

LA ESTRUCTURA RESISTENTE EN LA ARQUITECTURA ACTUAL*

Javier Manterola Armisén

Ingeniero de Caminos, profesor de la Universidad Politécnica de Madrid
donde codirige la Oficina de Proyectos Carlos Fernández Casado S. L.

El autor realiza un viaje a través de la estructura para evidenciar que la evolución arquitectónica del siglo ha sido protagonizada por una reflexión sobre la estructura. En este trayecto el entendimiento tradicional de lo resistente cambia para convertirse en el máximo factor expresivo de la arquitectura, desvirtuándose su auténtica función a favor de la dimensión plástica.

Una parte significativa de la arquitectura actual se caracteriza por utilizar la estructura resistente como elemento expresivo fundamental del edificio. Las estructuras resistentes, diseñadas, calculadas y construidas, hasta ahora, por ingenieros, han pasado, en algunas ocasiones –las que aquí nos interesan–, a ser diseñadas por arquitectos que acentúan su dimensión plástica. En otras ocasiones los arquitectos se han reducido a dulcificar la elementalidad de lo resistente en cuanto tal.

El abandono de lo cuantitativo, para centrarse en lo cualitativo y expresivo, es el *leit motiv* de ese proceder arquitectónico que ha dado frutos muy brillantes en bastantes ocasiones, no hay sino que ver el trabajo de Frei Otto y otros, pero que, en otros casos, perjudican el entendimiento de lo resistente al primar excesivamente la apariencia de estructura sobre lo que es la estructura en sí.

En el artículo se pasa revista a una serie de estructuras de edificios actuales, ordenados por tipologías resistentes, celosías, planas o espaciales, pórticos, cúpulas, cubiertas colgantes, hinchables, estructuras *tensigrity*, etc., precedido de un rápido repaso de lo que ha sido el entendimiento de lo resistente a lo largo de la historia.

Estructura, racionalidad y expresión

Las construcciones tienen estructura resistente hasta que dejan de tenerla. Tomada en su acepción primera, la frase anterior carece de sentido, pues es evidente que mientras exista gravedad y los materiales pesen será necesario sostener un techo y por tanto existirá la estructura resistente. Sin embargo, ese tener se puede entender de otra manera, aquella en la cual la estructura resistente se hace presente de una manera expresa en las construcciones,

hasta el punto que les configura y determina. Una catedral gótica, una estación de ferrocarril o una presa bóveda son ejemplos de esta manera de estar presente (figs. 1, 2 y 3).

La necesidad es un parámetro importante en esta manera de estar. La tecnología del momento determina las posibilidades que pueden utilizarse para resolver cualquier problema de construcción. Cuando nos enfrentamos a problemas que limitan con nuestras posibilidades tecnológicas, aparece la estructura resistente con toda su importancia. Las posibilidades con que los constructores de Santa Sofía contaban para resolver el reto espacial que se habían propuesto, eran tan justas, que tuvieron que hacer un alarde formidable que llamó la atención durante siglos. Este resultado quedó y los que siguieron contaron con él. En ese sentido, Santa Sofía se convierte en una nueva posibilidad que permitirá enfrentar con seguridad las mezquitas otomanas de los siglos xv y xvi. Pero entre Santa Sofía y la Mezquita Azul han pasado 1.000 años y durante todos estos años no ha pasado casi nada en aquella zona. El procedimiento de prueba y error, única forma de progreso del conocimiento en aquella época, es muy lento. Incluso se puede perder y no vuelve a recuperarse hasta mucho tiempo después o no se vuelve a recuperar nunca y desde luego se transmite muy mal de un lugar a otro.

En la época gótica, la presencia del Panteón romano resultaría milagrosa. Sus 40 m de luz era una cifra inalcanzable para constructores que rara vez pasaban de los 15 o 20 metros. El Panteón no constituía una posibilidad, pues había dejado de ser una experiencia operativa. Ca-

recía de significado para aquella gente asombrada. Su tecnología, el conocimiento de su manera de construir, se había edificado en otros parámetros nuevos, originales, que tenían su propio discurrir y que así prosiguieron hasta que en el Renacimiento se encuentran y polarizan por el poderoso impulso italiano.

Para un constructor del Renacimiento o para otro del Barroco o del Neoclásico, la frase inicial de que las construcciones tienen estructura resistente hasta que deja de tenerla, no tendría sentido, sea cual fuere el punto de vista desde el que se la mirase. Estaban tan absolutamente faltos de posibilidades para construir, eran tan limitadas, que lo resistente constituía una presencia insoslayable para cualquier planteamiento espacial que quisiera considerarse.

Sólo cuando a lo largo del siglo xix se empiezan a aplicar los métodos y conocimientos científicos a la construcción, es cuando las posibilidades que la tecnología ofrece empiezan a ser mayores que las necesidades que requerían la mayoría de las construcciones. Es en este momento cuando la estructura resistente puede dejar de estar presente. En la arquitectura, la estructura resistente podrá ser concebida como una intención. Se pondrá en evidencia o no en función de los gustos o planteamientos constructivos del que la diseña.

Sin embargo también esto es una verdad relativa, pues mientras se avanzaba en el conocimiento científico de la construcción, las posibilidades aumentaron en tal medida que se pudieron imaginar y hacer cosas inconcebibles con anterioridad y, por tanto, crearon, configuraron y arrastraron todos los procesos de in-

tención arquitectónica válidos en la dirección de la tecnología. En el siglo XIX y principios del siglo XX, el planteamiento científico de la construcción se convierte en lo que es, allí donde hay que estar para trascender. Y esta manera de progreso trasciende lo resistente para ampliarse a toda la concepción constructiva. Cualquier intención arquitectónica pasaba por un proceso de racionalidad que acabará transformando la construcción.

Resultaba que, entonces, lo resistente seguía presente en la intención arquitectónica por necesidad, cuando se enfrentaban los grandes espacios, las grandes alturas, etc., y por vocación, cuando se enfrentaba lo pequeño.

Hasta que el impulso de racionalidad cede, deja de ser la explicación universal. Entonces es cuando la presencia intensiva de lo resistente empieza a dejar paso a otro tipo de intenciones. Las construcciones dejan de tener estructura resistente en esa manera de tener que hemos descrito. Todo el estructuralismo que se ve hoy en día en el movimiento *High Tech*, cada vez más extendido, no responde a un problema de necesidad sino a una voluntad expresiva, a un movimiento estético más.

Arquitectos e ingenieros se enfrentan, con sus respectivos puntos de vista, a esta época en la que la estructura resistente es requerida en su presencia tecnológica como parámetro estético. No se plantean los edificios con el rigor que la ciencia se propone en todo lo que enfrenta. Por parte del arquitecto se argumenta que el edificio es mucho más que su dimensión tecnológica.

Más aún, aquello que constituye la esencia del edificio, que mueve y despierta el interés del ar-

quitecto, que da sentido a todo su quehacer, tiene a la tecnología, a la estructura, como una herramienta más para alcanzar ese algo indefinible, indescifrable que constituye la auténtica obra de arte.

Y es curioso, es precisamente, en estos periodos de transición, de paso de una época a otra, cuando se acentúa lo inefable e inaprensible y se desprecian los medios y procedimientos. Y por el contrario, es en las épocas más creativas, las de cambio, cuando las esencias se encuentran, se vehiculan a través de lo instrumental y lo aparentemente secundario.

Sea como fuere, la arquitectura se encuentra ahora en un periodo de cambio y, muchas veces, nos quiere hacer pasar por auténticos la sofisticación de lenguajes acabados. Todo el énfasis en lo esencial suena un poco a hueco, a excusa de un pensamiento «débil» incapaz de arrastrar y que encuentra en la novedad el fundamento de todo su quehacer. Nunca han existido tantos arquitectos estrella y, no sé por qué, nunca hemos estado tan faltos de guía, de cambios que satisfagan.

Mientras, los puntos de vista de arquitectos e ingenieros, respecto a este problema, no parece que caminen por el mismo sitio. En esta época terminal se está imponiendo el pensamiento totalizador del arquitecto y el objeto de este artículo es mostrar y analizar cómo se manifiesta, en aquellos casos que la estructura resistente se tiene en cuenta como valor expresivo. Pero, para ello, vamos a realizar previamente una corta introducción histórica que nos sitúe en cómo ha sido el pensamiento resistente a lo largo del tiempo y cómo se ha

concretado en los edificios, pues es bueno conocer lo que ha sido para entender lo que está siendo. Y la vamos a dividir en dos periodos. El primero, caracterizado por el método de prueba y error, corresponde a todo lo que se podría entender por arquitectura antigua. Dura desde la más remota antigüedad hasta el siglo XIX. El segundo periodo corresponde al predominio de la forma ingenieril que discurre a lo largo del siglo XIX hasta mediados del siglo XX.

La época antigua

La cúpula del tesoro de Atreo constituye el legado primero y transcendental de la voluntad de cubrir un recinto con elementos mucho más pequeños que la luz a salvar. Y esto es la formulación del problema básico de las formas construidas y que se desarrolla hasta la actualidad con los mismos planteamientos de hace 3.000 años. No se trata, como hacían los egipcios, de destacar enormes sillares que saltando de lado a lado servían para cubrir espacios obligatoriamente reducidos, sino lo contrario, hacer con lo pequeño lo grande.

