

MALLAS ESPACIALES DE DOBLE CAPA EN MADERA LAMINADA

J. ESTEVEZ, Dr. Arquitecto
J. PABLOS, Arquitecto
R. VAZQUEZ, Arquitecto Técnico
E.T.S. de Arquitectura de La Coruña

67

Fig. 1. Propuesta de Graham Bell para aparatos voladores en 1907.

La utilización DE LAS MALLAS ESPACIALES EN EL CAMPO DE LAS ESTRUCTURAS DE CUBIERTA DE GRANDES LUCES SE HA CONVERTIDO EN ESTE SIGLO EN UNA DE LAS TIPOLOGÍAS DE MAYORES POSIBILIDADES, TANTO DESDE UN PUNTO DE VISTA MERAMENTE ARQUITECTÓNICO COMO INGENIERIL. AL HABLAR DE MALLAS ESPACIALES NOS REFERIMOS A AQUELLAS ESTRUCTURAS FORMADAS POR BARRAS Y NUDOS QUE SE ENSAMBLAN FORMANDO POLIEDROS SENCILLOS QUE, POR REPETICIÓN, CONFORMAN UNA SUPERFICIE APTA PARA SU FUNCIÓN ESTRUCTURAL. LA POTENCIALIDAD DE LAS MALLAS ESPACIALES COMO SOLUCIÓN ESTRUCTURAL EN EL CAMPO DE LAS ESTRUCTURAS DE GRANDES LUCES ESTÁ FUERA DE TODA DUDA Y SU ADECUACIÓN APARECE AVALADA POR NUMEROSAS REALIZACIONES, DESDE LA PRIMERA PROPUESTA DE GRAHAM BELL EN 1.907 PARA APARATOS VOLADORES (FIG. 1), HASTA UNA DE LAS REALIZACIONES MÁS EMBLEMÁTICAS COMO ES EL PALAU SANT JORDI PARA LOS JUEGOS OLÍMPICOS DE BARCELONA EN 1.992, OBRA DEL ARQUITECTO ARATA ISOZAKI EN COLABORACIÓN CON EL PRESTIGIOSO INGENIERO MAMORO KAWAGUCHI (FIG. 2).

Fig.2. Palau Sant Jordi,
de Arata Isozaki y
Mamoro Kawaguchi.
Barcelona, 1992.

AHORA BIEN, EN ESTE LARGO PERÍODO DE TIEMPO, LAS innovaciones han sido ciertamente escasas y se han centrado fundamentalmente en las derivadas del extraordinario desarrollo de la informática que se ha traducido en el uso de entornos CAD-CAM en el proceso de diseño y fabricación y en un importante salto en los recursos de cálculo que ha permitido el salvar luces cada vez mayores. Asimismo se han producido avances en los procedimientos de izado y construcción de la estructura. Precisamente, durante la semana del 5 al 10 de Septiembre de 1.992 se ha celebrado en la Universidad de Surrey uno de los Congresos más prestigiosos relativos al campo de las estructuras espaciales, el FOURTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON SPACE STRUCTURES, en el que se ha evidenciado esa falta de propuestas innovadoras en el campo de las mallas espaciales.

Por otra parte, dentro de las propuestas estructurales para cubrir grandes recintos, la madera laminada se ha convertido actualmente, y por derecho propio, en una de las soluciones más habituales. Sin embargo, hasta el momento nadie ha planteado la

conjunción de ambos (tipología de malla espacial con barras de madera laminada) en la resolución del problema. La madera laminada se ha utilizado en incontables ocasiones en estructuras espaciales (cúpulas, bóvedas cilíndricas, etc.); sin embargo, su utilización en mallas espaciales de doble capa, tanto sean planas como de simple o doble curvatura es prácticamente simbólica. Y decimos simbólica puesto que es de justicia señalar dos referencias al respecto. Por una parte, los trabajos de P. HUYBERS (Refs. 3 y 4) que emplea rollizos para, con un rudimentario pero ingenioso sistema de unión a base de pletinas metálicas que se unen a los rollizos por medio de alambres, construir mallas de semioctaedros pero de muy poca luz (Fig.3). Al mismo tiempo, existe la patente VAROFORM en la que se emplea un nudo donde es posible sustituir las barras de acero por piezas de madera macizas, tanto aserradas como laminadas.

