DISEÑO OPTIMO DE PORTICOS FORMADOS POR PERFILES LAMINADOS RECTOS DE SECCION CONSTANTE

(OPTIMUM DESIGN OF STEEL FRAMES FORMED BY STRAIGHT PROFILES OF CONSTANT CROSS-SECTION)

424-1

Valentín Quintas Ripoll, Arquitecto

RESUMEN

En este artículo se obtienen las formas que dan el mínimo material para estructuras formadas por vigas rectas metálicas de sección constante, bajo una carga uniforme. Las variables de forma que se pueden manejar son, para este caso, la esbeltez —relación entre luz y canto— y la relación entre luces. Dado que el mínimo de material se obtiene dimensionando las vigas con criterio plástico, el objeto final del diseño mínimo es definir con qué valores de las variables citadas puede dimensionarse con criterio plástico, sin que haya un sobredimensionamiento por flecha.

SUMMARY

In this paper are obtained the minimum material shapes of structures built of constant cross section steel beams. Form parameters are only slenderness, and lengths relation in continuous beams.

As minimum sections are obtained designing beams with plastic analysis, the final aim of this paper is to obtain form parameters that makes possible that design criterium.

A) OBJETO Y TIPOLOGIA

En edificaciones es frecuente utilizar pórticos de perfiles laminados rectos, con sección constante en toda su longitud. Para luces medianas, es más económico que hacer la sección variable, pese a que con esta última solución se utiliza menos material.

Los nudos de entre viga y pilar deben ser articulaciones, de forma que no se transmitan momentos a los pilares, cosa que obligaría a aumentar la sección de éstos sin disminuir la de las vigas. Las vigas deben sin embargo trabajar como vigas continuas, de forma que se pueda disminuir la flecha y las puntas de momentos. Los esfuerzos de viento, pueden ser contrarrestados con ventaja por una estructura triangulada adicional, que consumirá evidentemente menos material que un pórtico rígido.

Todos estos condicionamientos llevan a una tipología muy definida: sólo se puede solucionar con una viga pasante, sobre pilares que estarán duplicados, excepto en el caso en que el pilar esté en un extremo, o con una viga duplicada sobre un pilar pasante.

La cuestión que se plantea al diseñar este tipo de estructuras es como hacerla lo más económica posible. Los parámetros que se pueden manejar son muy pocos: podemos elegir un tipo u otro de perfil, podemos variar la relación entre una luz y otra, y finalmente podemos variar la forma de apoyo en el borde del pórtico un voladizo, una articulación, etc. Determinar cuál es el mejor criterio para elegir estos parámetros es el objeto de este artículo.

B) ELECCION DEL PERFIL

Empecemos por determinar cuál es el perfil que consumirá menos material. Para ello distinguiremos en los elementos de la estructura entre vigas y pilares.

B.1. Pilares

En una estructura en la que los pilares trabajan siempre a compresión, si queremos minimizar el volumen de pilares, el único parámetro que se puede variar es el coeficiente ω de pandeo. ω puede depender del número de pilares: si el normal que actúa en cada pilar es pequeño —al ser el número de pilares grande— la esbeltez, y por lo tanto ω , aumenta. Se puede ver sin embargo que este aumento es pequeño y carece en las modulaciones regulares de importancia relativa.

Principalmente ω dependerá de la esbeltez mecánica y por tanto del valor del radio de giro mínimo de la sección que a su vez depende esencialmente de la relación entre Inercia y Área de la sección que llamaremos rendimiento:

$$r = \frac{I}{A}$$

Las secciones que tengan el momento de Inercia según dos ejes perpendiculares iguales serán evidentemente las más adecuadas, ya que el tensor de inercias será circular —la elipse de Lamé se reduce a una circunferencia— y por lo tanto tiene el mismo momento de inercia en cualquier dirección.

De éstas las más adecuadas serán las que tengan mayor momento de inercia, es decir las que tengan las áreas lo más alejadas posible del centro de gravedad, lo que nos conduce a secciones cuadradas y no circulares que a igualdad de área tienen menor momento de inercia. Son pues las secciones más adecuadas, las

formadas por dos UPN o dos IPE separados de forma que el momento de inercia sea igual en dos direcciones perpendiculares. La sección de perfil de ala ancha o de dos UPN soldados tiene justificación únicamente cuando además hay flexiones en una de las direcciones.