La cúpula del tesoro de Atreo, 1325 antes de Cristo obtenida por aproximación de hiladas, tiene un comportamiento resistente dudoso. Participa de las ventajas evidentes de la construcción en avance en voladizo contrapesada, ayudada por el rozamiento horizontal entre las dovelas de hiladas sucesivas y la coacción horizontal presente por la forma circular de sus anillos. Parece indudable que esta forma es el resultado final de un proceso que empieza por el dolmen, pero que éste no podría resolver ni por el peso ni por el tamaño de los sillares necesarios. Se sigue, a lo largo de toda la Prehis-

toria, a través de los talayots menorquines; las construcciones asirias de Hatlusa, para terminar en bóvedas cilíndricas por aproximación de hiladas que culminan en esta cúpula. Se ponen en juego sucesivamente una serie de mecanismos resistentes no conocidos entonces, pero guiados por la constatación de que realizando las mal llamadas «falsas bóvedas» se resolvían problemas necesarios.

Desde el tesoro de Atreo (siglo XIV antes de Cristo) hasta el Panteón de Roma (123-138 d.C.) han pasado 1.500 años. El arco y la bóveda propiamente dichos, presentes en mayor o menor medida desde la más lejana antigüedad (hay arcos de ladrillo y de adobe en Mesopotamia y Persia, incluso en Egipto, en el segundo milenio a.C.) se establecen definitivamente como construcción romana. Con 43,6 m de diámetro y 43 m de altura, esta cúpula, de dimensiones desconocidas, está perfectamente diseñada. El romano conocía el arco, pero aunque veía cúpulas constantemente, era incapaz de eliminar la fisuración radial que se produce en los arranques como consecuencia de la deformación circunferencial en la parte inferior. Por esta razón proyecta la cúpula como arcos independientes, con espesor y peso específico decreciente de arranques a clave. Dispone un aligeramiento doble en la cúpula, por su encasetonado exterior e introduciendo cerámica hueca en su interior. Con aproximadamente 5.000 t de peso, se apoya sobre un muro de 6 m de ancho que equilibra el empuje horizontal de esta cúpula fisurada.

Esta misma manera de concebir la cúpula, como un conjunto de arcos adosados, con espesor y peso decreciente de arranques a clave

y con una gran estribación lateral se repite en una configuración mucho más sofisticada en Santa Sofía de Constantinopla, cuatrocientos años después, 532-537.

En la arquitectura gótica aparece la construcción nervada como solución a un problema constructivo. El gótico nerva la cúpula, la aligera, pliega la forma entre arcos y elimina así la rigidez circunferencial de la cúpula causante del agrietamiento radial de las cúpulas romanas. Define con toda claridad el trabajo como arcos que estriba perfectamente. No se sabe qué grado de consciencia tenían los constructores medievales de este principio resistente, pues el gótico, como cualquier otro estilo, no se explica únicamente por la solución formidable de un problema constructivo y resistente. Presenta la construcción nervada, como alternativa a la construcción continua, lo que determinará la otra manera de enfrentarse ante la forma resistente que persistirá desde entonces (fig. 4).

En Santa María del Fiori (1420), Brunelleschi mantiene la solución nervada por problemas constructivos, pero no pliega la forma entre nervios, por lo que debe zuncharla circunferencialmente con madera para evitar el agrietamiento, lo cual no lo consigue. La compatibilidad de deformaciones, radial y circunferencial, no se controla en aquella época, lo que hace bastante inútil su propósito.

En San Pedro de Roma (1506-1626), la cúpula cambia desde la propuesta de Bramante, que adopta el modelo del Panteón o de Santa Sofía con gran peso y contrarresto en la parte inferior, hasta la propuesta de Miguel Ángel, mejorada a efectos resistentes por Giacomo della

Porta (1580), pero que tampoco consigue eliminar el problema de la fisuración vertical en la parte inferior, el cual seguirá presente hasta el siglo XVIII (fig. 5).

La solución gótica que resuelve el problema resistente y constructivo vuelve a ser recogida, por una sola vez, por Borromini, en St. Ivo a la Sapiencia (1642-1650) de Roma, en el que el plegamiento no sólo lo sitúa en la cúpula sino en las paredes laterales. Es una disposición genial para la configuración del espacio barroco y una perfecta disposición resistente.

La triple cúpula de San Pablo de Londres, de Wren (1675-1710), doble en realidad, pues la superior no es sino una forma cúpula referida a la intermedia por formas de madera, o el Panteón de París (1759) de Soufflot incrementan la componente vertical en la base para centrar los empujes, sin resolver el problema resistente que será necesario esperar a la llegada de la tecnología científica para resolverlo.

Durante todos estos siglos, el método de prueba y error intenta solucionar un problema difícil consiguiéndolo a medias, pues siempre, siempre, el objeto del problema no era sólo hacer una forma resistente, sino la de hacer una iglesia, por ejemplo. La bóveda y la cúpula, nervadas o no, se convierten en la única posibilidad aceptada de cubrir un gran espacio, lo que determina la asociación inversa, un gran espacio es algo dentro de una cúpula.

El clasicismo de la forma ingenieril

Todo el siglo XIX y la primera mitad del siglo XX constituye el apoteosis de la forma ingenie-

ril, su expresión más pura y contundente. Está asociada a lo largo del siglo XIX con el hierro y el acero y el siglo XX, con el hormigón armado y pretensado, además del acero. El modelo científico de acercamiento a lo resistente sustituye al método tradicional de prueba y error.

La característica que puede distinguir la obtención de la forma en esta época es la conseguida por la optimización del comportamiento resistente. Todo se ordena por la necesidad de salvar luces importantes a mínimo coste. Reducción de peso con materiales artificiales muy resistentes, depuración de las formas estructurales para conseguir su máxima eficacia resistente y constructiva, desarrollo formidable de los métodos de cálculo y de cuantificación para obtener esfuerzos seguros. Todo esto proporciona a los técnicos confianza en su propia técnica, logro éste fundamental para proseguir en su empeño de ir un poco más allá cada vez. Y la cultura en general y la sociedad se ve reflejada en esa mentalidad, la hace suya e impulsa. Los ingleses llegaron a enterrar a sus grandes ingenieros, Brunel, Telford, Stephenson, etc., en la Abadía de Westminster.

Los logros conseguidos por esa manera de proceder son tan formidables que de los 43 metros del Panteón de Roma, que a finales del XVIII seguía siendo una de las mayores luces conseguidas, pasamos a los 114 m de la Sala de Máquinas de Contamin de 1889 o los 200 m del Astrodome de Houston en 1968. La geometría asociada a esas formas es muy simple: esferas, cilindros parabólicos, formas antifuniculares, etc., lo cual facilita su respuesta resistente, su cálculo y su construcción.

De entre la gran cantidad de obras que se pueden usar como ejemplos, he elegido unas pocas, especialmente transcendentales.

El Palacio de Cristal de Paxton (1851) y la Galería de Máquinas de Contamin (1889) (fig. 6), son dos ejemplos formidables del planteamiento científico e industrial de la construcción del siglo XIX. Paxton introduce con su Palacio de Cristal la industrialización total con el fin de construir mejor, más deprisa y menos caro. Abre todo un panorama donde, con más o menos intensidad, según la época, se vuelca la construcción. La Galería de Máquinas, un gran pórtico triarticulado de 114 m de luz que se multiplica a intervalos constantes hasta alcanzar los 420 m de longitud, supuso un alarde sin precedentes en la aplicación de los nuevos materiales y métodos de cálculo, culminando así la ya casi centenaria tradición de construir estaciones de ferrocarril. El siglo XIX está asociado al ferrocarril, al hierro, al acero y a la industrialización. Sus resultados, fuertemente contestados como obras torpes, utilitarias y necesarias, sólo fueron reconocidas como obras y formas fundamentales mucho más tarde.

El primer Frontón Recoletos de Torroja (1935) o los Hangares de Orbetello de Nervi (1944) (figs. 7 y 8), constituyen dos obras fundamentales en la historia de la ingeniería moderna. Son dos láminas cilíndricas de hormigón, la primera *in situ*, la segunda prefabricada. Ambas establecen de una manera definitiva, más Recoletos que Orbetello, un procedimiento nuevo de ordenación del material para resistir con el mínimo peso. Al contrario de lo aconsejado por la experiencia de

estribar los arcos, aquí el trabajo longitudinal, la gran viga, que es una lámina cilíndrica, no tiene más necesidad que controlar su deformación transversal para no perder la forma y con ella la eficacia resistente. La guerra, las guerras, acabaron con ambas estructuras.

En la Feria de Montreal de 1967, Buckminster Fuller diseña y construye el pabellón USA (fig. 9). Una esfera aproximada por su icosaedro inscrito, el cual se subdivide en 20 triángulos equiláteros esféricos, los cuales se subdividen a su vez en triángulos formando hexágonos adosados, salvo los correspondientes a los vértices del icosaedro que son pentágonos. Esta descomposición de la esfera, denominada estructura geodésica por su autor, se apoya en el Planetario de Jena de 16 metros de luz de Bauersfeld y Dischinger (1926). Fuller utiliza células elementales piramidales que asocian dos capas de tubos superficiales proporcionándole así la necesaria rigidez a flexión de una superficie no funicular. Tanto en superficies planas o superficies curvas, con una sola capa o doble capa, las celosías espaciales de tubos resuelven los problemas de flexión en el plano y fuera del plano, con elementos rectos biarticulados. Es la manera de reproducir el continuo con elementos lineales y que tendrá un formidable desarrollo en el futuro.