Ahora bien, nuestro campo de trabajo se aleja claramente de estos planteamientos y trata de dar un salto cualitativo con la aplicación de piezas laminadas huecas en la construcción de mallas espaciales. Este trabajo ha sido presentado en la referida Conferencia Internacional en la Universidad de Surrey donde también se presentó una ponencia de notable interés de GHAVAMI y MOREIRA (Ref.2) en la que mostraron el empleo del bambú en las barras de la estructura espacial (Fig.4), si bien utilizando un sistema de unión que, a nuestro juicio y tal como quedo patente

en su propia exposición del trabajo, presenta importantes problemas mecánicos. No obstante, la propuesta nos ha parecido de notable interés y abre un campo de grandes perspectivas utilizando piezas que nos «brinda» la propia naturaleza.

Como ya hemos indicado, nuestra propuesta plantea una nueva solución estructural en la que se combinan las elevadas prestaciones de la tipología de malla espacial de doble capa con el empleo de barras constituidas por piezas huecas de madera laminada.

Las mallas espaciales como solución estructural presentan notables ventajas de todos conocidas:

* Son estructuras altamente hiperestáticas.

* Elevada rigidez.

* Carácter modulable lo que les da unas grandes posibilidades derivadas de la prefabricación y de la posibilidad de realizar estructuras ensamblables.

* Gran ligereza, característica ésta de enorme transcendencia cuando se trata de salvar grandes luces.

El empleo de piezas tubulares de madera laminada une a las anteriores características unas nuevas posibilidades estéticas, así como las ventajas inherentes de este material, en comparación con el acero, para su utilización en ambientes agresivos, razón esta última que ha favorecido el extraordinario desarrollo de las estructuras de madera laminada en detrimento frecuentemente de soluciones metálicas.

La novedad de la propuesta que presentamos reside en el empleo de piezas tubulares de madera laminada, pues en las referencias citadas anteriormente como únicos casos de los que los autores tengan conocimiento de mallas espaciales construidas de madera, se emplean secciones macizas, ya sean rollizos en el caso de HUYBERS o piezas laminadas en el caso de VAROFORM. Ahora bien, la utilización de secciones macizas presenta importantes desventajas:

* Limita considerablemente la longitud de las barras a emplear pues, en caso contrario, su dimensionado se penalizaría excesivamente por cuestiones derivadas del pandeo.

* La limitación de la longitud de las barras incrementa de forma significativa el número de nudos de la estructura, lo que origina un aumento notable en el coste y la complejidad de la construcción, pues no hay que olvidar que los nudos representan un porcentaje muy significativo en el coste total de una estructura de este tipo.

* Por otra parte, si queremos reducir el número de nudos y, por tanto, empleamos barras de elevada longitud, el problema es que el pandeo nos obliga a utilizar secciones transversales de gran dimensión lo que origina problemas de variaciones dimensionales por cambios húmidos y se dificulta la protección contra ataques de tipo biótico.

Frente a estos inconvenientes, el empleo de secciones huecas nos permite conseguir secciones de reducido espesor (del orden de 3 ó 4 cms.) con un elevado radio de giro y, consecuentemente, con un comportamiento muy favorable frente al pandeo. Al mismo tiempo el reducido espesor elimina el problema de los cambios dimensionales por variaciones en el nivel de humedad y favorece también el tratamiento integral de la madera frente a los mencionados ataques bióticos.

DISEÑO DE BARRAS

Evidentemente, uno de los requisitos más importantes en el diseño de las barras huecas es garantizar un proceso de fabricación fácil lo que, en principio, obligó a desechar otras posibles soluciones barajadas distintas a las propuestas que se ven en la Fig. 5.

Como puede observarse, en el caso de la sección rectangular se han planteado dos variantes para el

laminado de las esquinas, alternando caras o ingletándolas, que en los ensayos experimentales no han demostrado grandes diferencias en cuanto a valores de carga admisibles pero sí en cuanto al patrón de rotura observado.