B.2. Vigas

De forma inmediata podemos definir que la sección que consumirá menos material sea aquella que a igualdad de área tenga el módulo resistente ω_x en dirección a la flexión mayor. Es decir, aquel en que la relación ω_x/A sea mayor.

Esta relación no es adimensional y tiene realmente las dimensiones de un canto. En efecto, si separásemos las dos mitades del área del perfil un canto h_u , de forma que el momento de inercia de esa sección fuese el del perfil, aquél tendría de valor:

$$I = 2 \frac{A}{2} \left(\frac{h_u}{2} \right)^2 = \frac{Ah_u^2}{4}$$

y el módulo resistente sería:

$$\omega_x = \frac{I}{h/2} = \frac{Ah_u}{2}$$

y la relación entre un módulo resistente y área:

$$\frac{\omega_x}{A} = \frac{h_u}{2}$$

Vemos pues que el parámetro que nos da el consumo mínimo de material, es el canto $h_u = 2\omega_x/A$ de la sección ideal de igual módulo resistente que el perfil, que llamaremos "canto útil".

Podemos comparar ahora a igualdad de área y con la gama de perfiles laminados existentes cuáles son los que tienen mayor canto útil. Como se puede ver en el gráfico, en el que en ordenadas se miden las áreas y en abscisas el canto útil:

Los números indican el canto real del perfil.

El perfil que a igualdad de área tiene siempre mayor canto útil es el IPE. Aunque las diferencias son pequeñas para cantos pequeños, para perfiles de más de 20 cm de canto real, son ya muy apreciables, y mucho mayores para cantos grandes. Este perfil debe pues ser utilizado con preferencia para cantos medianos y grandes. La serie IPN tiene unos h_u mucho menores y a partir del IPN 24 es superada por el UPN.

No es aconsejable utilizar el IPN más que para correas que exijan habitualmente cantos menores de 16 cm. Para jácenas de más de 24 cm, es incluso preferible utilizar la solución de una UPN pasante a la del IPN, a pesar del aumento de tensiones de cortadura debidas a la torsión.

Finalmente la serie IPH es la que menos rendimiento tiene, aunque para cantos mayores de 55 cm, supera el IPN, que tiene los cantos útiles mínimos.

C) PARAMETROS DE DISEÑO

Una vez definido cuál es el perfil más económico, podemos plantear qué criterio debemos seguir en cuanto a la elección de luces y cantos del pórtico.

Supondremos en adelante que la luz del forjado ha sido fijada, y que por lo tanto conocemos el valor de la carga y ésta es uniforme.

Los pilares no tienen realmente influencia en la cantidad de material de la estructura: la única variable es el coeficiente ω , que aumentaría para una misma longitud de pandeo a medida que la carga fuese menor, lo que obligaría a luces grandes de vigas, cosa que está en contradicción con el diseño económico de éstas como vamos a ver a continuación.

Para evaluar cuáles son los factores que influyen en el volumen de material de las vigas, y en qué proporción lo hacen, vamos a obtenerlo analíticamente: El volumen será la suma de las áreas por las longitudes:

$$V = \sum A_i l_i$$

y aplicando el concepto de "canto útil": $A_i = 2 \frac{\omega_u}{h_u}$

El módulo resistente ω_u , será el cociente del momento y la tensión de cálculo:

$$\omega_u = \frac{M_{\max}}{\tau} \text{ y queda: } V = \frac{1}{\tau} \sum M_{\max} \cdot 2 \frac{l_i}{h_u}$$

$\frac{l_i}{h_u}$, es la "esbeltez útil" λ_u ,

relación entre luz y canto útil, y el momento podemos escribirlo como:

$$M_{\max} = \frac{ql^2}{C}$$

El volumen de una viga es pues: $V = \frac{ql^2}{\tau} \times 2 \frac{\lambda_v}{C}$

Vemos que el volumen es directamente proporcional a la carga y al cuadrado de la luz. Como es evidente una estructura será tanto más económica cuanto menor es la luz, independientemente de que se aumente el número de pilares, cuyo coeficiente ω no crecerá en la misma proporción, que el cuadrado de la luz.

