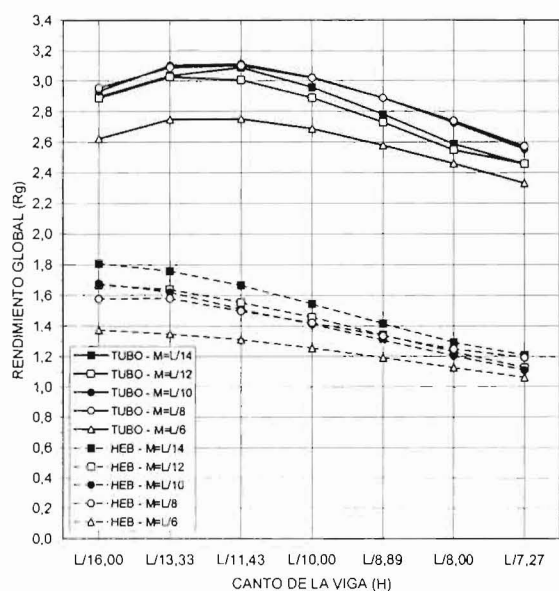
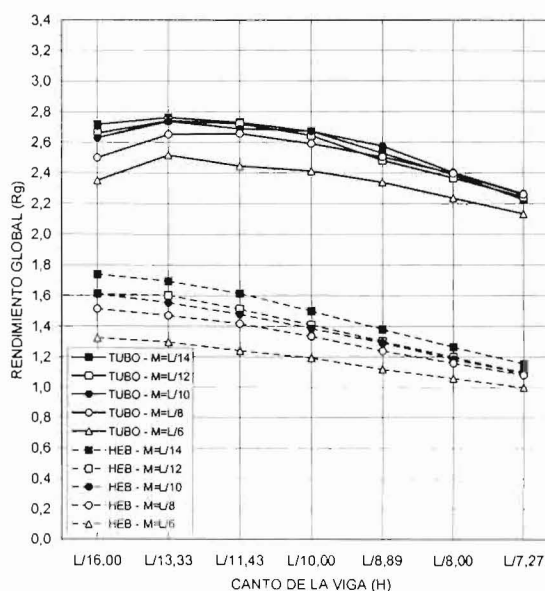


Figura 21.- Rendimiento global. Rg-Cu-Ce.



Asimismo, los análisis comparativos efectuados muestran que las conclusiones relativas a las implicaciones de los restantes parámetros de diseño se hacen extensivas a otras alternativas de sección transversal diferentes de la tubular.

4.5. Comparación con vigas de celosías

En las Figuras 22 a 33 se ilustran las diferencias de comportamiento existentes entre las tipologías de vigas trianguladas analizadas en la referencia (1) y la solución Vierendeel. En la confección de las citadas gráficas, se ha considerado tanto la actuación de cargas puntuales como

uniformemente distribuidas, el dimensionado estricto de cordones o bien la adopción de sección constante en toda la luz, así como tres casos representativos en relación con las dimensiones del recuadro ($M1=L/14$; $M2=L/10$; $M3=L/6$).

Los gráficos son elocuentes al respecto. Los rendimientos, tanto resistentes como globales correspondientes a las celosías, se agrupan en una banda más o menos compacta, pero siempre notablemente alejada de la curva de comportamiento de las vigas Vierendeel, incapaces éstas de competir en eficacia estructural con las soluciones trianguladas.

Figura 22.- Rendimiento resistente. Rr-Cp-Cc-M1.

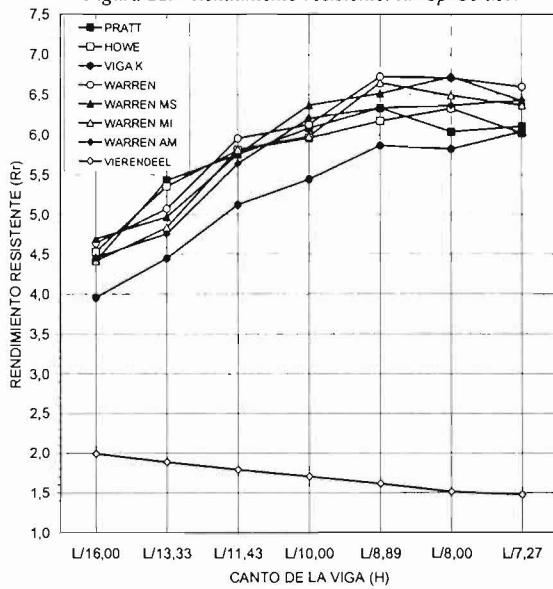


Figura 23.- Rendimiento resistente. Rr-Cu-Cc-M1.