En el dominio de las cubiertas colgadas destacan dos obras formidables, la Arena Raleigh de Nowicki (1953) y el Estadio Olímpico de Múnich (1967-72) de Behnisch, Schlaich y otros (figs. 10 y 11). Son los ejemplos primeros de los dos sistemas de soportar las formas colgadas, con soporte continuo –los arcos inclinados de Raleigh– o por elementos puntuales –Mú-

nich–. El primero exige una gran rigidez en la forma de la estructura, el segundo permite la formidable libertad formal de Múnich. Más barato el primero, más caro el segundo, más simple el primero, más complejo el segundo. Ambos sistemas se van a desarrollar ampliamente. El soporte continuo está asociado a cubriciones de estadios cerrados. Los soportes puntuales se desarrollarán por doquier, asociados al tirante y al puntal como elementos para mantener la forma y dar curvatura a la cubierta.

La Basílica de San Pío X de Lourdes (fig. 12), fue estudiada, en primer lugar, por Nervi y después por Freyssinet. Las respuestas de ambos fueron similares, concediéndosele finalmente a Freyssinet que aplicó su conocido pórtico de patas inclinadas de hormigón pretensado, que utilizó en la construcción de puentes. La cubrición de grandes espacios por vigas, pórticos o arcos paralelos, que saltan de un lado al otro sin cantos excesivos, es una excelente solución que, antes y después, se utilizará con gran maestría. Esta solución de la cubierta plana se complica cruzando las vigas en planta, lo cual ha experimentado a su vez un notable desarrollo.

Finalmente, un concepto formidable de enfrentar la problema de las grandes y muy grandes luces es la utilización de estructuras hinchables, planteado inicialmente por Walter Bird. Absolutamente generalizado su uso para la cubrición provisional y transportable de almacenes, campos de tenis, etc., y demás superficies pequeñas, este procedimiento enfrenta activamente la gravedad por presión de aire interior. Para las grandes luces encontró su aplicación inicial en el formidable pabellón

USA en la feria de Osaka, de Walter Geiger, el cual se ayuda de una malla pretensada para contener la forma dentro de una geometría controlada (fig. 13). Su uso se extendió rápidamente a la cubrición de grandes estudios como el Pointiac Stadium de 220 m × 160 m en Detroit. Sin embargo esta formidable invención, tan próxima a las futuras estructuras adaptables, se usa cada vez menos para edificios permanentes por los problemas de la evacuación de grandes nevadas.

La mayor propuesta realizada con esta tecnología la hace Kenzo Tange y Ove Arup para un estudio, patrocinado por Hoeschst AG, de construir una ciudad en el Ártico para 15.000 a 45.000 personas. La propuesta es una estructura neumática estabilizada por cables con un radio de 2.200 m, una altura de 240 m. Utiliza fibras de poliéster en lugar de acero para los cables.

76

La forma resistente en la actualidad

La ingeniería, desde el siglo XIX, se caracteriza por la utilización del procedimiento científico para enfrentar la construcción. Avanza etapa por etapa, divide la dificultad en tantas partes como sea necesario para resolverla. Y la solución se consigue cuando es posible medir y cuantificar. Se podría decir que para la ingeniería lo que no se puede medir, no existe. Inventa formas resistentes eficaces, económicas en materiales y medios de puesta en obra capaces de salvar luces nunca vistas.

Huye de la totalidad. Aborrece esa manera de pensar que parte del principio de que si no se comprende todo, no se puede explicar nada. Como decía Levy Strauss, es la ambición tota-

litaria del pensamiento salvaje. El mito fracasa en su objetivo de proporcionar al hombre mayor poder material sobre el medio. A pesar de todo le brinda la ilusión, extremadamente importante, de que puede entender el universo y además de que lo entiende.

Pues bien, la época en que los ingenieros imponían su manera de enfrentar la construcción ha pasado. La sociedad exige otra cosa, exige una interpretación de la totalidad y los intérpretes de esa otra cosa, de la totalidad, son los arquitectos.

Y de hecho, los primeros síntomas de la introducción de «esa otra cosa» se produce tempranamente, coexistiendo con la época de empuje avasallador de la ingeniería pura. Y los realizan dos arquitectos que siempre se han distinguido por poseer una clara predisposición y admiración hacia las formas ingenieriles, pero con la búsqueda añadida de una expresión plástica personal.

Eero Saarinen diseña entre 1958-1963 la terminal TWA de Nueva York utilizando una estructura laminar de geometría compleja, no calculable analíticamente en aquel momento y diseñada sobre maqueta, no sobre papel. Se apoya en la libertad formal que Torroja empuja a insinuar en Tachira. El edificio, de dimensiones reducidas para un aeropuerto moderno, está modelado. Abandona la geometría pura de las formas ingenieriles para ceder ante una plasticidad que figura un pájaro a punto de empezar el vuelo (fig. 14).

Si el edificio de Saarinen es más una intención que un logro, Kenzo Tange, en 1964, completa los pabellones de la Olimpiada de Tokio. Ya

Saarinen, en 1956-58, proyecta y construye la pista de hielo de la Universidad de Yale, un gran arco centrado longitudinal, del que cuelga la cubierta, sujeta en los bordes, solución ésta que se repetirá varias veces en el futuro. Tange introduce dos variantes significativas dentro del mismo esquema. Sustituye el arco por unos cables colgados y los cables transversales los cambia por perfiles rígidos arqueados que le permiten salirse de la rigidez formal que exige la catenaria. Busca una plasticidad añadida que la forma resistente pura no le proporciona y la realiza un arquitecto de talento que, a lo largo de su trayectoria profesional, había construido muchas obras con un claro diseño ingenieril (fig. 15).

Estas dos obras nos dan pie a analizar cuál es el planteamiento resistente, la manera en que los arquitectos actuales, interesados en la estructura resistente, piensan sobre la misma. Y voy a elegir tres casos significativos, Félix Candela, Renzo Piano y Frei Otto. Los tres tienen características comunes, aunque distinto talento resistente. Y esa característica común no es otra que el enfrentamiento de lo resistente a través de lo cualitativo, contra lo que para un ingeniero es artículo de fe, que es lo cuantitativo. En esa dirección el arquitecto es como el artesano, que guiado por la intuición, plantea soluciones formales a problemas resistentes, apoyados, a veces, en la experimentación no cuantificada. Y en esto los tres arquitectos son muy parecidos, hacen maquetas de formas resistentes, como lo hacía Gaudí, tan presente en el pensamiento de los tres, especialmente en el de Frei Otto.

Y aquí está su punto débil, ya que la escala, el tamaño, la magnitud del problema es consus-

tancial a la esencia del problema. Para Piano, para Calatrava, para Candela, es lo mismo diseñar una escultura, que un mueble, un automóvil, un palacio de los deportes, un puente o un rascacielos. Todos son tratados como objetos sin escala que la tecnología actual, con sus enormes posibilidades, permite hacerlos realidad. Pero la escala desbarata muchas propuestas originales. Candela desarrolló un formidable abanico de posibilidades de paraboloides hiperbólicos.... pequeños. Con ello cubre iglesias pequeñas, pero cuando tiene que hacer algo grande, como el Palacio de Deportes de la Olimpiada de México, se equivoca. Está mal, ese palacio es una estructura que no está a la altura de lo que se sabía hacer entonces (fig. 16).

La realidad del problema cambia con la escala. Con lo pequeño todo es posible, con lo grande la idea se transforma. Y esto se ve claramente en los trabajos del otro gran artesano de las formas resistentes, Renzo Piano. Algunas de sus realizaciones están a mitad de camino entre un objeto de amueblamiento urbano y una estructura. La originalidad de una propuesta en maqueta, para una estructura, no encuentra dificultad si su realización tiene un tamaño moderado, si hágase lo que se haga, esa disposición siempre resiste. Se plantean detalles y disposiciones que no serán válidos en un tamaño grande. El acercamiento a lo resistente que realiza con Peter Rice siempre es brillante, pero no siempre traspasa la frontera de la originalidad, que parece ser un argumento suficiente (fig. 17).

El caso de Frei Otto es muy diferente. Ha iniciado, planteado y resuelto muchas de las más

interesantes estructuras actuales desde su Instituto para estructuras ligeras de la Universidad de Stuttgart. Desde estructuras colgadas, plegables, hinchables, a formas abovedadas libres de gran belleza y transparencia. Su trabajo es el inspirador del proyecto para los juegos Olímpicos de Múnich de 1972, con que Behnisch y su equipo ganaron el concurso celebrado al efecto. El tamaño de la propuesta era mucho mayor del que con antelación el propio Frei Otto había realizado en el pabellón alemán de la Expo de Montreal (1967). Y esta brillantísima idea estuvo a punto de no llevarse a cabo, pues la cuantificación de sus esfuerzos la convertía aparentemente en irrealizable. De hecho se llegó a proponer otra idea menos brillante y más razonable. Fue sin embargo el espíritu de los miembros más jóvenes del equipo de Behnisch, con la ayuda del propio Frei Otto y un brillantísimo equipo de ingenieros entre los que se encontraba Jörg Schlaich, los que tuvieron que reinventar la idea desde presupuestos cuantificables y construibles y así Múnich fue posible.

Sin embargo, lo pequeño y lo grande es algo relativo a las posibilidades resistentes del momento en que se construyen. Y una construcción pasa de uno a otro estamento con el paso del tiempo y cuando eso ocurre se nota, pues la obra deja de tener la fruición que siempre acompaña a lo necesario y original. Muchas de las llamadas estructuras *high tech* participan de este problema. Insisten en aparecer como necesarias cuando son sólo pura apariencia. Toda la expresión y desarrollo del acristalamiento de edificios emblemáticos parece un poco desquiciado. Entre la sencillez de

la sujeción del enorme acristalamiento del Palacio del Lavoro, Turín, 1960-61, de Nervi, a la enorme profusión de tubos, celosías y cables con que muchos arquitectos quieren presentar como imprescindible lo que sólo es expresión plástica de la tecnología, hay una gran diferencia de honradez estructural.