La luz de la viga más económica es pues la mínima posible. Esto lleva a que en las fachadas de los edificios, debe disminuirse la luz tanto como sea compatible con el diseño de aquéllas. En los pórticos interiores tanto la luz máxima como la carga están fijadas por el diseño, y sólo nos queda variar el "factor de forma" de la ecuación es decir

$$\frac{2 \lambda_v}{C}$$

En seguida vemos que tiene un valor fijo para cada caso. En efecto, el mínimo C posible es 16:

$$M_{\min} = \frac{1}{2} \frac{ql^2}{8} = \frac{ql^2}{16}$$

que implica que la viga de luz máxima debe tener dos empotramientos elásticos, y tiene que poder ser dimensionada con criterio plástico. Si la viga está dimensionada con criterio plástico, y con el perfil más adecuado, éste será fijo para cada carga y cada luz, y por lo tanto lo será λ_v .

Vemos pues que el único criterio a que nos llevan los parámetros de diseño es que sea posible el dimensionado en período plástico del perfil que tengan la luz mayor.

Que sea posible el dimensionado con criterio plástico con el momento mínimo de $\frac{ql^2}{16}$, tiene un condicio-

nante inmediato en cuanto a forma: la luz mayor del pórtico no puede ser la del último vano si la viga está apoyada en su extremo en un pilar. Pero sobre todo tiene un condicionante físico, que como veremos es a su vez un parámetro de forma: la flecha. Si la flecha del perfil dimensionado con el momento mínimo es superior a la admisible, hay que sobredimensionar el perfil, bajando la tensión de cálculo σ y por lo tanto aumentando el volumen. Para que esto no ocurra, la esbeltez de la viga no debe exceder de un valor límite como vamos a ver a continuación.

C.1. Esbeltez límite

La esbeltez límite λ_l será aquella para la que el perfil alcanza la tensión de cálculo con la flecha admisible. Si la esbeltez es menor que ese valor límite, la viga tendrá una flecha menor con igual tensión. Si la esbeltez es mayor, la única forma de disminuir la flecha será bajar la tensión de trabajo sobredimensionando el perfil.

Para obtenerla, no hay más que comparar las ecuaciones que nos dan la tensión de cálculo y la flecha:

La flecha $\omega_{\max}$ será, suponiendo que los momentos de servicio M en los apoyos de la viga son iguales:

$$\omega_{\max} = \frac{5}{384} \frac{ql^4}{EI} - \frac{Ml^2}{8EI}$$

La tensión de trabajo:

$$\tau = \frac{ql^2}{16I} \times \frac{h}{2}$$

Despejando el factor común $\frac{ql^2}{16I}$ de ambas expresiones e igualando queda:

$$\lambda_l = \frac{l}{h} = \frac{E}{4 \left(\frac{5}{48} - \frac{M}{ql^2} \right)} \frac{\delta_{adm}}{\tau}$$

$$= \frac{525.000}{\frac{5}{48} - \frac{M_s}{ql^2}} \frac{\delta_{adm}}{\tau}$$

Siendo:

$$\delta_{adm} = \frac{\omega_{max}}{l} \left(\frac{1}{300}, \frac{1}{400}, \text{etc} \right)$$

Vemos que la esbeltez no depende de la forma del perfil, ni de la carga, y que es un valor fijo para cada pareja de momentos de servicio en los apoyos de la viga.

Si el acero es A-42, el coeficiente global de seguridad 1,5; y la limitación de flecha 1/300, queda:

$$\lambda_{1,5}^{300,42/1,5} \approx \frac{1}{\frac{5}{48} - \frac{M}{ql^2}} = \frac{1}{\frac{5}{48} - \frac{1}{C_s}}$$

La esbeltez límite para otros límites de flecha, otras tensiones de fluencia u otros coeficientes de seguridad se obtiene a partir de ésta multiplicando o dividiendo por el valor antiguo y el nuevo. Por ejemplo la esbeltez límite para una limitación de flecha 1/400 será:

$$\lambda_{400} = \frac{300}{400} \lambda_{300}$$

con el mismo coeficiente de seguridad y acero A-52 será:

$$\lambda_{52} = \frac{2600}{3600} \lambda_{42}$$

Como todos estos factores son previos al diseño, nos encontramos con que el único parámetro que podemos variar para modificar la esbeltez límite es el coeficiente C_s del momento de servicio:

$$M = \frac{ql^2}{C_s}$$

Un problema que parecía independiente de los esfuerzos de servicio, vemos ahora que depende básicamente de ellos: Una viga cuyo momento de servicio en los apoyos sea pequeño, tendrá una esbeltez límite pequeña y por lo tanto tendremos poco margen para utilizarla. El tope será para el momento de empotramiento perfecto $ql^2/12$, $C_s = 12$ que daría una esbeltez límite:

$$\lambda_{300,42/1,5} = \frac{1}{\frac{5}{48} - \frac{1}{12}} = 48$$

Si conseguimos que el pórtico tenga en los dos extremos de su luz máxima un momento de empotramiento perfecto, podremos dimensionarla con criterio plástico hasta un perfil cuyo canto sea $l/48$. Si en servicio el momento no fuese de $ql^2/16$, tendríamos que la esbeltez límite es:

$$\lambda_{300,42/1,5} = \frac{1}{\frac{5}{48} - \frac{1}{16}} = 24$$

lo que implica que sólo para pórticos muy cargados vamos a poder utilizar el perfil mínimo.

Estos dos momentos de servicio son realmente los topos entre los que vamos a movernos en cuanto a diseño, como se explica a continuación.

C.2. Relación de Luces

Una vez vista la relación entre momento de servicio y el campo de utilización de un perfil para una luz dada, podemos plantearnos con qué relación de luces aparecerá un momento dado en servicio.

Supondremos en adelante que el pórtico es regular o prácticamente regular con un margen del 10 %, es decir, o todas las luces son iguales excepto la del extremo o se alternan dos luces distintas l_1 y l , excepto las últimas.

Las ventajas de esta configuración son obvias: en los pórticos irregulares aparecen momentos grandes que producirían rótulas en servicio y por tanto sobredimensionamiento por flecha. Por otra parte, si todas las vigas del pórtico son de igual sección, es más económico aprovechar esa sección al máximo ahorrando pilares y disminuyendo el coeficiente ω de éstos.

Para obtener la relación entre luces y momentos de servicio supongamos que el pórtico es de longitud infinita.

Los momentos en los apoyos serán iguales a lo largo de la longitud de la viga. Para obtenerlos, no hay más que igualar giros en uno cualquiera de los apoyos, y llamando M al momento que aparece en éstos:

$$\theta_1 = \theta_0$$

$$\frac{ql_1^3}{24EI} - \frac{Ml_1}{2EI} = \frac{Ml}{2EI} - \frac{ql^3}{24EI}$$

y queda despejando M :

$$C_s = 12 \frac{1+a}{1+a^3} ; \quad M = \frac{ql^2}{12} \frac{1+a^3}{1+a}$$

llamando $a = \frac{L_1}{L}$, relación entre la luz corta y la luz larga.

Si sustituimos en la fórmula que nos da M la serie $a = 1/8, 2/8, 3/8, \dots, 1$, veríamos que para $1/8$ el momento es sensiblemente el empotramiento elástico y a medida que crece a , va disminuyendo rápidamente hasta hacerse

$$\frac{ql^2}{16} \quad \text{para } a = \frac{1}{2},$$

a partir de entonces vuelve a crecer hasta hacerse de nuevo $\frac{ql^2}{12}$ cuando $a = 1$.

Las alternancias de luces menores de $1/2$ son más estables para el caso en que han de tomarse en consideración sobrecargas parciales, es decir, cuando éstas son grandes en relación a la carga permanente y es más aconsejable utilizarlas. Para el caso en que la carga total es uniforme, pueden utilizarse cualquiera de ellas ya que en ningún caso el momento en servicio supera el momento último de las vigas.

Cualquier configuración regular puede por tanto ser utilizada para poder ser dimensionada la viga en rotura, y por lo tanto cualquiera de ellas es un óptimo. Elegir una u otra es función más de la distribución en planta del edificio que de la economía de la estructura.

Sin embargo, para que los momentos se mantengan constantes debe terminar la viga en un borde adecuado, que sustituya la longitud indefinida de la viga.

D) CONDICIONES DE BORDE

Examinemos ahora cómo debe terminar el pórtico para mantener este estado de flexión.

Si no colocamos los bordes adecuados, los momentos dejan de ser constantes en todos los apoyos, y aparecen momentos mayores que obligarán a sobredimensionar la viga. Naturalmente una perturbación debida a un borde inadecuado, tiene un margen posible sin aumento de secciones, cosa que puede evaluar en cada caso el proyectista. Para ver exactamente cuál es el borde necesario vamos a examinar uno a uno los tres casos posibles: voladizo, apoyo y extremo aporricado.