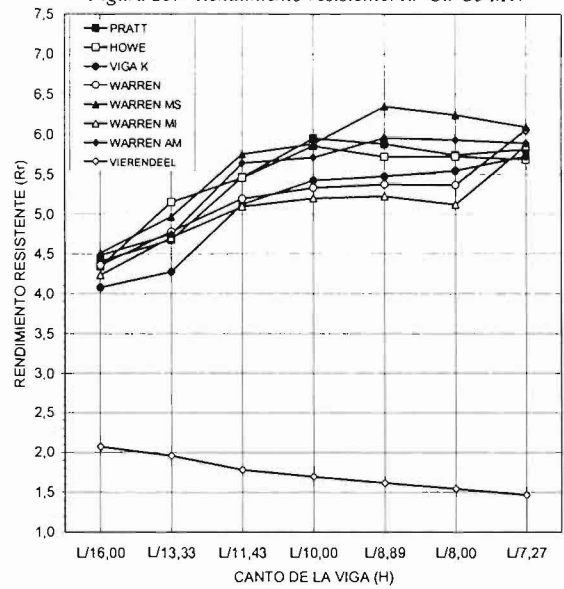


Figura 24.- Rendimiento resistente. Rr-Cp-Cc-M2.

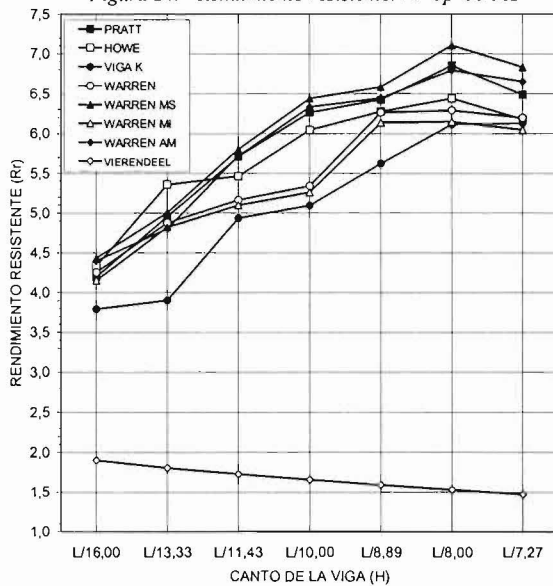


Figura 25.- Rendimiento resistente. Rr-Cu-Cc-M2.

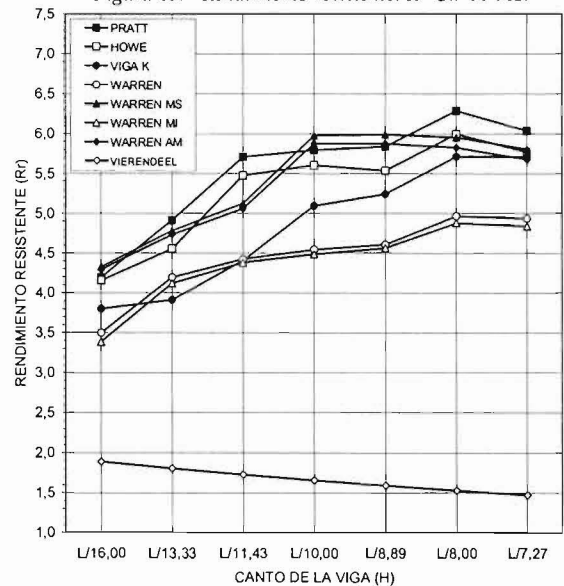


Figura 26.- Rendimiento resistente. Rr-Cp-Cc-M3.

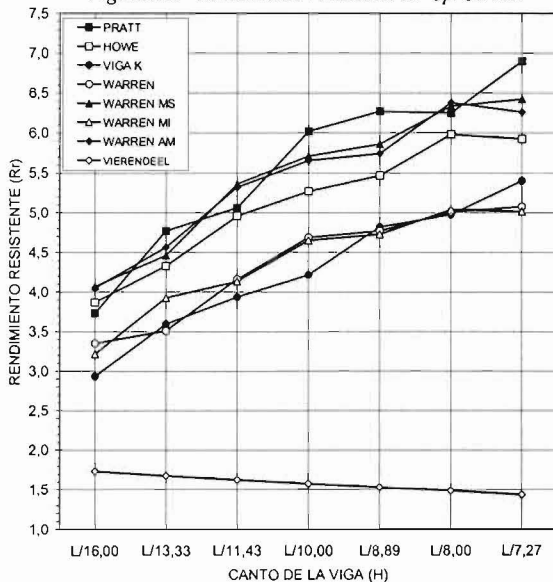


Figura 27.- Rendimiento resistente. Rr-Cu-Cc-M3.