De las secciones señaladas, las que consideramos más adecuadas, teniendo en cuenta tanto el factor de rendimiento de la sección como su facilidad constructiva, son la sección cuadrada y la triangular, que consiguen un elevado radio de giro mínimo para la

cantidad de material empleado y su facilidad de ejecución. Respecto a este último punto de la facilidad de ejecución, las piezas tubulares pueden obtenerse a partir de secciones rectangulares de ancho 3 ó 4 veces superior al espesor de pared que queremos obtener para, posteriormente, por simple corte y posterior encolado, obtener la sección hueca, lo que permite su conformación con un mínimo de manipulación y con una gran facilidad de ejecución en un proceso industrial.

Fig.3.
Malla espacial
de 10,8m² 16,2m.
de P.Huybers. Lelystad,
1986.

69

Fig.4.
Modelado de malla
espacial de bambú de
Ghavammi y Moreira.
Brasil, 1993.

Fig. 5.
Tipos de secciones
transversales huecas
laminadas.

Fig. 6.
Planta del nudo.

Fig. 7.
Alzado del nudo.

DISEÑO DE NUDOS

Uno de los grandes problemas de las estructuras de madera es la transmisión de los esfuerzos en las uniones, especialmente cuando se trata de esfuerzos de tracción. El diseño del nudo que hemos realizado está constituido por una esfera hueca conformada por dos casquetes roscados que permiten el acceso a su interior. Las barras de madera laminada llevan alojados en sus extremos unas piezas piramidales constituidas por chapas troqueladas, con la misma forma de la sección transversal de las barras, que sirven de enlace de las caras interiores de la pieza tubular con unos redondos macizos soldados a una tuerca en la que se rosca la varilla que establece la conexión con la esfera. Dicha varilla se une en el interior del nudo esférico con una tuerca bloqueable para, posteriormente, mediante un sistema de tuercas, y una vez ajustadas la barras que concurren en el nudo, fijarlas de forma estable en sus posiciones definitivas.

El nudo así diseñado verifica una serie de condicionantes que nuestro equipo consideraba básicos:

* En primer lugar, el nudo, evidentemente, tenía que ser eficaz en la transmisión de los esfuerzos, problema especialmente delicado en el caso de los esfuerzos de tracción que se ha resuelto satisfactoriamente mediante el empleo de chapas troqueladas ocultas que se fijan a la madera durante el proceso de conformación de la sección de madera, sirviendo como «plantilla» para la correcta ejecución de la sección.

* En segundo lugar, la solución debía permitir cualquier configuración de las barras en el espacio de forma que se posibilitase una total libertad en la elección de la geometría, tanto en el tipo de poliedro base que por repetición conforma la malla, como en conseguir superficies planas o con curvatura.

* Permitir un proceso de fabricación integrado en un entorno de diseño asistido, así con un fácil montaje o desmontaje y erección de la estructura. Tal y como se han diseñado las piezas, a la obra llegarían las barras con los nudos piramidales de los extremos ya fijados durante el proceso de construcción de los tubos huecos, con lo que el montaje de la estructura se reduce al correcto posicionamiento de las barras y a la fijación de las tuercas al nudo esférico.

* Posibilitar una amplia gama de ajustes para absorber las inevitables tolerancias de obra, especialmente en este caso, donde trabajamos con piezas de madera.

* Asegurar la ventilación interna de las piezas tubulares de madera con el fin de garantizar las mismas condiciones ambientales en el interior de las barras.

En Figs. 9 y 10 puede observarse el encuentro de las barras con el nudo en el caso de una malla espacial de semioctaedros y de una malla tetraédrica. Las imágenes han sido creadas en un entorno de diseño asistido.

GEOMETRIA DE LA ESTRUCTURA

La complejidad de la geometría de estas mallas y la necesidad de una precisa definición de la misma tanto para el proceso constructivo como para su cálculo, exigió el desarrollo de programas que permitiesen su generación automática a partir de los parámetros definidos por el usuario. En base a ello, se ha elaborado un paquete de software que nos permite, en estos momentos, generar cuatro tipos básicos de malla espacial de doble capa (Fig. 11).

Los programas se han desarrollado en Quickbasic y empleando un programa de transferencia podemos generar ficheros de intercambio para la manipulación de estas estructuras en un entorno CAD. Se acompañan dos ejemplos de estas estructuras en modo alámbrico generadas con dichos programas (Figs.12 y 13).

Fig. 8.
Secuencia de enlace
de la barra con el
nudo esférico.