Voladizo

Es fácil mantener el estado de flexión sin más que proveer a la última viga, con la luz mayor l , un voladizo de longitud l_v tal que:

$$\frac{ql_v^2}{2} = M = \frac{ql^2}{C_s}$$

y queda:

$$a_v = \frac{l_v}{l} = \sqrt{\frac{2}{C_s}}$$

Sin embargo, nos encontramos con que debemos dimensionar toda la viga para el momento en servicio del voladizo, ya que una rótula plástica produciría la ruina de aquél. Solamente mantendremos el dimensionamiento económico en el caso en que:

$$M_s = \frac{ql^2}{16} ; a_v = \frac{1}{2\sqrt{2}}$$

Sin embargo la solución de terminar un pórtico con un voladizo es tan utilizada en edificación, que vale la pena examinar el margen que tenemos para al menos, aunque la viga se dimensione con el momento de servicio, no haya que sobredimensionarla por flecha. Esto

ocurriría hasta el límite en que la flecha del voladizo es igual a la de la luz mayor. Es decir hasta que:

$$\omega_v = \omega_l$$

$$\frac{ql_v^2}{8EI} - \left(\frac{ql^3}{24EI} - \frac{Ml}{2EI} \right) l_v = \frac{5}{384} \frac{ql^4}{EI} - \frac{Ml^2}{8EI}$$

$$\text{haciendo } a_v = \frac{l_v}{l} \text{ y } M = \frac{ql_v^2}{2}$$

se transforma en:

$$48 a_v^4 + 96 a_v^3 + 24 a_v^2 + 16 a_v - 5 = 0$$

ecuación que se hace nula para:

$$a_v = \frac{l_v}{l} = \frac{1}{2,48136}$$

Que corresponde a un momento de servicio

$$M_s = \frac{ql^2}{12,31}, \text{ y}$$

una alternancia de luces de

$$a = \frac{l_1}{l} = 0,974$$

DE :

HASTA :

Es decir, un voladizo no planteará problemas adicionales de flecha, si se dimensiona con

$$l_v = \sqrt{\frac{2}{C_s}}$$

en todas las alternancias de luces desde la del l y $l/2$ hasta la de l y $0,974 \cdot l$.

Estudiemos ahora los dos únicos bordes reales que pueden utilizarse en el dimensionado mínimo: borde apoyado y borde aporticado.

Borde apoyado

Por lo dicho en el punto C.2. el último vano l_0 debe ser más corto y evidentemente estar a continuación del vano mayor l .

DE

HASTA :

Para obtener la relación entre l_0 , l y el momento de servicio en los apoyos M , podemos plantear la igualdad de giros en A:

$$\frac{ql_0^3}{24EI} - \frac{Ml_0}{3EI} = \frac{Ml}{2EI} - \frac{ql^3}{24EI}$$

y queda, si llamamos $a_0 = \frac{l_0}{l}$,

$$M = \frac{ql^2}{C_s} = \frac{ql^2}{12} \frac{1 + a_0^3}{1 + \frac{2}{3} a_0}$$

$$C_s = 12 \frac{1 + \frac{2}{3} a_0^3}{1 + a_0^3}$$

Sustituyendo los valores de a_0 en la ecuación vemos que tiene un mínimo para $a_0 = 0$, que corresponde a un momento de

$$\frac{ql^2}{14,30}$$

y una alternancia de luces de $0,81 l$ y l a partir del cual crece a_0 y M , hasta llegar al de empotramiento perfecto con $a_0 = 0,81$ y todas las luces iguales. Esta última solución se ha utilizado con frecuencia aunque no las otras posibles.

Vemos que aun así el margen de utilización es muy estrecho y sólo vale para relaciones de luces próximas a la de luces iguales.

Si el diseño del edificio exigiese una luz mayor no existe más solución que la del extremo aporticado que vamos a estudiar a continuación.

Borde aporticado

En esta solución, la unión entre el último pilar con la viga sería un empotramiento elástico.

Podemos distinguir dos casos: que la luz del último vano sea la luz mayor, que la luz sea menor y finalmente para cada caso si la estructura tiene uno o varios pisos.

Vamos a empezar por la primera solución:

a) Borde con la luz mayor.

