

La forma penjant és una forma autoformativa en què tan sols intervenen forces de tracció. A partir de la seva inversió, resulta la superfície de recolzament de la petxina de malla resistent a la flexió, en la qual, sota el pes propi, tan sols intervenen forces de pressió i no es presenta ni un moment de flexió.

Una forma penjant no és una superfície mínima. Les curvatures són en forma de cúpula. Les forces, a cada nus de la xarxa, són de mida diversa i no es distribueixen regularment —a excepció de les formes simètriques.

La producció d'una xarxa penjant de cadenes o de ganxos i d'anelles és relativament costosa.

Una maqueta de xarxa penjant és una maqueta de mesurament. Proporciona tots els valors geomètrics exigibles sobre la forma d'una petxina de reixeta i el tall de la reixeta i dels caires.

La determinació de la forma amb una xarxa penjant dóna com a resultat la forma de construcció definitiva, amb la qual cosa es deixen de banda unes diferències geomètriques de poca consideració entre les línies poligonals de la xarxa i les varetes corbades de la reixeta.

Bàsicament, el mètode de la determinació de la forma amb xarxes penjants és apropiat per a tota mena de cobertes amb superfície tancada, com també per a cobertes de vareta amb retícules de mòduls de quatre cares o més.

### 3.5. Fils en aigua

Aquest mètode serveix per a la determinació de la forma de suports i d'estructures ramificades. Hom introdueix a l'aigua una maqueta de fils de llana o de seda amb una llargada donada. Quan és estreta de l'aigua, els fils s'uneixen entre si a conseqüència de la tensió de superfície de l'aigua i construeixen un sistema ramificat (figs. 47 i 48).

No obstant això, hom ha desenvolupat un *know-how* propi per al càlcul sobre maquetes i el seu trasllat al disseny per ordinador que li permetria ser desenvolupat en una altra ocasió més específica.

## Ligero y amplio. Aspectos sobre el diseño y construcción de amplias estructuras ligeras

### 1. El principio de construcción ligera

La situación actual de la construcción se caracteriza por una gran especialización. La complejidad de los cometidos de la construcción obliga a la división del trabajo. A esto se opone la idea de que el arte de la construcción es mucho más que sólo la suma de trabajos individuales. Ove Arup, uno de los grandes ingenieros de nuestro tiempo, lo ha expresado así: «Todos los hechos y posibilidades que influyen sobre un proyecto deben haber sido entendidos y asimilados antes de que se defina el proyecto. El todo debe ser más importante que cualquiera de sus partes». Como consecuencia surge sólo una cosa: trabajo en equipo. Es decir, el grupo como maestro de obras en el sentido clásico es necesario para armonizar todos los aspectos de una obra de construcción: creación de la forma y construcción técnica, funcionalidad y rentabilidad práctica, el medio ambiente en la naturaleza y los criterios estéticos. Arte de construir como «armonía perfecta de los medios con el fin» (Henry van der Velde).

Si es cierto que el hombre tiene una capacidad genéticamente determinada de percepción y de sensación, y si es verdad que «el saber como condición para la comprensión del mundo formal arquitectónico» (Curt Siegel) es indispensable, entonces la estética en arquitectura ya no es un planteamiento para estetas y artistas puros, sino que debe ser incluida en el ámbito racional de las realidades técnicas. La máxima de «rendir más con menos», en la cual se resumen las ideas últimas de una arquitectura con estructuras ligeras, cobra así una dimensión totalmente nueva y muy extensa que la convierte en el principio de la construcción ligera. Ligero es un objeto que pesa poco, que tiene, por tanto, escasa masa. La masa de un objeto es equivalente a la cantidad de material que se encierra en él.

Cada objeto existente materialmente está expuesto a fuerzas internas o externas y tiene la capacidad de aceptar estas exigencias o de transmitir las. Así cada objeto es, en el sentido técnico más amplio, una construcción.

Si se comparan objetos diferentes en situación de transmitir fuerzas iguales sobre distancias iguales, el que cumple este trabajo con la masa mínima es más ligero que los demás objetos. Los objetos que pueden transmitir fuerzas con una masa más pequeña se denominan construcciones ligeras.

### 1.1. Construcción ligera en la naturaleza

Un ser viviente que con una masa menor o una energía menor soporta cargas mayores o ejerce fuerzas mayores, tiene ventaja sobre otros.

