

## COMO CONSTRUIR UN EDIFICIO-PUENTE. ASPECTOS ESTRUCTURALES

Rufino Goñi Lasheras

*Existe, entre los estudiantes de arquitectura, una tendencia instintiva a desligar todos los aspectos prácticos del proyecto y quedarse con los aspectos meramente formales. Esto lleva de manera irreversible a encontrarse con serios problemas a la hora de definir las etapas finales de la entrega, generalmente, instalaciones y estructuras. Estas suponen serios quebraderos de cabeza que llevan al alumno a “pagar” un precio estético para que el proyecto conserve, en la medida de lo posible, dichos aspectos formales. Todo esto se evitaría desarrollando conjuntamente diseño, instalaciones, construcción y, sobre todo, estructura. La clásica pregunta de si fue antes el huevo o la gallina, se puede aplicar al proyecto arquitectónico en los siguientes términos: ¿es la estructura al proyecto o el proyecto a la estructura?*

*Podemos encontrar ejemplos en los que, una vez definido el proyecto, la estructura se adapta a la forma concebida por el arquitecto. Quizá, el más claro sea el Guggenheim de Bilbao, en el que la ingeniería SOM de Chicago jugó un papel esencial en la adaptación de la estructura al proyecto de Gerhy. Por el contrario, la edificación de viviendas urbanas, adapta constantemente el pórtico tridimensional de hormigón a la definición del edificio en el que cambian las distribuciones y los aspectos estéticos externos.*

*El caso que nos ocupa es un claro ejemplo de estructura típica adaptada a las necesidades del proyecto en el que se combinan brillantemente las necesidades de un “solar” excepcionalmente complejo con unos aspectos formales que se integran perfectamente en el entorno y una estructura (la viga en celosía) que se adapta a todo lo anterior.*

### LA INERCIA, ASPECTO ESENCIAL EN EL DISEÑO ESTRUCTURAL

Es ya conocido que la flecha máxima de una viga biapoyada de longitud  $L$  con una carga distribuida  $q$ , es:

$$\delta = \frac{5qL^4}{384EI}$$

Siendo  $E$ , el módulo de elasticidad del material (210 GPa para el acero) e  $I$ , la inercia de la viga. De todos estos datos, el único que no nos viene impuesto es la inercia de la viga. Además, la tensión máxima que existe en la misma viga biapoyada, si consideramos la misma carga distribuida, es:

$$\sigma = \frac{qL^2}{8} \cdot \frac{h}{I} = \frac{qL^2h}{16I}$$

Siendo  $h$  la altura total de la viga. De la misma forma, la inercia es el único dato que no viene impuesto.

En ambos casos, a mayor inercia, menor flecha y menor tensión máxima. La inercia será mayor cuanto más alta sea la viga. Para cubrir una luz de 60 metros, debemos hacer una viga excepcionalmente alta.

Hay un tercer factor a tener en cuenta a la hora de dimensionar una estructura que es la estabilidad. El efecto que provoca inestabilidad en una estructura, sobre todo cuando ésta es de acero, es el pandeo (tanto global como local).

El problema que tiene hacer una viga muy alta para aumentar la inercia es que se vuelve extremadamente esbelta y presenta más inestabilidad.

Por lo tanto, la solución que existe para cubrir una gran luz, es la de hacer una estructura alta convenientemente arriostrada para evitar los problemas de estabilidad. Esto es, en definitiva, una viga en celosía o una malla tridimensional.

Existen otras soluciones estructurales para resolver grandes luces reduciendo el canto de las vigas, aparte de las vigas en celosía. Las más destacadas son: las vigas mixtas (solución combinada de perfil laminado de acero con hormigón unidos por una serie de conectores; de esta solución trata el Eurocódigo 4) y las vigas pre y postensadas. De ellas se hablará en próximos números de esta revista.