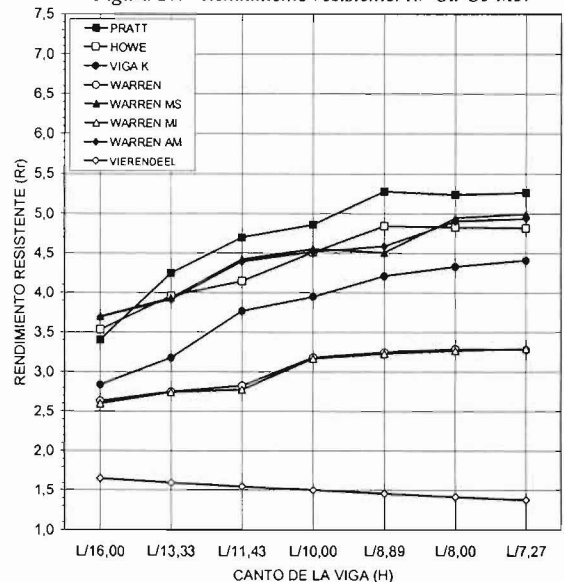


Figura 28.- Rendimiento global. Rg-Cp-Cc-M1.

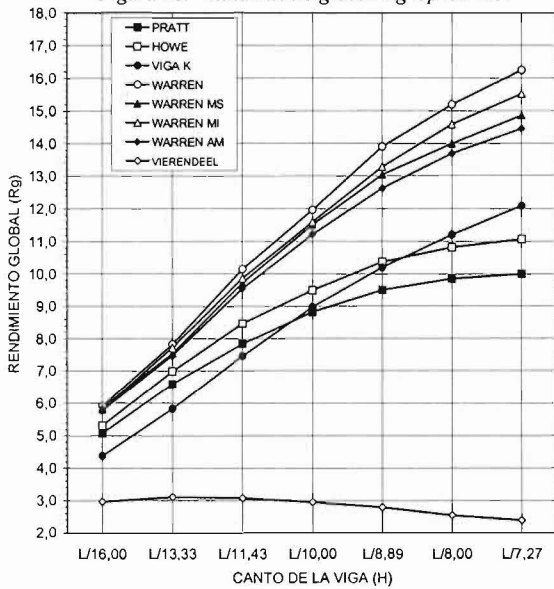


Figura 29.- Rendimiento global. Rg-Cu-Cc-M1.

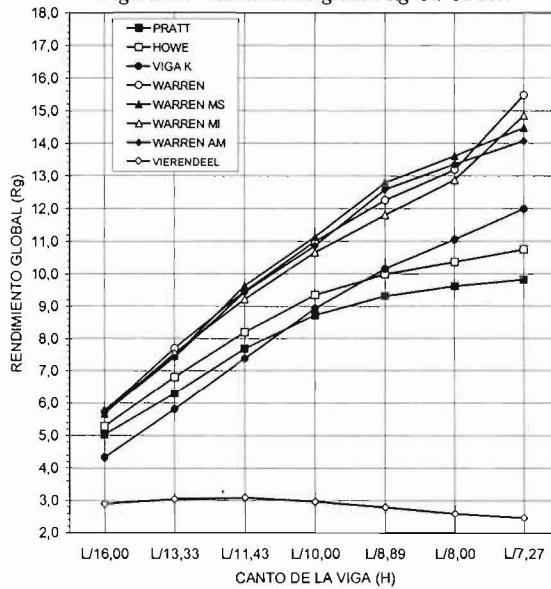


Figura 30.- Rendimiento global. Rg-Cp-Cc-M2.