Los objetos de la naturaleza viviente pueden tener tamaños y masas muy distintos. Cumplen funciones distintas y poseen diferentes posibilidades de movimiento. Versatilidad y movilidad con un alto rendimiento constructivo son los criterios que caracterizan el principio de construcción ligera en la naturaleza viviente (figs. 1-2).

La construcción ligera en la naturaleza viviente tiene una forma básica prefijada constructivamente, altamente productiva: la célula. Desde la célula como individuo hasta los complejos sistemas de plantas y animales, es ésta el elemento constructivo de todos los seres vivientes. Las células pueden ser blandas, pueden permanecer blandas, pero pueden adoptar también todos los estadios del endurecimiento.

Una célula blanda es una estructura neumática: un sistema constructivo a partir de una cubierta (membrana) flexible sometida a tracción, y de un relleno fluido interno (protoplasma) que ejerce una presión interna sobre la cubierta (fig. 3). Todos los objetos de la naturaleza viviente son o constan de estructuras neumáticas. Las estructuras neumáticas se acomodan a otras estructuras neumáticas; se envuelven con estructuras neumáticas, recibiendo presiones internas y provocando tensamientos variables, a través de rellenos (gaseosos, líquidos, granulados) y membranas. La diversidad de formas y construcciones de seres vivos descansa sobre este único sistema.

Uno de los «inventos» más importantes de la naturaleza viviente, o incluso de la naturaleza no viviente, es la fibra. Ésta es un elemento alargado, capaz de someterse a sollicitaciones de tracción. Instaladas en membranas celulares o colocadas entre células, alineadas o dispuestas a modo de red, son, junto a las sustancias que se pueden someter a sollicitaciones de presión, los elementos de construcción decisivos en la

naturaleza viviente para el modelado y el aumento de rendimiento en el sentido del principio de construcción ligera.

Las montañas, surgidas por medio de plegamientos de la corteza terrestre o como erupciones volcánicas, pueden alcanzar determinados tamaños y tienen determinadas formas que no son arbitrarias. Las influencias externas como la erosión por el agua y el viento o los seísmos originan cambios de forma. Los astros forman sistemas de equilibrio gigantescos. Cuanto mayor se haga un astro, más esférico se debe hacer. Si sobrepasa su tamaño límite y su materia ya no resiste a la presión de gravitación, entonces estalla y aparece un agujero negro. En los átomos actúan fuerzas internas muy potentes a las que sólo en casos excepcionales o con violencia se les puede arrebatarse el equilibrio. Con su escasa masa, los átomos constituyen el límite inferior de la ligereza.

También los animales tienen una técnica. Utilizan materiales de la naturaleza no viviente y de la naturaleza muerta, como tierra y madera. Producen materiales y elementos de construcción propios, como colas altamente consistentes y fibras muy resistentes. Forman construcciones de captura (telas de araña), embalses (diques de castor), casas (guaridas, nidos) y ciudades (corales, termitas, avispas, abejas) cuya eficacia constructiva y funcional, según el principio de construcción ligera, puede alcanzar valores muy altos y competir totalmente con los productos del hombre.

### 1.2. Construcción ligera en la técnica

Toda construcción optimizada tiene dos componentes: ligereza y economía. Los criterios más importantes en los países industrializados son el uso de material y energía para la producción y el transporte, así como los costes salariales. La optimización en el campo técnico está orientada, preferentemente y a corto plazo, hacia la reducción de los gastos. A menudo se aceptan masas mayores si el transporte es más barato o los costes salariales más bajos.

Para los aviones, la construcción ligera es una necesidad por motivos de función. En cuanto a los automóviles o vagones de tranvía, la situación es similar. Aquí ya no son los motivos funcionales tan prioritarios para una reducción del material, sino que dan un paso atrás frente al deseo de una reducción de los costes de producción. Esto afecta también a la construc-

ción naval y de embarcaciones. En el esfuerzo por la construcción ligera, se trata de mantener bajo en lo posible el peso de una construcción con capacidad portante invariable o aumentada por medio de una utilización extensiva de todas las posibilidades creativas, estáticas, constructivas y dependientes del material.