Pero también hay que decir que si la falta de cuantificación constituye el punto débil del planteamiento estructural de estos arquitectos, también en ello encuentran su punto fuerte, pues la ausencia de las exigencias introducidas por el cálculo y la construcción les dan alas para generar muchas propuestas válidas e interesantes.

Para analizar la situación de la estructura resistente en el ámbito de la arquitectura en el momento actual, vamos a elegir una serie de tipologías básicas, celosías, cubiertas colgadas, pórticos, etc., en los cuales el análisis de lo novedoso en la actualidad puede contemplarse adecuadamente. Dejamos de lado todas las manifestaciones de lo resistente en la arquitectura, en aquellas obras, en las cuales la estructura resistente no está considerada como elemento expresivo fundamental, toda esa parte del quehacer arquitectónico que no se cuestiona sobre lo resistente sino que simplemente lo utiliza.

Dejamos también de lado manifestaciones arquitectónicas tan importantes para la estructura como los rascacielos y las torres, pues en ellos encontramos las mismas manifestaciones que en las tipologías elegidas y que alargaría demasiado un artículo ya demasiado largo.

La celosía

La celosía metálica ha venido asociada, en estas últimas décadas del siglo XX, a la celosía espacial de tubos, desarrollando el trabajo de innovadores tales como Wachsmann, Makowski, Fuller... Con su triangulación superficial y su simple o doble capa, esta estructura es capaz de resistir esfuerzos tipo membrana y losa, lo que posibilita para acoplarse a las configuraciones más diversas, planas, curvas, variables, con apoyos puntuales o no.

Como en pocas otras estructuras, el punto fundamental del diseño es el nudo; Mero y Orona, muy parecidos, han demostrado su gran flexibilidad para acoplarse a situaciones muy diversas. Aún, en la más pura ortodoxia ingenieril, la cubierta del estadio de Split en la Antigua Yugoslavia (Croacia), representa una de las cumbres en la utilización de la doble capa en una cubierta con nudo Mero, de 215 m de luz principal y voladizo transversal de 45 m, que utiliza una malla tetraédrica de 3×3 m de lado y 2,3 m de canto.

El Palau Sant Jordi de Arata Isozaki y Marmoru Kawaguchi constituye un planteamiento menos ortodoxo en la celosía de doble capa. Como su antiguo patrono, K. Tange, Isozaki abandona la geometría pura, antifunicular y económica, por otra geometría menos eficaz y uniforme, pero que crea planteamientos espaciales más complejos con diversidad de imágenes y de volúmenes.

Desde un punto de vista general y con perspectivas de futuro, lo que tiene mucho más interés es el Palacio de Deportes de Pallafolls, también de Isozaki y M. Calzón. Aquí se ma-

nifiesta formidablemente la flexibilidad que esta ligerísima estructura tiene para acoplarse a cualquier forma en planta o alzado. Sin transición de continuidad pasa de una forma abovedada a otra plana. Nos descubre espacios inéditos y nos indica que por ese medio la arquitectura puede cambiar el concepto mismo de espacio, tan asociado hasta ahora con el que ofrecen las formas elementales geométricas. Esta excelente obra tiene, a mi modo de ver, un único problema y es el borde plano de su fachada y su estructura de grandes puntales inclinados (fig. 18).

Con las celosías espaciales de doble capa, todo lo imaginable puede hacerse, pero imaginar, sólo es imaginar, si se hace desde la posibilidad y la celosía espacial de doble capa es descubierta de nuevo en el Palacio de Pallafolls.

La estructura en celosía de capa única no pierde la flexibilidad para acoplarse a cualquier forma. Para trabajar con ella, o se permanece en situación membrana, con formas antifuniculares, o se necesita proporcionar rigidez a flexión a los elementos de su simple capa para enfrentar los momentos debidos a la forma y sollicitación no funicular.

La estructura del Museo Guggenheim de Bilbao (1997) constituye un ejemplo formidable de las posibilidades formales que se pueden obtener con las celosías de simple capa con elementos rígidos a flexión. Y en este caso utilizar la palabra obtener no es correcto, más bien deberíamos decir resolver, pues la génesis de la forma, previene exclusivamente de los planteamientos plásticos y espaciales que se plantea F. Gehry. La celosía triangulada de simple capa se acopla con gran facilidad a

cualquier forma, tiene una gran rigidez en su plano por la triangulación de sus elementos que le confieren una gran rigidez tipo membrana y es capaz de resistir flexiones transversales de consideración por el canto conferido a sus elementos. Además, la utilización de formas curvas mejora la capacidad de carga vertical de los elementos tubulares que constituyen su estructura.

Inicialmente la estructura se pensó en hormigón, láminas de hormigón, estructura clásica para resolver estos problemas, pero dificultades de ejecución dirigieron la atención hacia la celosía espacial de simple capa.

Como el caso del Pabellón de Pallafolls, la configuración de este espacio interno abandona la rigidez de las formas clásicas, bóvedas, cúpulas, etc., para adoptar formas nuevas. Es una herramienta formidable que va a posibilitar muchas y nuevas configuraciones formales.

En esta gama de celosía en capa única, destaca con una importancia extraordinaria, el Pabellón de Mannheim (fig. 19), de Frei Otto (1971). Con un vano máximo de 80 m, esta prodigiosa estructura, resuelve de una manera simple el acoplamiento a superficies curvas libres de una malla cuadrada antifunicular. Partiendo de una malla rectangular plana, de elementos continuos, obtiene por medio de un modelo reducido, la forma antifunicular sin más que colgarla de un borde libre. Los rectángulos iniciales se transforman en rombos más o menos pronunciados, según el lugar en que se encuentren y hay que torsionar ligeramente sus elementos longitudinales para acoplar los ángulos transversales de dos ele-

mentos que se cruzan. El nudo se resuelve sin más que articular, como las tijeras, dos barras longitudinales que se cruzan. Una vez que están en situación, se fijan las articulaciones. Sus barras son continuas y de madera, las cuales se refuerzan por cables en las zonas que existen tracciones. La rigidez superficial tipo membrana se completa con la rigidez superficial del cerramiento exterior.

Esa misma idea la recoge Schlaich para construir dos cubriciones formidables, la Piscina de Neckarsulm y la cubrición del patio del Museo de Historia de Hamburgo. La idea es la misma, acoplarse a una esfera por dos familias rectangulares que se convierten en rombos a partir de su cuélge desde un borde, en estos casos, más definido que en Mannheim. Schlaich es un formidable realizador de nudos, ver todos los que produjo para resolver la cubierta de la Olimpiada de Múnich (fig. 20), y que después tanto juego le han proporcionado en la realización de cubiertas y pasarelas colgadas. Y aquí plantea la cubierta con barras planas, continuas, que una vez dispuestas en posición, se fijan con un par de chapas que pueden girar sobre sí mismas y después bloquean el giro de las barras longitudinales por un par de tornillos. La rigidez membrana se complementa con tirantes pretensados que triangulan la estructura rectangular de barras. El diseño de las barras tiene muy en cuenta el hecho de que deben tener suficiente rigidez a compresión sin perder la flexibilidad para torsionarse ligeramente, con el fin de acoplarse con la otra familia.

En la cubrición del Patio del Museo de Historia Natural de Hamburgo, Schlaich emplea el mismo planteamiento para la cubierta, pero

además utiliza la rigidización transversal conjunta de la cubrición utilizando el famoso símil de la rueda de bicicleta.

Esta técnica la plantea por primera vez el ingeniero ruso V. G. Suchov (1853-1939), en la cubrición de los almacenes GUM de Moscú. Con elementos radiales a tracción, como los radios de una rueda de bicicleta, se pueden crear auténticos diafragmas indeformables en las zonas en que se necesita la presencia de un diafragma rígido, como ocurre en los cambios de curvatura de la cubierta de Hamburgo. El diafragma se vuelve casi invisible al utilizar tirantes.

Esta técnica la usa mucho (a veces abusa) Renzo Piano, para rigidizar arcos no funiculares, como en la larga nave lateral del Aeropuerto de Kansai, o la cubierta del estadio de S. Nicola de Bari, o en los grandes almacenes de Bercy II, en París. Pero no sólo es a Piano a quien ha gustado esta rigidización de arcos delgados. La vemos en multitud de obras como la cubrición de la estación de autobuses y ferrocarril de Chur, el World Trade Center e intercambiador de tráfico de Estocolmo, etc. Esta invención de Suchov ha sustituido a la cercha clásica del siglo XIX en muchos planteamientos resistentes arquitectónicos actuales.

Volviendo al caso de las cúpulas o formas abovedadas de capa única o doble, es muy interesante el trabajo de otro formidable creador de imágenes resistentes, el arquitecto Toyo Ito. Su Museo Municipal de Yatsushiro (1988-91) es un alarde de entendimiento de las posibilidades de la celosía de una sola capa de planta oblicua y apoyos libres atirantados. Su cúpula oval de Odate (fig. 21), es un polideportivo de

uso múltiple realizado con madera dispuesta según dos familias de arcos. Las longitudinales están formadas por dos cordones de madera y las transversales por un solo cordón que se cruza entre los dos anteriores, vinculándose entre ellos por piezas metálicas.