### CÓMO HACER UN PUENTE: LOS DISTINTOS TIPOS DE MORFOLOGÍAS

Tradicionalmente, la tarea de diseñar y construir puentes es labor de los Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, no obstante, cuando las necesidades urbanas así lo requieren, el arquitecto se ve en la necesidad de realizar edificaciones que cubran grandes luces sin columnas intermedias y contengan distintos usos.

Es conveniente, antes de entrar a estudiar los distintos tipos de morfologías, dejar bien definidos los conceptos.

*Celosía:* Enrejado de listoncillos de madera o de hierro, que se pone en las ventanas de los edificios y otros huecos análogos, para que las personas que están en el interior vean sin ser vistas.

De esta definición se desprende “viga en celosía” que es aquella realizada a modo de enrejado. En el siguiente apartado, estudiaremos los diferentes tipos de vigas en celosía.

Es muy común llamar a este tipo de estructuras “cerchas”, si bien, la definición no es aplicable a los elementos estructurales como se indica a continuación:

*Cercha:* Regla delgada y flexible de madera, que sirve para medir superficies cóncavas o convexas. También: Patrón de contorno curvo, sacado de una tabla, que se aplica de canto en un sillar para labrar en él una superficie cóncava o convexa.

Por lo tanto, a la hora de realizar una estructura de gran luz, emplearemos vigas en celosía. Por lo general, la viga en celosía es plana y se repite paralelamente en el espacio para dar profundidad a la estructura.

De acuerdo con el uso y disposición de las cargas conviene una u otra tipología o disposición de montantes verticales y diagonales. Algunas de las tipologías más usadas se conocen por el nombre propio de las personas que las patentaron o estudiaron en detalle por vez primera.

En las vigas en celosía horizontales con cargas gravitatorias verticales generalmente el cordón superior (conjunto de barras horizontales o inclinadas situadas más arriba) está sometido a tensiones de compresión, mientras que el cordón inferior está sometido a tensiones de tracción. En cambio, los montantes y las diagonales presentan más variabilidad. Según la inclinación de las diagonales a uno u otro lado pueden estar todas traccionadas, todas comprimidas, con compresiones y tracciones alternas, o con una distribución de tensiones aún más compleja. La tensión de los montantes a su vez suele ser contraria al de las diagonales adyacentes, aunque esto no es una regla general.

*Celosía Long:* Este tipo de celosía debe su nombre a Stephen H. Long (1784-1864), y tiene su origen hacia 1835. Los cordones superior e inferior horizontales se unen mediante montantes verticales todos ellos arriostrados por diagonales dobles.

*Celosía Howe:* fue patentada en 1840 por William Howe, aunque ya había sido usada con anterioridad. Se usó mucho en el diseño de celosías de madera, está compuesta por montantes verticales entre el cordón superior e inferior. Las diagonales se unen en sus extremos donde coincide un montante con el cordón superior o inferior (formando  $\Lambda$ 's). Con esa disposición las diagonales están sometidas a compresión, mientras que los montantes trabajan a tracción.

Esta tipología no constituye un buen diseño si toda la celosía es del mismo material. Históricamente se usó mucho en la construcción de los primeros puentes de ferrocarril. Con la disposición Howe se lograba que los elementos verticales que eran metálicos y más cortos estuviera traccionados, mientras que las diagonales más largas estaban comprimidas, lo cual era económico puesto que los elementos metálicos eran más caros y con la disposición Howe se minimizaba su longitud.

*Celosía Pratt:* Originalmente fue diseñada por Thomas y Caleb Pratt en 1844, representa la adaptación de las celosías al uso más generalizado de un nuevo material de construcción de la época: el acero. A diferencia de una celosía Howe, aquí las barras están inclinadas en sentido contrario (ahora forman V's), de manera que las diagonales están sometidas a tracción mientras que las barras verticales están comprimidas.