La construcción ligera es un requisito para las grandes extensiones y alturas. Sin embargo, en la construcción es todavía una virtud relativamente poco cultivada el hecho de construir de forma realmente ligera, quizás porque falten condiciones que obliguen funcional o constructivamente. Aunque quizás el *quid* sólo está en la ausencia de un entendimiento sencillo: sólo es «bueno» y de «consistencia» lo que está construido pesado y masivamente (o lo que al menos así parece). La conciencia de tener siempre que construir para siglos, o al menos para las próximas generaciones, está todavía demasiado profundamente enraizado. Con la mirada enfocada fijamente hacia un período de utilización lo más largo posible o —lo que casi siempre tiene todavía peores consecuencias— hacia altas y rápidas rentabilidades, nuestro entorno sigue construyéndose sin escrúpulos ni miramientos.

Tampoco la construcción ligera es una panacea. Pero podría ser un medio de ayuda en el penoso camino hacia la mejora y el cambio. Con esto no se implica a las tendencias como, por ejemplo, en el área de la construcción convencional de acero o en la construcción con piezas prefabricadas. En éstas el objetivo prioritario es la reducción del gasto en material por razones económicas. Tampoco se implica aquí a la llamada arquitectura de usar y tirar. A la vista de la reducción de reservas naturales en el mundo de forma peligrosamente rápida, no podemos permitirnos en absoluto tal insensato despilfarro económico.

Detrás de todo lo que se construye por hombres y para hombres, está la demanda a la arquitectura de procurar un medio ambiente digno del hombre y destruir tan poca naturaleza como sea posible. Con insistencia constantemente creciente se formulan las siguientes exigencias: flexibilidad de adaptación, movilidad, construcción a plazo fijo, versatilidad, reciclabilidad, por nombrar sólo algunas de las más importantes. Ninguna de estas pretensiones es nueva, pero las construcciones convencionales ofrecen pocos puntos de partida para lograrlas. Con las construcciones ligeras, las posibilidades son sustancialmente mejores. Un camino de entre muchos otros posibles. Una auténtica alternativa a las construcciones convencionales

con abundancia de nuevas posibilidades constructivas y una variedad de formas infinitamente amplia.

### 1.3. Forma-fuerza-masa

Cada objeto es una construcción. Tiene una forma, puede recibir fuerzas y consta de material. La forma está integrada por la figura externa y la estructura interna; en muchos casos apenas es mensurable geométricamente. La capacidad de recibir fuerzas se comprende con la experimentación o a través del cálculo. El material tiene una masa que sobre la tierra es igual al peso propio; ésta se puede determinar en la mayoría de los casos con balanza.

Con este sentido general del concepto de construcción, ya no importa si un objeto pertenece a la naturaleza viviente o a la no viviente, o si procede de la técnica humana y si tiene agregada una «misión» constructiva o de soporte de peso.

Un objeto surge con todos sus componentes en un proceso: autoformativo o por medio de la voluntad creadora humana, dependiente de leyes físicas, químicas o —cuando es un ser vivo— genéticas. Por tanto, una construcción no sólo es un objeto desnudo, sino que siempre muestra al mismo tiempo un proceso y su resultado. Ambas cosas deben ser consideradas en conjunto.

Esto es sobre todo válido cuando un objeto está compuesto de elementos similares o diferentes, en una mezcla arbitraria y con proporciones arbitrarias. En un objeto tal no es fácil la suma de sus partes. Cada obra de construcción —y todavía mucho más cada ser vivo— es una compleja unidad. El proceso de formación y el aspecto formal constituyen una unidad. En el análisis científico, esta unidad se separa necesariamente para una simplificación y, a veces, se descuidan ciertos aspectos, para encontrar al menos un camino de acceso. Lo decisivo es el paso posterior: agregar al todo los conocimientos adquiridos analíticamente en la síntesis.

Del mismo modo generalizante en que se entiende el concepto de construcción, puede tener lugar también la división de los diversos tipos de construcción. Inmediatamente después, la división de cómo percibimos los objetos: duros o blandos; después cómo los vemos, es decir, según la forma: unidimensionales, bidimensionales, tridimensionales, o bien lineales, superficiales o corpóreos; seguidamente, y por último, en qué modo los objetos son sometidos a fuerzas: arrastrados, pre-

sionados, curvados, desplazados o retorcidos, o bien responsables de la tracción, la presión, la inflexión, el empuje o la torsión (fig. 4).

Las fuerzas pueden actuar sobre una construcción desde fuera (personas, vehículos, nieve, viento) y desde dentro (peso propio, temperatura, humedad) y pueden ser transmitidas por esta misma. Lo que ocurre en la construcción a raíz de estas cargas es el desgaste de la misma, habitualmente exteriorizado a través de las tensiones en el material. Los materiales pueden ser cuerpos sólidos, líquidos o gaseosos en combinación y densidad diferentes. Entre ellos hay a veces intermedios difícilmente definibles, como por ejemplo las fuerzas magnéticas, las fuerzas centrífugas, la gravitación y la irradiación de energía.