Pórticos transversales

Desde la Sala de Máquinas de Contamin hasta la Basílica de Lourdes de Freyssinet, la utilización del pórtico transversal, metálico o de hormigón para cubrir grandes espacios ha sido constante.

En la actualidad destacan varias obras que están ahí, con importancia diversa.

El aeropuerto de Kansai (fig. 22), de Renzo Piano (1994) es sin duda la más importante y significativa. Con 84 m de luz, dispone una serie de pórticos paralelos biarticulados, separados 14,4 m entre sí, con sección transversal en celosía triangular. Es una estructura muy correcta cuyo atractivo principal se encuentra en su trazado curvo y sinuoso, como el esqueleto de un gigantesco dinosaurio. Con terminaciones carenadas, estos espléndidos pórticos se prolongan en curva con la nave lateral, de arcos no funiculares atirantados. La configuración en planta y alzado de este aeropuerto responde al mismo planteamiento formal que Piano realizó en el centro comercial de Bercy.

La estación de Waterloo de Nicolás Grimshaw de Londres (1993) (fig. 23), con luces moderadas, variables a lo largo de su longitud entre 35 y 50 m, constituye el *desiderátum* más explícito de lo que no se debe hacer en estructuras. Grimshaw diseña una serie de arcos

triarticulados que los saca de su trazado anti-funicular para poder disponer toda una parafernalia interior y exterior de tirantes y barras rectas necesarias para contrarrestar un problema que él mismo ha creado.

Hemos visto muchos casos de cambios en las formas funiculares para obtener determinadas configuraciones espaciales diferentes a los que la estructura ortodoxa resistente aconseja. Y muchos están muy bien, desde el Palacio de Deportes de Tokio de K. Tange a las obras de Isozaki. Sin embargo, esta obra torturada debió de ser juzgada por parámetros que desconocemos cuando se le concedió el premio Mies Van der Rohe de arquitectura.

82

La estación Eurolille del TGV en Lille (Francia, 1994), constituye otra de las propuestas posibles que no se debería haber construido de la manera que se ha hecho. Dos arcos tubulares, muy delgados, que deben ser contenidos, sujetos, arriostrados por un *desiderátum* de tirantes superiores e inferiores que hacen la estructura posible, pero que se asemeja a una serie de patas de araña diseñadas por alguien que no se ha enterado que hace más de 100 años, Culmann, descubrió el cálculo de las celosías, y hace muchos más se descubrió el canto para dar rigidez a los arcos.

Todos estos señores, incluido el arquitecto, deberían haber visitado previamente la estación de Francia de Barcelona, otra estación, que hace más de 100 años, se cubrió también con dos familias de arcos adosados. Indudablemente Peter Rice fue un ingeniero excelente que imaginó y diseñó buenos proyectos, pero algunas veces, mirando sus estructuras,

se tiene la impresión de que busca más sorprendernos que convencernos. No se puede complicar tanto lo que es obvio. Realmente, el viajero del TGV entre Inglaterra y Francia, que sea amante de las estructuras, debe estar dispuesto a sorprenderse.

Con respecto al centro de exposiciones de Leipzig (Alemania, 1995) de Von Gerkan Marg y Ian Ritchie, este último vinculado directamente a la escuela inglesa de *high tech*, constituye una versión moderna de la Galería de Máquinas de Contamin, aunque de tamaño mitad. Está constituido por diez grandes arcos en celosía de 79 metros de luz y 25 metros de separación entre ellos, que soportan una estructura secundaria, también tubular, toda ella dispuesta en el exterior de la nave. La cubrición, de cristal está sostenida a la manera inglesa.

Es un edificio muy correcto en el cual se hace una utilización muy intensa y exitosa de la estructura resistente en su expresión plástica. Von Gerkan Marg es un arquitecto lituano, aunque afincado en Alemania, de gran destreza en la utilización plástica de la estructura resistente.

Grandes cubiertas planas

Las grandes cubiertas planas han sido, y siguen siendo, una de las principales soluciones resistentes para la cubrición de grandes espacios de reunión, intercambio y movimiento de personas. Palacios de deportes, aeropuertos, grandes salas de exposición, son algunos de los ejemplos en que se utiliza esta tipología. Sin embargo, hay alguna diferencia tipológica entre ellos. Mientras en los palacios de deportes, debido a su función, las exigencias de luz

son muy grandes, y que analizaremos a través de dos edificios notables, el Centro de Gimnasia de Alicante y el Palacio de Deportes de Badalona, en los aeropuertos y estaciones no son necesarias luces tan importantes, lo que ha conducido, en estos últimos, a la utilización frecuente de lo que podríamos llamar estructuras en «seta». El aeropuerto Standed de Londres y el aeropuerto de Stuttgart son dos ejemplos recientes de esta última tipología.

Pero antes de hablar de estas dos últimas obras, es necesario hacer expresa referencia al Palazzo del Lavoro en Nervi (Turín 1960-61) (fig. 24). Esta formidable cubierta, constituida por 16 «setas» de 40×40 m y pilares de 20 m de altura, realizada 30 años antes que los aeropuertos citados, representa un prodigio de sencillez y eficacia resistente.

El concepto presente en Stansted, de Norman Foster (1991), es parecido al utilizado por Nervi, la utilización de grandes «setas» que soportan la cubierta con interese entre soportes, algo menor que en Turín, de 36×36 m. En realidad la cubierta se modula en cuadrados de 18×18 , y se soportan uno sí y otro no. La cubierta, que se desarrolla en «rincones de claustro» en solución metálica triangulada, junto con el soporte, constituyen la expresión estructural y estética del edificio (fig. 25).

En éste, como en todos sus edificios, hay que reconocer la eficacia de Foster en la expresión formal de las estructuras resistentes. Se presentan con una contundencia y realidad insuperable. Sin embargo, aunque mucho más contenido que en sus primeras estructuras, también aquí hay una concesión a la «super» expresión

estructural. Se podría haber eliminado el trípode y los tirantes superiores a las cuatro columnas de base, ya que su utilidad es mínima –sólo para la actuación de sobrecargas de nieve dispuestas en vanos alternos– y que además se podría haber resuelto sin más que empotrar, en lugar de articular, los puntales inclinados.

El edificio es, de todas maneras, muy hermoso y utiliza como en toda la *high tech*, a lo resistente para hacer estética. Lo estricto, sin embargo, no tiene cabida en ese planteamiento.

El aeropuerto de Stuttgart (fig. 26), es de Von Gerkan (1991), el cual utiliza los trabajos que desde 1970 Frei Otto estaba desarrollando sobre las líneas antifuniculares complejas, que desembocaron finalmente en las estructuras arbóreas que aquí son usadas en esta gran cubierta en módulos de 40×25 m. Desde un punto de vista resistente, el dimensionamiento de las ramas, al ser antifuniculares, sólo vienen gobernadas por los problemas de pandeo conjunto y de la precisión en la disposición de los pesos de la cubierta. No constituye sino un ejercicio resistente simple con una intención estética determinada.

Enric Miralles se plantea la estructura resistente dentro de un planteamiento más riguroso. Es un elemento fundamental en la configuración de su expresión arquitectónica. En su Centro Nacional de Gimnasia de Alicante, como en su Palacio de Deportes de Huesca, Miralles realiza un ejercicio honesto y estricto de la utilización y disposición de la estructura resistente, diferente a lo que habitualmente se emplea en estas últimas décadas. No es relamida ni está carenada, ni se adorna, sino que se

expresa con la rotundidad de lo evidente, aunque configure espacios y fachadas poco usuales. En Alicante, una gran costilla central, que atraviesa el pabellón de competiciones públicas y el pabellón de entrenamientos, sirve de columna vertebral sobre la que se apoyan una serie de costillas transversales, todas en celosía metálica. Unas están vistas desde dentro y otras no, lo que lleva a la perplejidad del entendimiento del espacio, pues la educación y adecuación al espacio que tenemos las personas, está configurado por algo que resiste. Este concepto se quiebra en este caso, pues sólo se ve una parte de lo que resiste y no la totalidad. Se cambian los conceptos corrientes para acentuar un entendimiento más intelectual.

Bonell y Rius realizan para la Olimpiada de Barcelona (1991) (fig. 27), el Palacio de los Deportes de Badalona, obra que mereció el premio europeo de arquitectura Mies Van der Rohe. La estructura es muy simple, unas grandes vigas transversales arriostradas entre sí por una viga longitudinal. El concepto viga se desdobra en el centro de la luz, entre el cordón inferior de tracción, lineal y formado por cables, y el cordón superior y el alma, que es una viga armada. Es una licencia innecesaria pero que está bien, da una sensación más tecnológica a la cubierta sin, como en otros muchos casos, entorpecer su trabajo resistente.

Cubiertas colgadas

Desde que en los años cincuenta las cubiertas colgadas empezaron a emplearse para la construcción de grandes espacios, esta tipología ha avanzado en varios frentes, los cuales se pueden agrupar en dos grandes familias.

En el primero encontraríamos los espacios configurados por contornos permanentes y continuos. Entre los segundos, todos aquellos que podrían encajarse dentro de las superficies colgadas desde puntos, ya sea con ayuda de mástiles o de tirantes. También se difiere entre los materiales utilizados para la cubrición y un su función, pues varían desde los que representan únicamente el cierre y la impermeabilización del recinto, a aquellos otros que además cumplen un papel resistente fundamental.