Para simplificar el desarrollo podemos utilizar el concepto de rigidez: relación entre momento y giro en un extremo de una barra. Si el pilar estuviese empotrado

la rigidez del pilar K_p es $K_p = \frac{4EI_p}{h}$, si está articulado

es $K_p = \frac{3EI_p}{h}$, y si finalmente forma parte de una fila de pilares de igual sección, tiene la rigidez de antimitría:

$K_p = \frac{6EI_p}{h}$, la viga, al tener los dos momentos de

los extremos igual tiene la "rigidez de simetría"

$$K_p = \frac{2EI}{L}$$

Si planteamos la igualdad de giros en el nudo que forman viga y pilar, resulta, si sólo hay un pilar enlazado a la viga: $\theta_p = \theta_v$

$$\frac{M}{K_p} = \frac{ql^3}{24EI} - \frac{M}{K_v}$$

y multiplicando toda la expresión por $K_v = \frac{2EI}{L}$:

$$\frac{ql^2}{C_s} = M = \frac{ql^2}{12} \frac{1}{1 + \frac{K_v}{K_p}}$$

En este caso nos interesa la relación de rigideces que debe aparecer en cada caso entre viga y pilar, y despejando, queda:

$$K_p = \frac{K_v}{\frac{C_s}{12} - 1}$$

K_p varía entonces entre $K_p = 3 K_v$ para $M = ql^2/16$ y $K_p = \infty$ para el momento de empotramiento perfecto.

Esta solución obliga a rigideces grandes de pilares, lo que conduce a sobredimensionamiento de éstos para aumentar su inercia además de para resistir las flecciones debidas al empotramiento elástico. Sólo es viable en caso de vigas muy largas en relación a la altura

de un pórtico o pórticos de un vano, en los que el sobredimensionamiento del pilar, compensa el que tendría la viga si hubiese que calcularla a flecha como apoyada-apoyada.

Para el caso de estructuras de pisos, esta solución en cambio es mucho más factible, ya que al ser el momento que debe resistir cada pilar $\frac{M}{2}$ queda:

$$K_p = \frac{1}{2} \frac{K_v}{\frac{C_s}{12} - 1}$$

$$K_p = \frac{6EI_p}{h}$$

y los pilares tienen dimensiones razonables, hasta un momento de servicio de $ql^2/13,15$.

Naturalmente esta solución exigiría pilares de sección constante a lo largo de los pisos, y el estado de flexión en la viga no podría mantenerse más que en las plantas intermedias, pero aun así las perturbaciones podrían estar dentro del margen económico.

b) Borde con luz menor

Los inconvenientes de la solución con el pilar empotrado sobre la luz mayor pueden obviarse si el pilar se empotra a una luz menor l_0 . En tal caso y variando convenientemente la luz l_0 , se puede dar al pilar una rigidez cualquiera para cada momento M de servicio. El caso tope, en el que la rigidez del pilar es nula, sería el de borde apoyado.

E. METODO

Podemos ya plantear un método general de diseño mínimo de estas estructuras: los condicionantes del diseño serán la luz máxima de las vigas, que deben reducirse todo lo que el diseño del edificio permita y la luz máxima del forjado que debe aumentarse todo lo que los condicionantes económicos permitan. Una vez elegidos estos dos parámetros el cálculo con criterio plástico dará un perfil —que debe elegirse en el orden IPE - IPN - UPN si el canto no supera los 24 cm y IPE - UPN - IPN si lo supera— y por lo tanto una esbeltez λ .

Dado que la esbeltez está limitada por:

$$\lambda_1^{300,42} \leq \frac{1}{\frac{5}{48} - \frac{M}{ql^2}}$$

tendremos una gama de momentos de servicio M que estarán acotados entre:

$$\frac{ql^2}{12} \geq M \geq \left(\frac{5}{48} - \frac{3}{\lambda_1} \right) ql^2$$

RELACION ENTRE MOMENTO EN SERVICIO Y ALTERNANCIA DE LUCES

Si la limitación de flecha es de 1/300

$$y: \frac{ql^2}{12} \geq M \geq \left(\frac{5}{48} - \frac{3}{4\lambda} \right) ql^2$$

si es de 1/400

y por tanto una gama de alternancia de luces, que se puede obtener del gráfico anterior.

Adoptada la alternancia de luces apropiada, se diseñan los bordes necesarios, de entre los que sean compatibles con la forma del edificio. Los pilares serán de sección cuadrada o aproximadamente cuadrada como ya hemos visto.