La cantidad de formas posibles es interminable, las fuerzas operantes son normalmente conocidas; los materiales disponibles están limitados en su cantidad. Si se quiere ahora elevar la capacidad portadora de una construcción o reducir los gastos de material —para una misión constructiva determinada y para fuerzas dadas—, es de significado decisivo el conocimiento de las relaciones entre la forma y la masa de la construcción y su capacidad de transmisión de fuerzas. Forma, fuerza y masa se hallan en interdependencia directa y determinan conjuntamente la productividad o eficiencia de la construcción.

## **2. Las grandes estructuras ligeras: formas y construcciones**

Las estructuras ligeras de gran amplitud se han convertido en las dos últimas décadas en un importante componente de la arquitectura contemporánea en todo el mundo.

Sin embargo, las construcciones ligeras han permanecido hasta ahora como objetos exóticos en el paisaje de la construcción. Ni siquiera pertenecen al repertorio de arquitectos e ingenieros. A veces se tiene incluso la impresión de que sólo se las recuerda cuando se busca algo especial: una atracción que eleve la imagen y genere prestigio; algo que llame la atención con fines publicitarios y que incite a la compra; una debilidad de la arquitectura.

Por otro lado, cada año se construyen en todo el mundo cientos de construcciones ligeras, desde una pequeña cubierta de catálogo para jardín, hasta una gran

carpa para un estadio. Pero esto no debe ocultar el hecho de que la mayoría de lo que se construye sólo es una copia más o menos deficiente de modelos mucho mejores. Las obras de construcción verdaderamente originales y conseguidas son pocas.

Los distintos tipos de construcción de estructuras ligeras ofrecen una ilimitada variedad de formas. Se pueden construir en los tamaños más diversos y para los fines y utilidades más variados. Hoy sólo se extraen algunas de las múltiples posibilidades de su utilización.

El estado actual de la técnica en el campo de las estructuras ligeras se puede resumir en pocas palabras.

Los problemas básicos de la determinación de la forma, del corte, del cálculo y del comportamiento de la estructura están resueltos. Las preguntas esenciales del proceso constructivo, de las materias primas y los materiales, de la producción y el montaje están contestadas. Sabemos cómo debemos construirlas, pero también sabemos que todavía las podemos mejorar en muchos aspectos. Conocemos sus propiedades formales y constructivas, sus ventajas y sus debilidades.

En tal abanico de posibilidades se halla también el gran peligro de considerar que «todo es construible». La arquitectura es más que un potencial técnico. También la cabaña sencilla con ramas curvadas es una construcción óptima porque ofrece a su inquilino aquello que es su necesidad primitiva: protección contra el tiempo, seguridad, un lugar para dormir —el hombre que la ha construido está en armonía con la naturaleza, antes que ser su opositor. Si una arquitectura con estructuras ligeras pudiese contribuir en algo a tal efecto, se habría alcanzado un gran objetivo.

### **2.1. Formas y construcciones**

Una estructura portante es una construcción que consta de una o varias superficies y de sus respectivos apoyos.

Estas superficies pueden ser curvadas en forma de silla de montar o bien en forma de cúpula, o también pueden ser planas. En relación con su dimensión, tienen siempre una altura muy escasa. Pueden ser superficies cerradas o construidas con una estructura abierta de malla.

Según el tipo de construcción, la superficie portante se mantiene en su forma a través del tensado, de la rigidez del material o del peso. Al cargarla de peso,

sólo queda sometida a tracción o, principalmente, a presión y a flexión.

Los sostenes pueden ser rectos o curvados, puntuales (por ejemplo, un poste) o con forma de línea (por ejemplo, vigas, arcos, cables) y pueden estar situados al borde o bien en el interior de la superficie portante. Al cargarlos se les somete a tracción, presión o flexión.

Una estructura es ligera porque tiene escaso peso propio en relación con su amplitud de extensión y con su capacidad portadora. Es decir, es una construcción pobre en masa y requiere un escaso gasto en material.

Una estructura es ligera cuando, según la dependencia entre el peso propio, como magnitud específica del gasto en material por unidad de superficie, permite la siguiente relación: cuanto mayor es la amplitud de una construcción, menor debe ser su peso propio.