Apoyos continuos

Después de la utilización masiva de las grandes cubiertas colgantes de los años sesenta para cubrir hangares, palacios de deportes, y espacios de uso diversos, realizados principalmente por ingenieros, la simplicidad formal que obliga la adecuada utilización de la morfología colgada de simple o doble curvatura, había hecho que su atractivo para configurar espacios en el mundo de la arquitectura hubiera dejado de estar presente. El Palacio de Deportes de La Coruña, el Picadero del Club de Campo de Madrid o la cubierta para el Pabellón de la Feria de Muestras de Barcelona, son algunos de los muchos restos de la formalización rigurosa y estricta realizados en España.

Recientemente esta morfología elemental, con carácter casi exclusivamente arquitectónico, entendiéndose por tal a aquel que tiende a revivir formas clásicas con un nuevo espíritu formal, se ha producido en bastantes ocasiones.

El primer ejemplo lo constituye la cubierta del Pabellón portugués de Alvaro Siza en la Feria Universal de Lisboa de 1998. Esta obra no su-

pone ningún alarde técnico ni ningún hallazgo resistente, es la cubierta de siempre, realizada con la maestría de Siza, tan formidablemente, que nos vuelve a hacer entender qué es lo colgado.

Menos interés resistente y formal tiene la cubrición que Renzo Piano hace para un edificio de oficinas en Vicenza, 1984 (fig. 28). Utiliza la cubierta colgada, de dimensiones muy pequeñas, 14,5 m de luz, como elemento formal, justificado exclusivamente desde un punto de vista ambiental y espacial. Nada que ver con lo resistente, aunque esta cubierta deba resistir apoyada en sus puntales atirantados inclinados.

Más interés tiene el trabajo realizado en el Pabellón 26 de la Feria de Hannover de T. Herzog y Frank Simon de la oficina de Schlaich. Se trata de tres cubiertas colgadas enlazadas de 70 m de luz y soportadas por pilares en forma de A (fig. 29). La cubierta está formada por tiras metálicas de 30 mm de espesor y 400 mm de anchura, separadas entre sí 5,5 m. Entre estas tiras se dispone una cubierta de madera. Se estabiliza por su propio peso ayudada por unos tirantes extremos.

La utilización de un arco centrado como soporte de una cubierta colgada, la realiza por Saarinen con F. Severud en la Pista de hielo de Yale, de 70 m de luz, en 1956-58. Antes ya la había propuesto Frei Otto para un teatro al aire libre en Stuttgart en 1954. Schlaich con el arquitecto Ackermann diseñan y construyen en 1985 el Palacio de Deportes de hielo en Múnich (fig. 30), siguiendo la misma idea. El arco es metálico, de 1,45 m de canto, 104 m de luz y 17,6 m de flecha y la cubierta está for-

mada por una red ortogonal de cables portantes y tensores, cubriendo una superficie elíptica de 88×67 m.

La rigidez transversal de este arco es pequeña, por lo que cuando existen cargas de viento o nieve disimétricas, es la propia red la que lo estabiliza tensándose la parte no cargada para enfrentar el mayor empuje lateral de la zona cargada.

La cubrición está formada por una red cuadrada de listones de madera y una membrana transparente de PVC.

Cubiertas rígidas colgadas o atirantadas

La utilización de un sistema de tirantes o cables curvos, como apoyos intermedios, de una cubierta rígida se ha prodigado mucho recientemente.

Esta solución es utilizada por la ingeniería, en lo que hemos denominado época clásica, en la cubrición de grandes espacios sin soportes. Morandi en 1961 soporta voladizos de 60 m de luz de hormigón por un sistema de dos tirantes para los hangares del aeropuerto da Vinci en Roma. Con un solo tirante, en el hangar de Frankfurt, en los años 1959-1960, se realizan voladizos de 66 m de luz.

Esta tipología es recogida por Richard Rogers para salvar luces muy reducidas. En el centro de Qumper, 1979, se utiliza innecesariamente para salvar una cuadrícula de 18×18 m. Foster, en 1980, resuelve por este procedimiento el Centro de distribución de Renault en Swindon con luces de 24×24 , en una exhibición de lo que puede llegar a complicarse innecesariamente una estructura. Richard Rogers, en In-

mos Microprocessor Factory, en el sur de Gales, plantea otra solución, también excesiva para saltar 36 m de luz, idea que repite de la mano de Peter Rice en Patscenter Laboratories de Princeton, USA, ahora reduciendo su luz a 22,8 m. Me parece que desde mediados de los años ochenta no se ha vuelto a repetir tanta confusión, que no es otra que hacer aparecer como necesario lo innecesario, defecto en el que cayeron, tantas veces, los arquitectos *high tech* en sus inicios.

Más sentido tiene la utilización de esta misma tipología de cubierta metálica atirantada cuando es necesario salvar luces importantes, como la Darling Harbour Development Exhibition Center en Sydney (1987) de Cox, Richardson, Taylor, etc., que cubren cuadrículas de cubierta de 87 × 60 m.

86 La propuesta para el Estadio de Saitama en el Japón utiliza cuatro torres de 90 m desde las que se atiranta una cubierta metálica formada por cuatro grandes vigas de 3 m de canto, las cuales soportan una estructura metálica secundaria (fig. 31).

Richard Roger utiliza el atirantamiento para colgar una cubierta cilíndrica o esférica. En Massy Autosalon, proyecto 1987, propone una cubierta cilíndrica de unos 100 m de distancia entre apoyos extremos con cuatro mástiles intermedios. De cada puntal salen dos parejas de tirantes que cuelgan y atirantan una estructura metálica rígida circular. En esta disposición existe un contrasentido intrínseco. Cuelga una forma que siempre ha resistido por sí sola, que ha sido inventada para resistir por sí sola y que nos gusta ver resistiendo por

sí sola. Rogers cambia su forma de trabajo. El atirantamiento que se produce desde los mástiles equivale a dos efectos, una descarga del trabajo como bóveda y una rigidización de la cubierta ante las cargas no funiculares. Ninguna de las dos cosas es necesaria para un arco de dimensiones no muy grandes.

En cubierta rígida colgada de cable curvo, el primero que lo realiza, siempre magistralmente, es Nervi en Paper Mill (Burgo) con 147 m de luz. Schlaich en Europahalle de Karlsruhe, 1980 (fig. 32), realiza la cubierta de 72 m de luz en una hermosa versión moderna del planteamiento de Nervi. Por este procedimiento se han llegado a plantear cubiertas de hasta 304 m de luz, por Fazlur Kahn en los años 60.

Cubiertas colgadas sobre apoyos puntuales

Mucho más versátil que las cubiertas colgadas de apoyo continuo, las cubiertas de apoyo puntual se han extendido con profusión desde la realización de los fantásticos pabellones de Alemania en Montreal (1967) y la Olimpiada de Múnich (1972), la primera realizada por Frei Otto y la segunda inspirada en su trabajo.

De entre ellas hay que realizar también una distinción. Las primeras corresponden a aquellas en las cuales existe una división entre lo que es el elemento portante y lo que es la cubrición. El elemento portante está formado por cables dispuestos normalmente en malla ortogonal tensada en ambas direcciones sobre la que se dispone una cubrición inerte. Es el caso del pa-

bellón alemán de Montreal, las construcciones de la Olimpiada de Múnich, la pista de hielo de la misma ciudad, etc., que ya hemos visto.

El segundo tipo, que aquí nos ocupa, sería aquel en el cual la cubrición es a su vez el elemento resistente. Es el caso de los textiles. Para que estas membranas no se arruguen bajo cargas exteriores, como la nieve, y no se produzcan problemas de flameo por el viento, deben estar fuertemente tensadas, lo cual se consigue con la presencia de cargas puntuales ascendentes y descendentes que produzcan fuertes curvaturas de signos opuestos en la tela. Cuanto más curvatura menor es la tensión necesaria para evitar los problemas citados. Esta necesidad va a hacer que las telas estén siempre asociadas a las estructuras atirantadas, tanto desde la parte superior de los pilares, como desde el suelo y desde puntales flotantes intermedios soportados por tirantes. Veremos una serie de morfologías en las cuales combinan las torres principales, tirantes, puntales fijos o flotantes para soportar luces de distinta magnitud.

Se entiende que la deformabilidad y la tensión de la tela será tanto más importante cuanto mayor sea la luz a salvar. Las cubiertas pequeñas, que a nivel industrial se utilizan para crear recintos provisionales, presentan un problema resistente mínimo. Por el contrario, la gran luz determina problemas resistentes complejísima agravados por el hecho de que necesariamente las telas son tejidos que tienen un comportamiento claramente anisótropo.

El tejido utilizado debe ser impermeable, resistente al fuego, durable, transparente o traslúcido, etc., según se desee. Se utilizan te-

jididos a base de fibra de vidrio o poliéster con PVC, teflón o silicona, con calidad mejor o peor en función de la condición de permanencia o provisionalidad. A veces, para aumentar su resistencia en determinadas direcciones, se arma con cables de acero u otros. Además de estos cables, se disponen otros cables en aquellas zonas donde hay concentración de esfuerzos, como son los bordes, los valles y crestas y en los puntos de cuelgue. El concepto siempre es el mismo, los cables que soportan el textil, cuelgan de un punto y son tensados desde otro por medio de puntales, anclajes y otros cables. El textil es tensado por la familia de cables portantes y estabilizadores. Aunque las cubiertas de textiles están presentes desde principios de los años sesenta, la primera de las grandes estructuras que las utilizan como cubrición de grandes espacios es el aeropuerto de Jeddah en Arabia Saudita (1977) de los ingenieros Fazlur Khan y H. Berger. Esta gigantesca construcción está formada por 210 unidades de 45×45 m de lado. Cada uno de estos enormes rectángulos cuelgan de un anillo central que a su vez cuelga de postes de acero situados en las esquinas de 45 m de altura. La sustentación se realiza por cables de esquina y del cuerpo central y la estabilización por cables de borde (fig. 33). La cubrición está formada por tejido de fibra de vidrio y teflón.