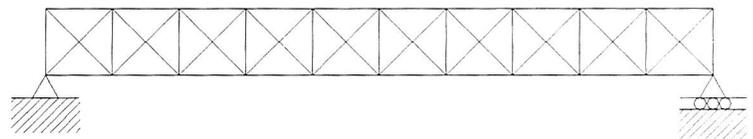
Eso representa ventajas si toda la celosía es de acero, ya que los elementos traccionados no presentan problemas de pandeo aunque sean largos mientras que los sometidos a compresión si pueden presentar pandeo, lo que obliga a hacerlos de mayor espesor. Puesto que el efecto del pandeo es proporcional a la longitud de las barras

interesa que los elementos más cortos sean los que sufren la compresión. La celosía Pratt puede presentar variaciones, normalmente consistentes en barras suplementarias que van desde las diagonales hasta el cordón superior, dichas barras son usadas para reducir la longitud efectiva de pandeo.

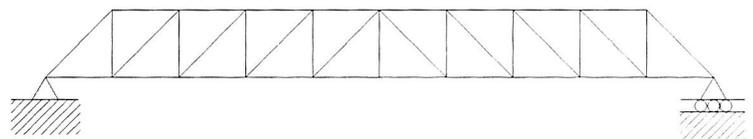
*Celosía Warren:* fue patentada por los ingleses James Warren y Willboughby Monzoni en 1848. El rasgo característico de este tipo de celosías es que forman una serie de triángulos isósceles (o equiláteros), de manera que todas las diagonales tienen la misma longitud. Típicamente en una celosía de este tipo y con cargas aplicadas verticales en sus nudos superiores, las diagonales presentan alternativamente compresión y tracción.

Esto, que es desfavorable desde el punto de vista resistente, presenta en cambio una ventaja constructiva. Si las cargas son variables sobre la parte superior de la celosía (como por ejemplo en una pasarela) la celosía presenta resistencia similar para diversas configuraciones de carga.

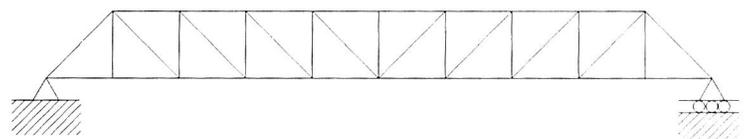
Entre las variaciones más comunes está el uso de doble celosía Warren y la inclusión de montantes.