Para una comprensión general, parece tener sentido explicar en este punto, y en pocas palabras, los elementos y características de los distintos tipos de construcción de las estructuras ligeras.

## 2.2. Tiendas y redes

Las *membranas pretensadas* son tiendas de campaña y construcciones tipo tienda. Una membrana o película fina, la mayoría de veces curvada en forma de silla de montar, se estabiliza a través del tensado producido mecánicamente. La membrana sólo se somete a tracción —de entre todas las cargas exteriores. Estas membranas tienen casi siempre la típica forma de tienda puntiaguda (fig. 5). Pero también pueden estar apoyadas en de arcos (fig. 6) o tener una forma curvada a modo de esfera. Además existen otros tipos que consisten en membranas planas (carpas de circo, tiendas de campaña y puestos ambulantes en los cuales el pretensado de la membrana juega un papel menos importante).

*Redes pretensadas* de cable o cuerda. En general, las redes de malla homogénea son de punto cuadrado (fig. 7) y tienen normalmente, por razón de su montaje constructivo, un peso mayor que las membranas, y son apropiadas sobre todo para extensiones mayores o bien para obras de construcción mayores, como cubiertas de pabellones deportivos.

Las *redes espaciales* se estabilizan también a través del tensado, aunque también son posibles como estructuras colgantes o estabilizadas por el propio peso. Las cuerdas de la red configuran superficies planas o cur-

vadas parcialmente que describen distintos cuerpos como por ejemplo pirámides, dados, prismas rectangulares y otros poliedros —dependiendo en cada caso de la forma de la malla. Se han aplicado en parques infantiles.

*Estructuras colgantes* (figs. 8 y 9). Las estructuras colgantes son construcciones que constan de cuerdas u otros elementos de tracción, como cadenas o varillas, y se estabilizan gracias a su propio peso, a cargas o a elementos rígidos complementarios.

## 2.3. Tiendas y redes de cuerda

Las tiendas pertenecen a las construcciones más primitivas del hombre. En todas las épocas de la historia, se utilizó la tienda como vivienda en las más diversas formas y tamaños.

La tienda circular, apoyada sobre varas de madera, es uno de los tipos de tienda más antiguos. Otras clases típicas son el toldo sencillo, la tienda de giba y, como variación, el parasol y el paraguas. La cabaña de indio norteamericana, las tiendas circulares persas, turcas y centroeuropeas de los siglos XII al XVIII, las tiendas de los nómadas árabes, norteafricanos (fig. 10) y asiáticos, son ejemplos de una optimización de formas y construcciones; de sus elementos y del equipamiento de las tiendas, que ha durado muchos siglos.

La construcción moderna de tiendas ha partido de estas tradiciones, y descansa sobre las mismas bases y detalles formales y constructivos. Así, era consecuente y necesario activar el desarrollo de la construcción de tiendas, mediante la investigación de los métodos tradicionales y de los materiales históricos de la artesanía, para no dejar caer en el olvido las prácticas antiguas y hacerlas útiles para la praxis actual de la construcción. Las construcciones de redes de cuerda constan de dos elementos básicos: la superficie portante, responsable de la tracción, y el poste —sometido a sollicitaciones de presión— como soporte. La tela tejida de modo compacto se ha trasladado en dimensiones mayores a la red de malla poco tupida, anudada con cuerdas.

Junto a los grandes techos de red de cuerda, hay en la técnica numerosos ejemplos de redes conocidos por todo el mundo, desde todo tipo de redes de pesca y de protección hasta la tela metálica y la raqueta de tenis.

Las telas y redes no pueden estar apoyadas directamente en un punto debido a su estructura material y la distribución de la tensión en la estructura portante.

Esos puntos de tensión se pueden solucionar con uno o varios lazos de cuerda, con acanaladuras y aristas reforzadas con cuerda, con anillos de acero, con abombamientos y soportes ramificados tipo árbol. También los bordes de la superficie portante deben estar asidos con cuerdas, para recibir las tensiones de la membrana y dividir las entre el poste y la sujeción.

Las tiendas y redes de cuerda pueden tener diferentes grados de transparencia. Los tejidos de fibras naturales y sintéticas pueden ser de color o pueden pintarse. Las redes se pueden cubrir con éstos o con vidrio, con materia sintética, con madera o con planchas, combinando también con otras medidas y montajes para la contención del calor y del sonido.