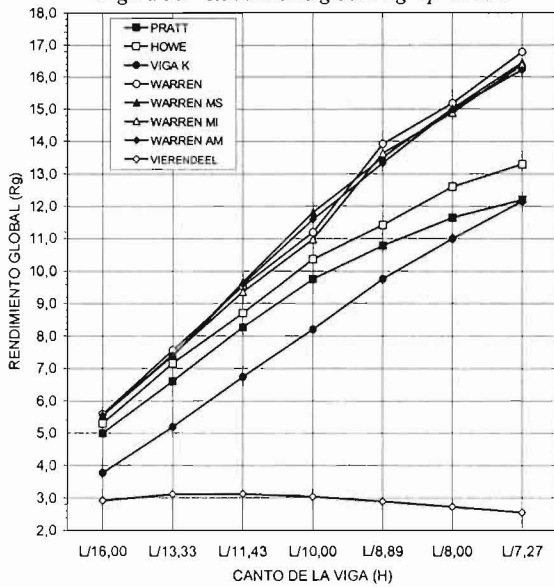


Figura 31.- Rendimiento global. Rg-Cu-Cc-M2.

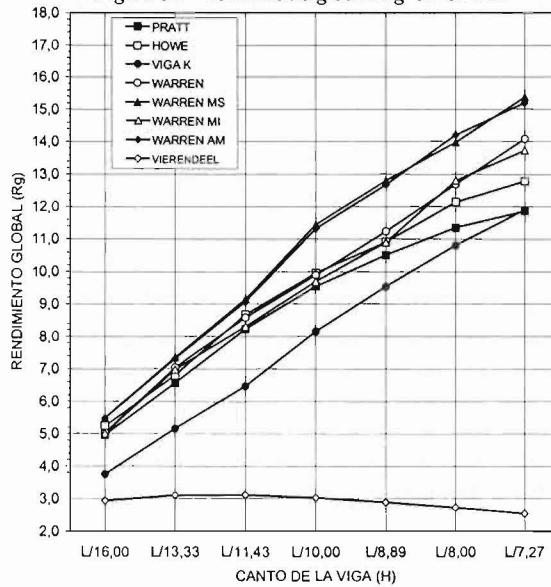


Figura 32.- Rendimiento global. Rg-Cp-Cc-M3.

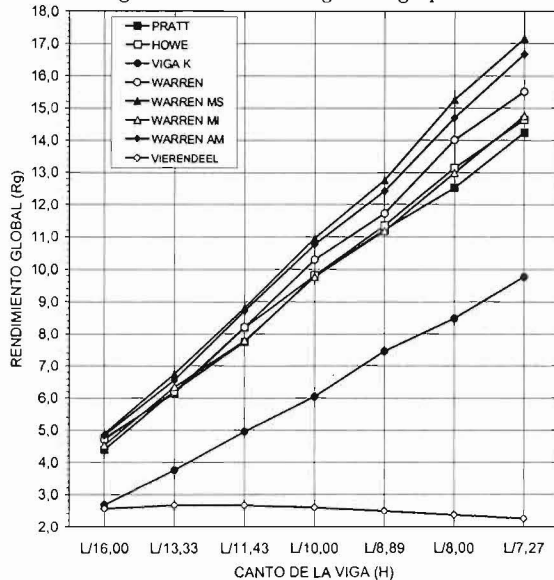


Figura 33.- Rendimiento global. Rg-Cu-Cc-M3.

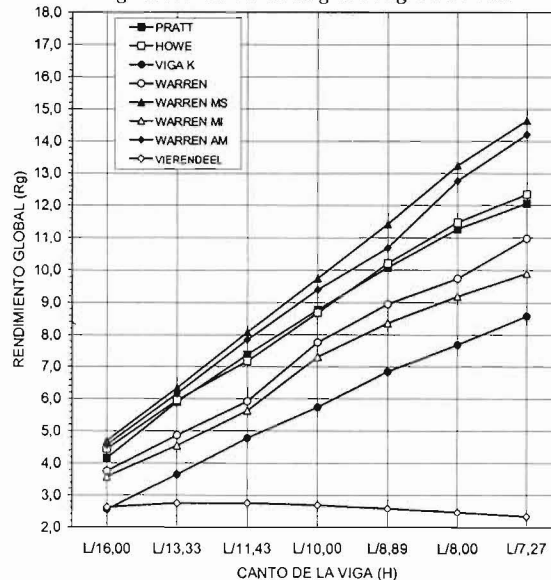


Figura 34.- Rendimiento resistente. Rr-Cu-Cc-M1.