71

Fig. 9.
Planta del nudo.
Malla de semioctaedros.

Fig. 10.
Planta del nudo.
Malla tetraédrica.

Fig. 12.
Malla espacial
cilíndrica de
módulos
semioctaédricos.

Fig. 11.
Tipología de mallas
consideradas.

Fig. 13.
Malla espacial
esférica de módulos
tetraédricos.

Fig. 16.
Detalle de rotura de probeta

Asimismo, en las Figs. 14 y 15 pueden verse unas perspectivas interiores de dos mallas espaciales planas en las que aparecen ya definidos los nudos y las barras con su acabado final a través del entorno CAD.

Además de los aspectos de diseño que quedan suficientemente explicitados en las ilustraciones que acompañan al presente texto, se han desarrollado programas de cálculo de dichas estructuras cuya pormenorización se aleja de la finalidad de este artículo. También se ha iniciado un trabajo experimental, que continúa en estos momentos, en el que se han ensayado a compresión piezas tanto macizas como huecas con objeto de verificar el funcionamiento de las piezas diseñadas. Especialmente importantes son, en este caso, los ensayos de piezas de esbeltez próxima a las que se emplearían en una construcción real con objeto de comprobar su comportamiento frente al pandeo. Para ello, se confeccionaron barras de 140 cms. de longitud, sección transversal de 6*6 cms. y 1 cm. de espesor que se sometieron a compresión sin ningún tipo de restricciones que coartasen el pandeo, uniéndose las piezas en sus extremos mediante rótulas esféricas de forma que se reprodujese lo más fielmente posible las condiciones de articula-

ción. Los resultados fueron altamente satisfactorios con tensiones de rotura de 280 Kg./cm². para una esbeltez mecánica de 66. La extensión del presente artículo nos impide acompañar los resultados numéricos de los ensayos. Sin embargo, en la Fig.15 se muestra el comportamiento en el momento del colapso de una de las piezas, que ha sido especialmente espectacular por el pandeo lateral de las caras mostrando, no obstante, una elevada capacidad portante (5.35 Tn.).

CONCLUSIONES

A raíz de lo expuesto creemos que se pueden vislumbrar las enormes posibilidades, tanto desde un punto de vista meramente estructural como arquitectónico, de la conjunción de la tipología de malla espacial con el empleo de secciones huecas de madera laminada. Por una parte, las piezas tubulares constituyen una solución de gran viabilidad técnica y con unas elevadas prestaciones desde el punto de vista estructural, al tiempo que los reducidos espesores presentan ventajas desde el punto de aprovechamiento de la madera y de su protección. Por otra parte, el nudo diseñado satisface de forma eficiente la transmisión de esfuerzos entre barras y permite cualquier configuración de barras en el espacio además de permitir absorber las tolerancias de ejecución.

Lo expuesto en el presente artículo corresponde a parte de los trabajos desarrollados por los autores en colaboración con M.Freire, S. Muñoz, J. Álvarez y F. Caramés al amparo de un proyecto de investigación de la Universidad de La Coruña dirigido por el primer firmante, habiendo sido dichos diseños objeto de patente.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- 1.-**ESTEVEZ, J./ PABLOS, J./ MUÑIZ, S./ FREIRE, M./ VAZQUEZ, R. ALVAREZ, J.**
DOUBLE-LAYER SPACE STRUCTURES OF LAMINATED TIMBER TUBULAR MEMBERS
Fourth International Conference on Space Structures, University of Surrey, Guildford, 5-10 Setiembre 1.993, Vol.1 Pp. 563-572.
- 2.-**GHAVAMI, K./ MOREIRA, L.E.**
DOUBLE-LAYER BAMBOO SPACE STRUCTURES
Fourth International Conference on Space Structures, University of Surrey, Guildford, 5-10 Setiembre 1.993, Vol.1 Pp. 573-581.
- 3.-**HUYBERS, P.**
TIMBER POLE SPACE FRAMES
Space Structures, 1.986, Vol.2, Pp. 77-86
- 4.-**HUYBERS, P.**
WIRE BENDING TECHNIQUE FOR BUILDING STRUCTURES OF ROUND-WOOD
International Conference on the Design and Construction of Non-Conventional Structures, London, 1.987