Cada año se cubren de 200 a 300 millones de metros cuadrados de superficie terrestre con tejidos o redes de los tipos más diversos: estacionarios o temporales, duraderos o de corta vida, fijos, transportables o transformables. Las funciones y utilidades abarcan desde salas de exposiciones, naves industriales y de almacén pasando por invernaderos, colegios, institutos universitarios, grandes almacenes, zonas comerciales y cubiertas para tiempo libre y deporte, hasta colonias y ciudades completas, alojamiento para protección contra catástrofes y casas unifamiliares autárquicas (figs. 11 a 14). Si el concepto de «tienda» ya no se ajusta tan a menudo a la idea original, en todo caso estas construcciones descansan básicamente sobre los principios de forma y construcción de las tiendas y redes de cuerda.

#### 2.4. Membranas o estructuras neumáticas

Una fina membrana curvada casi siempre en forma de cúpula se estabiliza con la sobrepresión o la depresión de un medio a través del cual surge la tensión en la membrana. La membrana sólo es solicitada a tracción entre todas las cargas exteriores. Dicho medio es, en la mayoría de los casos, el aire. Aunque también pueden serlo otros gases, o el agua y los líquidos de todo tipo, incluso cualquier producto a granel. Las construcciones de membranas neumáticas tienen generalmente la típica forma de burbuja (fig. 15) o forma cilíndrica, las cuales se pueden variar y combinar de múltiples maneras.

Las construcciones de membranas neumáticas son, seguramente, las construcciones más ligeras y toleran extensiones extremas. Especialmente en las construc-

ciones hidráulicas las estructuras neumáticas se aplican como recipientes de contención y como diques.

Las estructuras neumáticas son construcciones antiquísimas del ser humano. Odres confeccionados con cuero animal y salvavidas de natación, son todavía hoy ejemplos comunes. El sueño de volar se realizó por primera vez con un globo de papel. Sin la invención del neumático de goma lleno de aire, el automóvil sería hoy impensable. Desde la pompa de chicle hasta el balón de fútbol, desde el bote neumático hasta el globo aerostático publicitario, desde la bolsa de agua de camping hasta el saco de arena para catástrofes, desde la bolsa de plástico para peces dorados hasta la malla de la compra con naranjas: las estructuras neumáticas son algo muy cotidiano. Se pueden comer y se puede jugar con ellas, pueden nadar y volar —siempre hay una cubierta exterior tensada para un llenado interior.

El desarrollo de las estructuras neumáticas como construcciones ha estado condicionado por la capacidad técnica de hacer los tejidos textiles herméticos con adhesivos de caucho y con materiales sintéticos.

En las estructuras neumáticas en construcción sobre tierra una membrana recubre un espacio cerrado en el que a través de ventiladores domina una sobrepresión tan insignificadamente superior a la presión de aire normal, que prácticamente no es perceptible (fig. 16). El interior de la nave es accesible a hombres y mercancías a través de esclusas.

Cuando se cubren grandes extensiones sin apoyo alguno, con cubiertas grandes que son al mismo tiempo protección contra los agentes atmosféricos y cubiertas climáticas, la membrana debe ser reforzada con redes de cuerda de malla holgada. Algunas formas especiales de construcciones neumáticas son cojines llenos de aire y tubos (fig. 17) que, bien aisladamente o bien como complementos, pueden servir como paredes o cubiertas para naves.

Debido a su escasa masa y a un sencillo anclaje constructivo, las estructuras neumáticas son especialmente apropiadas para construcciones transportables y móviles. Esto significa también que las estructuras neumáticas como construcciones duraderas cuya demanda desaparece tras un cierto tiempo de utilización, pueden volver a ser eliminadas comparativamente con pocos gastos y sin grandes residuos. Incluso pueden ser recicladas eventualmente.

Las construcciones neumáticas no tienen que estar necesariamente fijas, sino que pueden hacerse también transformables. El cambio de la forma de cons-

trucción se realiza a través de la inyección o bien de la salida de aire. O bien una membrana es colocada por encima de otra y se estabiliza a través de presión interior.

Otra singularidad son las membranas que se estabilizan no por medio de sobrepresión sino por depresión (fig. 18) y que se pueden apoyar a través de postes interiores abombados o de arcos (también pueden ser tubos neumáticos de alta presión).

Junto a estos tipos de estructuras neumáticas cerradas hay también construcciones neumáticas abiertas. Ejemplos típicos son las velas de barco, paracaídas y depósitos de líquidos abiertos por arriba, como las piscinas desmontables.