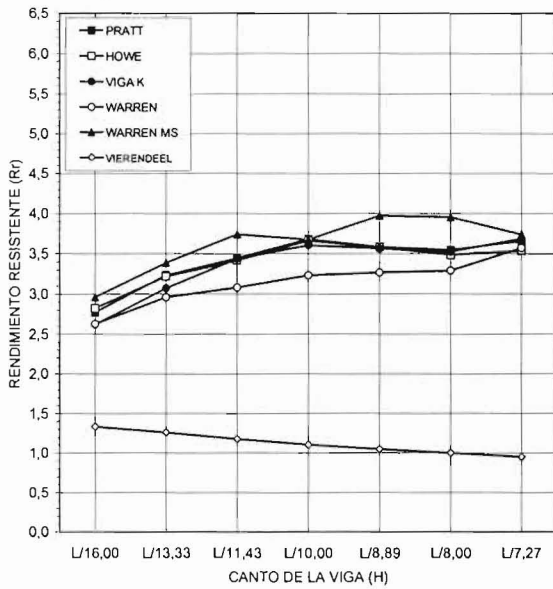


Figura 35.- Rendimiento global. Rg-Cu-Cc-M1.

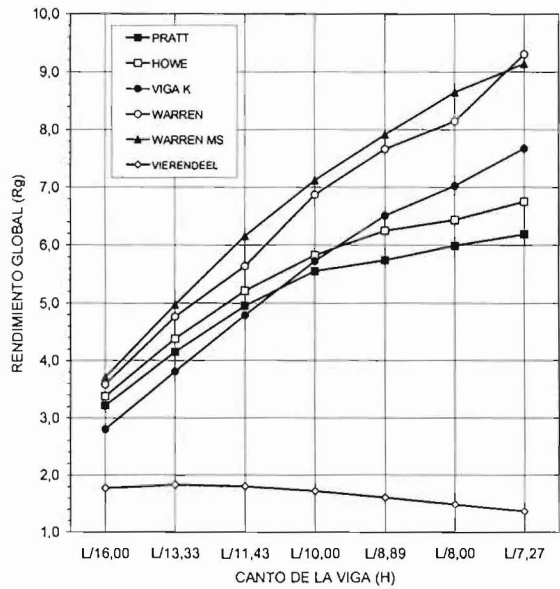


Figura 36.- Rendimiento resistente. Rr-Cu-Cc-M2.

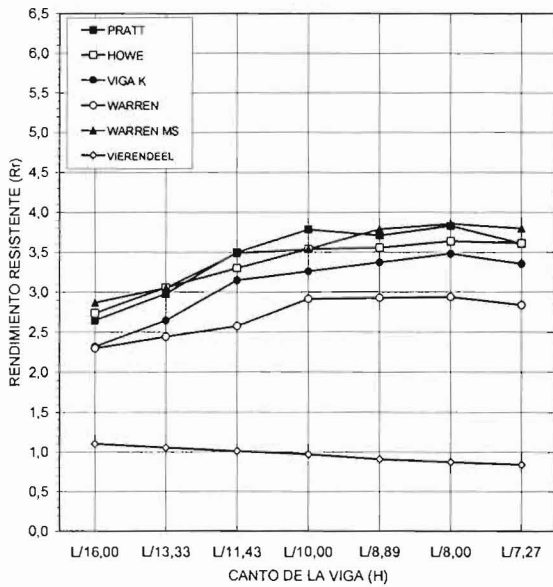


Figura 37.- Rendimiento global. Rg-Cu-Cc-M2.

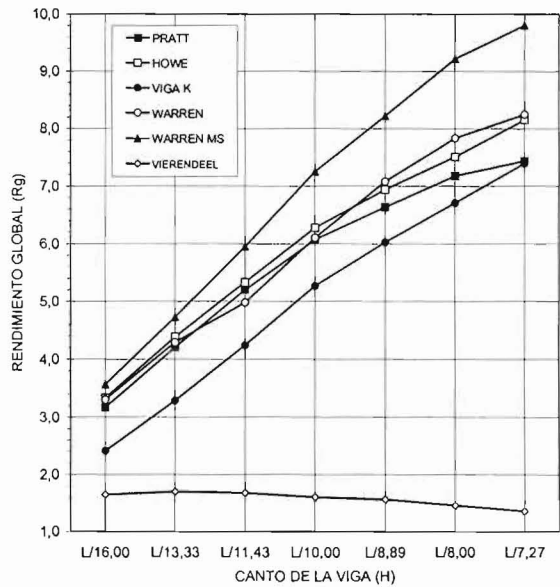


Figura 38.- Rendimiento resistente. Rr-Cu-Cc-M3.