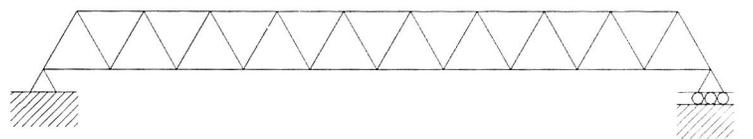
Esquema de celosía Long



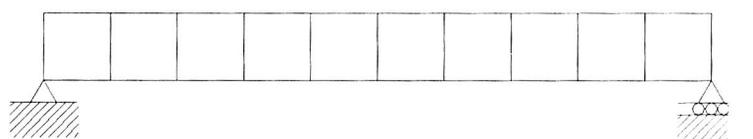
Esquema de celosía Howe



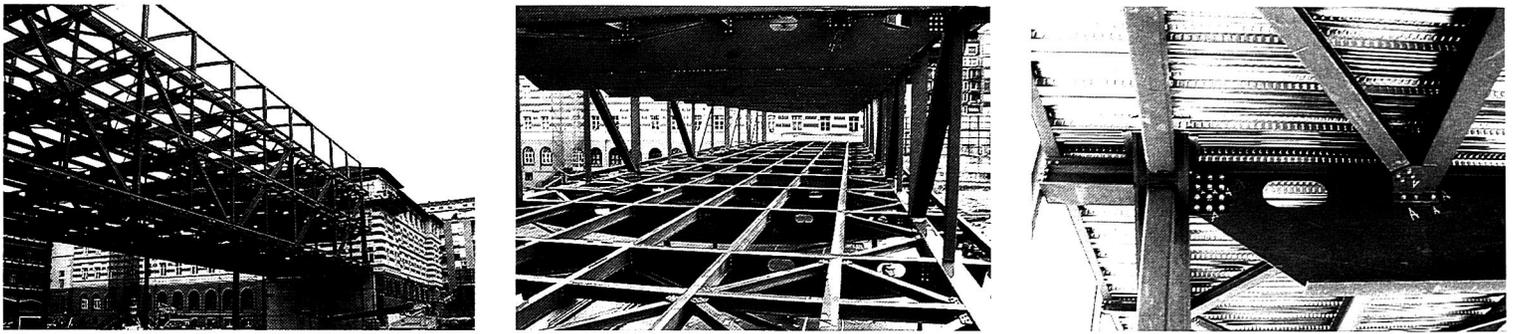
Esquema de celosía Pratt



Esquema de celosía Warren



Esquema de celosía Vierendeel



Diversas imágenes del proceso de montaje de la estructura del edificio-puente

*Celosía Vierendeel*: en honor al ingeniero belga A. Vierendeel, tiene como características principales las uniones obligatoriamente rígidas y la ausencia de diagonales inclinadas. De esta manera, en una celosía Vierendeel, no aparecen formas triangulares como en la mayoría de celosías, sino una serie de marcos rectangulares. Se trata por tanto de una celosía empleada en edificación por el aprovechamiento de sus aperturas.

#### EL CASO QUE NOS OCUPA

Se trata, por lo anteriormente explicado, de una viga en celosía Pratt en la que los montantes más largos están sometidos a tracción

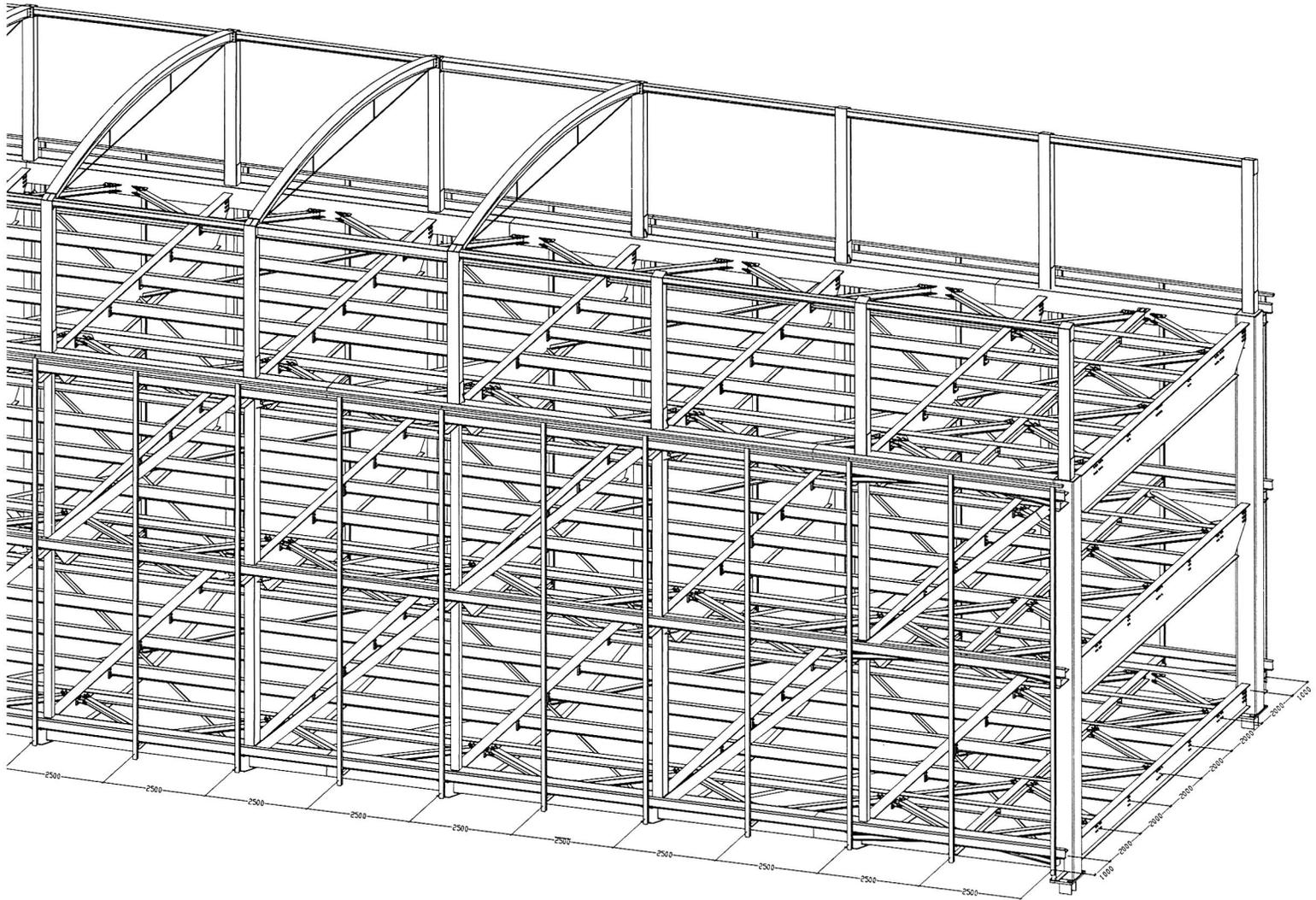
evitando los problemas de pandeo y los montantes, más cortos, soportan tensiones de compresión.