Un campo de aplicación cada vez más importante son las construcciones neumáticas en el agua como construcciones de ingeniería para la protección de aguas y de costas, para su utilización en catástrofes y para ahorrar energía (figs. 19 y 20). Esto abarca desde diques, esclusas y presas de todo tipo, pasando por centrales eléctricas de olas, plantas depuradoras, desalinización de aguas marítimas e instalaciones solares, hasta la captura de algas y peces.

Son un ejemplo los tubos de membrana llenos de agua con una o varias estancias (anchura de hasta 5 m y longitud de más de 50 m) y capaces de flotar, como cierres de emergencia en roturas de presas y diques (fig. 21); escolleras de tubos de membrana llenos de agua (aproximadamente de unos 2,5 m de ancho y unos 40 m. de largo) para la regulación del nivel de agua, de la velocidad del flujo y la cantidad de desagüe en los ríos. Otros ejemplos serían los cierres móviles de tubo flexible llenos de agua para el mantenimiento de canales de navegación o bien para el bloqueo y evacuación de cualquier tramo; los grandes contenedores para almacenamiento de cereales o grava colocados sobre tierra o flotantes en agua.

Como construcciones se han demostrado muy económicas, sobre todo en aplicaciones para plazos relativamente cortos, además de ser extraordinariamente ventajosas para el gasto general en energía, tanto para su producción como para su funcionamiento.

## 2.5. Cubiertas de malla

Las *cubiertas de malla* son construcciones de varilla curvadas, inflexibles y continuas que forman una reja plana con dibujo cuadrangular y una distancia cons-

tante entre los nudos. Se someten principalmente a solicitaciones de presión y flexión (fig. 22).

Una ventaja sustancial de este tipo de construcciones es que el espectro de las posibilidades tecnológicas para su realización es extraordinariamente amplio (figs. 23 y 24). Son, por lo tanto, construcciones realizables con medios primitivos, escaso *know-how* técnico y utensilios fácilmente accesibles.

Las *cubiertas ligeras* son construcciones que, debido a una consistencia de sus paredes extremadamente débil, y/o a la utilización de materiales especiales (por ejemplo, hormigón armado o materia sintética), muestran un peso propio considerablemente menor que otras construcciones aconchadas (figs. 25 y 26).

*Estructuras portantes transformables* o bien techos transformables son construcciones que se dejan abrir y cerrar, es decir, cuya forma se deja cambiar según las necesidades. La mayoría están construidas con membranas pretensadas (fig. 27), aunque también se han llevado a cabo ya con membranas neumáticas y también con todo tipo de redes y mallas imaginables. La construcción consta, en líneas generales, de una estructura portante superior a la que se le puede agregar o quitar el techado propiamente dicho. El accionamiento tiene lugar a mano o con motor. Un tipo especial de construcción de techos transformables son los paraguas. También existen techos transformables realizados convencionalmente de madera, acero, hormigón y cristal en los cuales piezas completas de la obra de construcción se desplazan sobre rieles.

Las estructuras portantes transformables sirven para el techado de obras de construcción de tamaño pequeño a mediano, a las que garantizan independencia del tiempo atmosférico, como por ejemplo piscinas, instalaciones deportivas, teatros o lugares públicos de todo tipo. Como toldos sobre teatros o estadios, esta construcción ya se dio en tamaño muy considerable con los romanos.

Las *estructuras portantes mixtas* o estructuras híbridas son construcciones surgidas de la combinación constructiva de uno o varios de los tipos de construcciones mencionados hasta ahora o de uno de ellos con elementos de construcción convencionales. Aquí pertenecen, por ejemplo, las membranas tensadas entre tubos neumáticos de alta presión (fig. 28); las cubiertas de malla que como rígidos elementos constructivos contribuyen al soporte del peso de un esqueleto de acero o de hormigón; los techos colgantes con escaso pretensado, como una red de cuerda para determinadas

cargas; los puentes colgantes en los que el rígido soporte de la calzada contribuye al sostenimiento y a la solidez.

### *Estructuras reticulares de varilla*

Constan de piezas de varilla rectas, sometidas a presión o a tracción, que, en disposición espacial variada y en diversas formas planas, se montan en un entramado plano o curvado espacialmente. La construcción final puede también adquirir forma esférica (fig. 29).