F. CONCLUSIONES Y UN EJEMPLO

Vemos que para dimensionar un pórtico metálico con el mínimo perfil posible —es decir utilizando el criterio plástico para una viga biempotrada— se puede utilizar cualquier alternancia de luces, siempre que sea regular, que se diseñen los bordes apropiados, y que la esbeltez de la viga sea menor que un valor límite.

Este valor límite depende del momento de servicio en los apoyos, y por lo tanto de la modulación de las luces del pórtico. Podemos decir que la modulación de las luces iguales es la que tiene el límite más alto y por lo tanto la que se puede utilizar para prácticamente cualquier tipo de carga, incluso para la pequeña carga que produciría una cubierta sobre un forjado de viguetas. A medida que la modulación de las luces se va aproximando a la de luz y luz mitad, el límite de esbeltez baja y por lo tanto este tipo de soluciones sólo se puede utilizar para cargas o separaciones de forjado relativamente grandes. No obstante siempre es posible averiguar si una modulación es posible o no, y la modificación que habría que realizar para obtener el perfil mínimo. En las primeras etapas del diseño de un edificio, estas modificaciones son posibles, con considerable economía en el coste de la estructura.

Para concretar el proceso, veamos un ejemplo: Supongamos que queremos cubrir una luz de 9 m, con una carga de 650 kg/m², y una separación de pórticos de 6 m, una limitación de flecha de 1/400, y el perfil mínimo para acero A-42 con un coeficiente de seguridad de 1,5. Este será el IPE 40, que tiene una esbeltez de:

$$\lambda = \frac{9}{0,4} = 22,5$$

Para mayor sencillez, supongamos en primer lugar que el edificio tiene una crujía de 9 m y puede tener o no dos crujías menores a los lados.

El momento de servicio M debe estar entre:

$$\frac{ql^2}{12} \geq M \geq \left(\frac{5}{48} - \frac{3}{4 \times 22,5} \right) = \frac{ql^2}{14,11}$$

La solución de voladizo, que sólo puede realizarse para

$M = \frac{ql^2}{16}$, no es por tanto posible.

La solución de borde apoyado, podrá sin embargo realizarse con un borde cuya longitud esté entre:

$$0,81 l \left(M = \frac{ql^2}{12} \right) \text{ y } 0,53 l \left(M = \frac{ql^2}{14,11} \right)$$

Si el edificio fuese de una sola crujía la única solución sería unir el IPE 40, rigidamente a un pilar, si la altura de éste fuese de 3 m aproximadamente, obligaría a que:

$$K_p = \frac{1}{\frac{14,11}{12} - 1} \quad K_v = 5,67 \quad K_v$$

$$\frac{I_p}{h_p} = 5,67 \times \frac{2 \times 23.130}{9} \times \frac{1}{4} = 7286 \frac{\text{cm}^4}{\text{m}}$$

Que podría solucionarse con un perfil IPH 28 de 2,64 metros de altura, o un perfil IPH 30 con 3,45 m. El sobredimensionamiento de los pilares, compensa el que al menos pueda cubrirse este vano con un perfil laminado.

Si pretendiésemos realizarlo con acero A-52, el perfil mínimo sería un IPE 35, de esbeltez

$$\lambda = \frac{9}{0,35} = 25,71$$

que nos conduciría a una limitación de momentos de servicio entre:

$$\frac{ql^2}{12} \geq M \geq \left(\frac{5}{48} - \frac{3}{4} \frac{2600}{3600} \frac{1}{25,71} \right) = \frac{ql^2}{12,03}$$

Es decir, prácticamente la única solución posible es mantener este perfil con el borde apoyado y una luz igual a 0,81 veces la luz mayor.

Si el pórtico tuviese varias crujías la solución de un vano se transformaría en una solución entre una alternan-

cia de l y $0,81 l$ con el borde de $0,43 l$, y una alternancia de luces iguales y borde igual a $0,81 l$.

Para el caso de acero A-5 la única solución posible es la de luces iguales.

Las luces del último vano podrían ampliarse hasta la luz l , uniéndola rígidamente a un pilar.

NOTA IMPORTANTE

Con este número finaliza la suscripción concertada con esta Revista.

En vista de la respuesta obtenida por parte de nuestros lectores, y en atención a los mismos, los precios no sufren alteración con respecto a 1987, es decir, que los suscriptores de España y Extranjero en 1988 abonarán los importes ya establecidos en el año que termina.