Los forjados se han realizado con un entramado metálico a base de unas grandes vigas que cubren la anchura del edificio (de aproximadamente 13 metros) en las que se han practicado unos agujeros para dejar paso a las instalaciones. En todo el forjado hay diagonales para arriostrar convenientemente el plano del forjado.

Todo este entramado se ha cubierto con una chapa de forjado colaborante que hace también de encofrado perdido hormigonándose encima.

Como se ve en las imágenes, todas las uniones se han hecho atornilladas lo que hace que la construcción en obra sea muy rápida.





**SUBCONTRATAS:**

Excavaciones: CONSTRUCCIONES PÉREZ SANTOS, S.L. Suministro de materiales: PAVIMENTOS NAVARRA – BIL-BU, S.L. – HIMABISA, S.A. – MEDESCA, S.L. – TEJERÍA ITURRALDE S.L. Morteros: BIKAIN – HORMIGONES PREMEZCLADOS ALAVA, S.A. Alquiler de maquinaria: AXOR VIGO. Electricidad: E.B.I. T. ELECTROTÉCNICOS, S.A. Pintura: COMERCIAL DE PINTURAS IZKARA, S.L. Ebanistería: EBANISTERÍA CARRESA. Puertas: EBANISTERÍA CARRESA – MYTE, S.L. Tabiquería y asilamiento: SERALCO 63, S.L. – AE SISTEMAS – AISLAMIENTOS VASCOS ISAVAS, S.L. Pavimentos interiores: PAVIMENTOS NAVARRA – BIL-BU,

S.L. – CERÁMICAS NAVAGRES, S.A.L. Cristalería: CRISTALERÍAS ISALO, S.A. Carpintería: EBANISTERÍA CARRESA. Estructura: URSSA – ACERALIA – SERALCO 63, S.L. INGEMETAL. Metalistería: RAMIL BERRIAK, S.L.L. - TRAMEINSA, Forjados: ACERALIA – SERALCO 63, S.L. Estructura de Hormigón: ACERALI – SERALCO 63, S.L. – REPAIR, S.L. – TEIC, S.A. CUBIERTAS-CERRAMIENTOS: ACERALI – SERALCO 63, S.L. Fontanería: TEINSA 2000. Climatización: CRUZA SUCESORES S.L. Ascensores: MUGUERZA HIJOS, S.L. Mobiliario: ICAZA. Ferretería: EZPELETA, S.A. Suministro para Fontanería: SANEAMIENTOS DEUSTO.