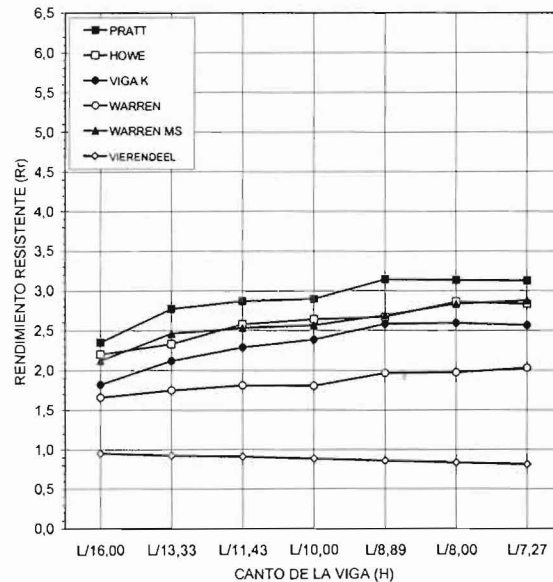
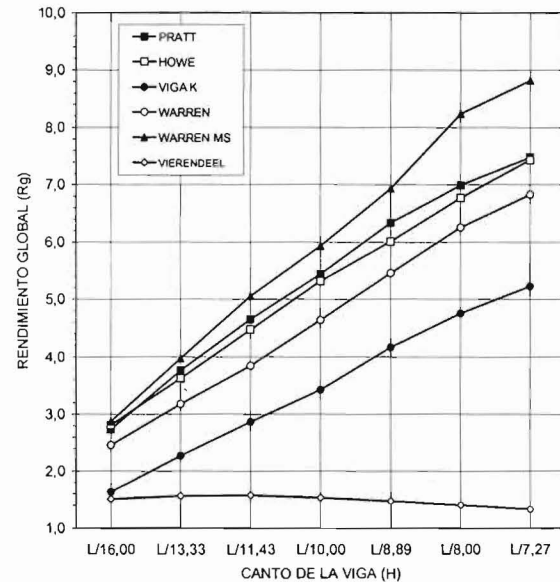


Figura 39.- Rendimiento global. Rg-Cu-Cc-M3.



Por otra parte, más significativa resulta la diferente tendencia que manifiestan los trazados en relación con la repercusión que tiene el canto en la determinación de rendimientos. Mientras que en las vigas trianguladas los rendimientos son sensiblemente ascendentes con el incremento de canto, las Vierendeel presentan la tendencia contraria, si bien con unas pendientes notablemente menos acusadas.

Por último, las Figuras 34 a 39 muestran, con iguales criterios, los resultados obtenidos para una luz incrementada en un 50%. Lógicamente, las magnitudes de los rendimientos se modifican, pero tanto los aspectos cualitativos como las conclusiones que se deducen siguen siendo plenamente válidas en el ámbito de las luces medias y para las estimaciones de carga consideradas en el presente artículo.

5. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos constituyen una herramienta de utilidad para mostrar la incidencia que tienen los parámetros de diseño en el rendimiento estructural de las vigas Vierendeel.

Aceptando un criterio de optimización entendido como la resolución del problema estructural con mínimo peso pro-

pio, se concluye que el diseño óptimo corresponde a entramados con cantos bajos en combinación con recuadros de elevada dimensión. Este resultado aparece avalado por toda la casuística contemplada y se justifica con el análisis del comportamiento resistente del recuadro.

Desde el punto de vista de la valoración de secciones alternativas, se puede apuntar que la utilización de perfiles tubulares aúna un notable rendimiento con una favorable masividad, lo que redundará en beneficio de otros aspectos constructivos.

Este trabajo analiza cualitativamente la pérdida de eficiencia que supone el prescindir de la triangulación del alma.

BIBLIOGRAFÍA

- (1) Estévez, J., Martín, E. Influencia de los parámetros de diseño en el rendimiento estructural de vigas de celosía. Informes de la Construcción, Vol. 54, nº 479, mayo-junio 2002. Págs. 17-28.
- (2) Owens, G. W., Knowles, P. R., editores Steel designers' manual The Steel Construction Institute. Blackwell Scientific Publications University Press. Cambridge. 1993. Págs. 431-434
- (3) Zignoli, V. Construcciones metálicas. Vol.1, Editorial Dossat, S. A., Madrid. 1978. Págs. 983-990

* * *