Tres tipos de construcciones importantes conviene señalar además. La primera sería la cubrición del Estadio de Riyadh (fig. 34). Este estadio está cubierto por 24 unidades idénticas agrupadas en un círculo. Como en toda estructura en ménsula, la cabeza de tracción está constituida por los cables de suspensión, y la

cabeza de compresión se sustituye por el anillo de tracción circular, en realización que ya es clásica en el trabajo de Schlaich. Cada mástil tiene 58 m de altura distribuidos en un círculo de 246 m de diámetro y el voladizo de la cubierta es de 54 m.

Una simplificación importante del sistema de soporte de la cubierta lo encontramos en el Estadio del Rey Fadh. En lugar de referir al suelo las tracciones superiores de los cables de suspensión, se pueden referir a un anillo superior de compresión y lo mismo la carga radial del cable de estabilización. La cubierta transmite así únicamente cargas verticales al suelo.

La asociación de tirantes portantes con puntales resuelve con facilidad el soporte de cubiertas tan importantes como el Centro de Convenciones de S. Diego (1990) de Geiger-Berger Asociados. Se trata de una gran cubierta de 91,5 m de luz y está formada por cinco módulos de 18,3 m de anchura. Toda la cubierta cuelga de unos grandes contrafuertes externos a través de unos tirantes que soportan dos pequeños puntales flotantes que producen la deseada curvatura en el textil.

Este mismo tipo de construcción, la utilización de tirantes y puntales flotantes, lo ha utilizado R. Penzo en la renovación de Schlemberger Facility, situada en los alrededores de París, de poco más de 11 m de luz. M. Hopkins la utiliza en la nueva sede central de Hacienda de Nottingham (fig. 35), con una cubierta textil sustentada por cuatro puntales que cuelgan los lucernarios metálicos de los que cuelga el textil. El Estadio de hielo de Hamburgo, realizado por el equipo de Sch-

laich, es una elipse de 120 m por 70 m soportado de una manera más elegante por cuatro mástiles que soportan tirantes y puntales flotantes (fig. 36).

La penúltima obra soportada por textiles que presentamos es el Gottlieb-Daimler Stadium en Stuttgart (1993), de los arquitectos H. Siegel y actuando como ingenieros Schlaich y Bergermann. El esquema resistente del Estadio de Riyadh es mejorado ampliamente en este caso. Con planta elíptica de 280 m de eje mayor y 200 m de eje menor, esta formidable cubierta se subdivide en 40 módulos, cada uno de los cuales se soporta únicamente por un puntal de 45 m de altura que tiene un arco horizontal en la parte superior y otro segundo situado a 17,6 m del anterior. De arco superior, doble y muy esbelto, con capacidad de resistencia a flexión en su plano, cuelga el cable portante que soporta un voladizo de 58 m de luz. Como en Riyadh, son los cables elípticos horizontales los que hacen el papel de puntales para equilibrar el tiro de los cables portantes. El cable estabilizador cuelga del portante y soporta 8 arcos tubulares metálicos que sostiene el textil. El cable portante se sobrecarga con la nieve y el estabilizador con la succión del viento. El trabajo circunferencial, elíptico en este caso, contrarresta, tanto con el anillo interior, como los dos exteriores, toda la carga horizontal de los cables portantes y tensores, lo que reduce la cimentación de los puntales a resistir simples cargas verticales.

Se encuentra en construcción en Londres, La Millennium Dome de Richard Rogers, arq. y Buro Happold como empresa de ingeniería.

Se trata de una cúpula de 320 m de diámetro y 50 m de flecha central. Pero lo curioso de esta cúpula es que no está constituida por elementos a compresión sino por cables a tracción. La cúpula se divide en 72 meridianos, cada uno de ellos formado por un cable de 32 mm de diámetro. Para mantener la forma de arco, cada uno de sus meridianos está colgado desde unas torres de 100 m de altura, a distancias variables entre 25 y 30 m, las cuales permiten mantener la forma arco, forma ligeramente cambiada pues, entre punto y punto de suspensión, la forma del arco es una ligera catenaria muy tendida. Las torres son 12, inclinadas y en forma de uso desde las cuales parten dos sistemas de tirantes, unos de cuelgue, que son los que soportan los meridianos, y otros de estabilidad. Esa cúpula debe estar tensada hacia abajo para compensar las cargas disimétricas, el viento y demás fuerzas ascensionales.

Entre los cables se está disponiendo un tejido clásico en este tipo de construcciones, tejido de fibra de vidrio y teflón, que se pone en carga como los meridianos, por los cables estabilizadores interiores.

Esta estructura es una evolución de la que el mismo Richard Rogers proyectó para el Massy Autosalon. Sustituye los arcos rígidos de esta propuesta, por un sistema de 72 cables meridianos que deben estar atirantados por arriba y por debajo, para mantener la estabilidad del conjunto. La posición de las torres, es también radial, pero dispuesta en sentido circunferencial en lugar de en sentido longitudinal.

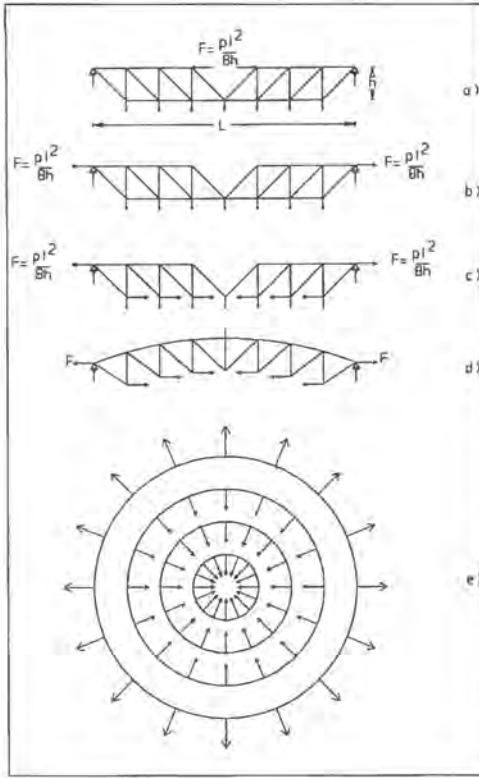
Como veremos en las cúpulas Tensegrity, éste es otro procedimiento para hacer cúpulas con cables. Sin embargo, el de Rogers es un procedimiento más elemental, mucho menos sutil, pues invade el espacio interior con la presencia de las doce torres y los tirantes de estabilización.

Tensegrity

Tensegrity es un término acuñado por Buckminster Fuller para definir a aquellos elementos estructurales que cuentan con elementos discretos de compresión, no continuos y elementos de tracción, continuos. Como decía Fuller, «pequeñas islas de compresión en un mar de tracción».

Curiosamente, aunque bien mirado no es de extrañar, este tipo estructural surgió de la escultura. El artista ruso Karl Ioganson, fundador del primer grupo del constructivismo, lo planteó en 1921. Esta idea la recoge una escolar de la época, Cristina Lodder, pero tampoco es reconocida en Rusia. En realidad, el inventor verdadero es otro escultor, Kenneth Snelson, que en 1948 después de seguir un curso con Fuller, la presenta. Fuller inmediatamente la sigue y la desarrolla.

Esta tipología, entusiásticamente aceptada por el mundo de la técnica, tuvo un lánguido caminar entre la escultura y el juego recreativo hasta que David Geiger, autor también de la cubierta hinchable del pabellón USA en la Expo 70 de Osaka, la realiza para un estadio de 120 m de luz en la Olimpiada de Corea (1988).



El concepto es muy simple. Una viga biapoyada en celosía a) tiene el cordón superior y los montantes verticales en compresión y el cordón inferior y las diagonales en tracción. Existe sólo reacción vertical en los apoyos. Si eliminamos la parte central del cordón superior, la viga se cae si no le introducimos en los apoyos la misma fuerza horizontal que axil tenía el cordón suprimido en el centro. Es decir, la viga es perfectamente válida si el apoyo impide el movimiento horizontal del cordón superior en el apoyo. De estar en compresión, el cordón superior pasa a estar traccionado en toda su longitud. Siempre que se sujete el ex-

tremo, para que no se mueva, la viga pasa a tener todos sus elementos a tracción, salvo los montantes verticales, b).

Si damos un paso más y disponemos una serie de vigas de este tipo circularmente dispuestas alrededor de un punto, podremos sustituir el cordón inferior de tracción continuo por anillos circulares a tracción, cuyas componentes radiales, según la dirección de la cercha, son precisamente el incremento de tensión que experimenta el cordón inferior de una cercha al pasar de un montante a otro. De la misma manera, la sujeción del movimiento longitudinal de la cabeza de la viga, se consigue con la disposición de un anillo superior comprimido, c).

Esta estructura plana se puede variar a la forma de una cúpula, d) y el comportamiento es exactamente el mismo. Se necesita la presencia de un anillo circunferencial superior para soportar la fuerza F , cuyo valor difiere del anterior por el cambio de geometría. Además de este anillo, los únicos elementos en compresión son los puntantes verticales.

Ésta es exactamente la idea final que Fuller definió como «Aspension Dome» con la variante de que las diagonales, las triangula en su plano para rigidizar mejor la cúpula ante cargas disimétricas, planteamiento ante el que Beiger se opone, pues crea más problemas que los resuelve, concentrando más el efecto de las cargas disimétricas.

Bien mirado, alrededor de este problema, hemos discurrido en las estructuras anteriores. En el Estadio Gottlieb-Daimles de Stuttgart, toda la cubierta no es sino el anillo exterior de esta cúpula, al que se podría añadir otro y otro

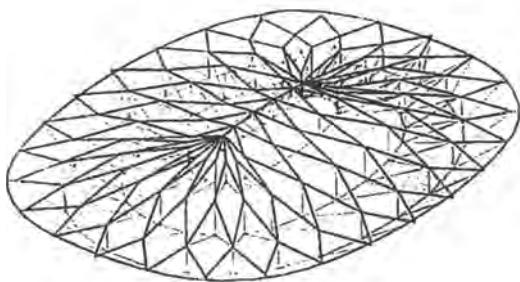
hasta cerrar todo el estadio y tanto daría si cada anillo fuese ascendente *-aspension dome-* o descendente.

En 1988 Geiger construye en San Petesburgo, USA, la Sunwast Dome, de 210 m de luz, donde los 120 m centrales son retraíbles. Su peso es de 10 kg/m² y se cubre con un tejido de silicona y fibra de vidrio. Con planta elíptica, en 1992, Matthys Levy y otros construyen una cúpula *tensigrity* pseudo-elíptica de 238 m de luz principal. La planta está formada por arcos de círculo que se acoplan a las exigencias de un campo de fútbol americano. En esta cúpula se vuelve a la triangulación de las diagonales que preconizaba Fuller, lo cual en este caso es especialmente interesante por la forma en planta de la cúpula.

La construcción de estas cúpulas puede realizarse sin cimbra, pues cada anillo se levanta independientemente, adosándose uno a otro. Su precio es algo superior a las hinchables, pero menor que una cúpula metálica tradicional. Las cubiertas son textiles clásicos de teflón y fibra de vidrio.

Conclusión

Estamos en una época de transición entre el pasado y el futuro y esta afirmación que en sí



misma siempre es evidente, toma aquí un significado especial cuando el pasado fue sustantivo y el futuro también lo será. El planteamiento científico del hecho constructivo produjo un cambio fundamental en la concepción de la arquitectura. En los años 60 se agota este impulso y aparecen una serie de manifestaciones que acabamos de presentar muy resumidamente. El futuro se presenta también como sustantivo, la generalización y extensión de los nuevos materiales compuestos a base de fibras de vidrio, fibras de carbón en matriz de resina epoxi, unido al desarrollo de las estructuras adaptables, capaces de variar sus características resistentes con la sollicitación, transformarán hasta tal extremo lo conocido que podemos suponer que estamos viviendo en la actualidad, a estos efectos, el principio de la tercera revolución industrial.

91

NOTAS

* Este artículo es el resumen de dos conferencias dadas durante el mes de mayo de 1998. Una en la inauguración del curso de CEMCO, en la Casa de América de Madrid.

Otra, en el aula magna de la escuela de arquitectura de Pamplona.

1



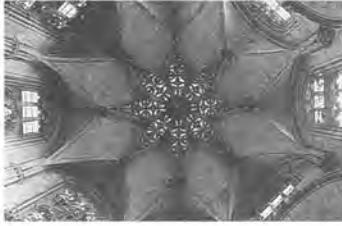
2



3



4



5



6



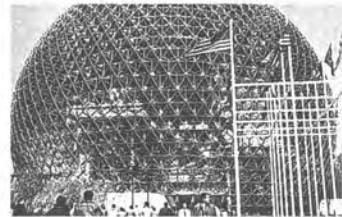
7



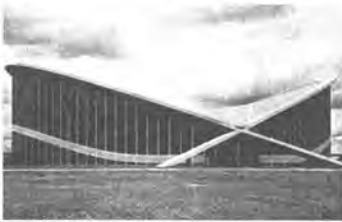
8



9



10



11



12



13



14



15



16



17



18

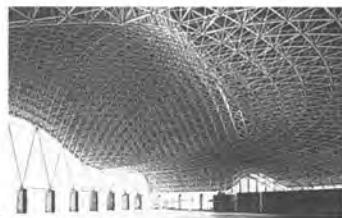


Fig. 1. Catedral de León. Nave central.
Fig. 2. Estación término (1924). Barcelona.
Fig. 3. Presa del Eume. La Coruña.
Fig. 4. Capilla del Condestable. Catedral de Burgos.
Fig. 5. San Pedro de Roma. Bramante en su propuesta, sigue el modelo resistente del Panteón. Miguel Ángel cambia el concepto y se equivoca al reducir el espesor de clave a arañaz, cuando aún se contaba con un procedimiento eficaz de realizar un zuncho inferior. El peraltado de la cúpula realizado por Giacomo della Porta reduce el empuje lateral, pero no lo elimina.
Fig. 6. Galería de Máquinas. Contamin. París (1889). 420 m de largo, 114 m de luz y 46 m de altura

Fig. 7. Frontón Recoletos. Torroja (1935). 53,3 x 32,5 m. Espesor 8 cm.
Fig. 8. Hangar de Orbetello. Nervi (1940). 100 x 40 x 11,8 m.
Fig. 9. Pabellón USA para la Expo 67. Montreal. Buckminster Fuller. Diámetro 76 m. Altura 60 m.
Fig. 10. Arena Raleigh. Carolina del Norte. USA. 1953. Matthew Nowicki.
Fig. 11. Estadio Olímpico Múnich (1972). G. Behnisch, Frei Otto Arq., J. Schlaich Ing.
Fig. 12. Basílica de San Pío X de Lourdes. Francia (1955-56). Solución construida de Freyssinet — Propuesta de Pier Luigi Nervi.

Fig. 13. Interior del Pabellón USA en la Expo 70. Osaka. Walter Geiger. Tiene 142 m de largo y 83 m de anchura y una flecha de 6,1 m. Tiene 32 cables de 48 mm. Se sometía a una presión interior de 27 kg/m², aún con grandes vientos y se debía a 63 kg/m² para enfrentar la nieve.
Fig. 14. Terminal TWA en el aeropuerto de Nueva York , Eero Saarinen (1962).
Fig. 15. Piscina Olímpica de Tokio (1964). Ing. Tsubai Kawaguchi. Luz principal 120 m.
Fig. 16. Iglesia de S. José Obrero. Monterrey (1959-60). Enrique de la Mora, Félix Candela. Con 30 m en dirección transversal y 50 m en dirección longitudinal



19



20



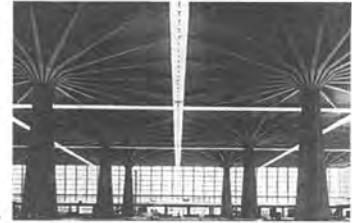
21



22



23



24



25



26



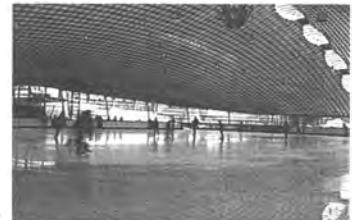
27



28



29



30



31



32



33



34



35



36

es uno de los mayores paraboloides hiperbólicos realizados por Candela.

Fig. 17. Museo para la Colección Menil. Houston. Texas. USA (1981-1986). Renzo Piano Arq.

Fig. 18. Polideportivo Palafoells (1997). Isozaki, M. Calzón. De dimensiones reducidas, esta formidable estructura sugiere un futuro prometedor, más libre en la concepción de los espacios.

Fig. 19. Pabellón de Mannheim (1971). Arq. Mutschler y Frei Otto.

Fig. 20. Nudo de Fundición para Múnich. Jörg Schlaich.

Fig. 21. Cúpula O. Odate. Toyo Itto.

Fig. 22. Aeropuerto de Kansai. Nave principal (1994). Renzo Piano Arq. Ove Arup, Peter Rice Ing.

Fig. 23. Terminal Internacional en la estación de Waterloo (1993). Nicholas Grimshaw Arq.

Fig. 24. Palazzo del Lavoro. Turín. P.L. Nervi (1961).

Fig. 25. Aeropuerto de Stansted. Stansted. Inglaterra (1991). Norman Foster.

Fig. 26. Aeropuerto de Stuttgart. Alemania. Von Gerkan Marg (1991).

Fig. 27. Palacio de los Deportes de Badalona. Esteve Bonell, F. Rius (1991).

Fig. 28. Edificio de Oficinas Lowara. Vicenza. Halia (1984-85). Renzo Piano.

Fig. 29. Centro de exposiciones. Hannover (1996). T. Herzog Arq.

Fig. 30. Palacio de hielo de Múnich (1985). Arq. Ackermann. Ing. Schlaich.

Fig. 31. Arena de Saitama (Japón). Proyecto.

Fig. 32. Europahalle. Karlsruhe (1980). Schlaich.

Fig. 33. Haj Terminal. Aeropuerto internacional de Jeddah (1977).

Fig. 34. King Fadh Stadium en Riyadh (1983). Vista interior.

Fig. 35. Nueva sede central de Hacienda. Nottingham. M. Hopkins.

Fig. 36. Palacio de hielo. Hamburgo.