Sin embargo, por su particular generación de formas y su comportamiento portante, son, en el fondo, una especialidad completamente independiente y además muy extensa. En cuanto a su aplicación, se vienen utilizando desde hace tiempo por arquitectos e ingenieros para las funciones más diversas.

A las estructuras de varilla pertenecen también las llamadas construcciones de Tensegridad, desarrolladas por Buckminster Fuller. Consisten en cuerdas pretensadas continuas y sometidas a tracción bajo cargas exteriores; y en varillas de presión que tensan a las cuerdas según una sistemática determinada.

### *Cubiertas de malla*

Uno de los móviles básicos en la historia de la construcción es cubrir grandes espacios. Esto, unido al afán de construir de modo flexible y con el mínimo gasto, ha llevado desde los pesados tejidos de la antigüedad a las finas cubiertas aconchadas de hormigón. La rejilla como elemento constructivo no es nada nuevo. Las cabañas y casas de África y Asia, construidas con ramas simples, con varillas de madera trabajadas o bambú, son ejemplos milenarios, así como las paredes plegables de rejilla de los asiáticos. Los romanos construían pequeños cenadores con rejillas de madera arqueadas (fig. 30), las galeras turcas tenían rejillas curvadas en forma de boya como construcciones de popa.

En la construcción moderna, el alto porcentaje de gastos para el armazón supone hasta más del 50% de los gastos totales, por lo que es comprensible que se prefieran las superficies convencionales como los cilindros, los conoides o los paraboloides hiperbólicos.

Las cubiertas de malla han surgido como búsqueda de una forma de construcción sencilla y económica para las cubiertas aconchadas. Una cubierta de malla consta de pocos y sencillos elementos de construcción. Las varillas de la reja son rectas y tienen la misma sec-

ción transversal. Todos los nudos son iguales. El borde se forma con varias varillas colocadas una junto a otra, o bien es una pieza especial de construcción. Todas las piezas se pueden prefabricar y transportar empaquetadas o dobladas en secciones o en su totalidad. El margen tecnológico va desde ramas grandes o cañas de bambú como varillas, con nudos atados sencillamente sobre varillas de madera aserradas, o perfiles de acero de uso corriente en el mercado con tornillos para el ensamblaje, hasta piezas acabadas, con las cuales se componen las varillas de la malla, con piezas de metal o plástico como nudos.

Las cubiertas de malla se pueden erigir rápidamente y sin grandes gastos, ya que la reja se monta y los nudos son rotatorios. Se eleva a mano o con un aparato elevador sencillo, con lo cual las mallas, originalmente cuadradas, transforman sus ángulos en rejilla de tijera y las varillas se arquean. No es necesaria una armadura o un aconchado especial. Tras fijar el borde y estirar los nudos, el modelo está fijo y la concha de rejilla ya tiene capacidad de carga.

Las conchas de rejilla se pueden utilizar bajo todos los comportamientos climáticos, y ofrecen una gran flexibilidad. Son apropiadas para cualquier finalidad en la que se tengan que cubrir o techar pequeños o grandes espacios, desde el quiosco hasta la vivienda, desde la nave de almacenaje sencilla hasta la gran cubierta multifuncional, desde el alojamiento de emergencia temporal a la obra definitiva (figs. 31 y 32). Las cubiertas de malla no necesitan cimientos, se dejan erigir en casi cualquier tipo de terreno de construcción y son insensibles a los corrimientos del suelo y a los seísmos, porque tienen una masa pobre y son muy elásticas.

## 2.6. Soportes ramificados

Los *soportes ramificados* son un sistema estructural plano o espacial que consiste en ramas separadas, cada una de las cuales se bifurca en un punto determinado (nudo) en, como mínimo, otras dos ramas. Tales estructuras pueden ser sometidas a tensión, a compresión, a flexión y a torsión. Normalmente las cargas exteriores actúan sólo en los extremos de las varas. No existen las cargas sobre nudos. Las columnas ramificadas normalmente se usan como soportes para cualquier tipo de estructura envolvente o de techado (figs. 33 y 34).

Las columnas ramificadas no son un nuevo desarrollo ni una invención moderna. Hay numerosos antecedentes históricos de igual o similar estilo. Hasta la fecha, sin embargo, sus bases geométricas y estructurales han sido poco investigadas. Parece que la mayoría simplemente han sido construidas por razones espirituales y ornamentales.

El aspecto arquitectónico y la eficiencia económica dependen decisivamente de la forma, según los parámetros geométricos tales como el tipo de nudos, la longitud de las ramas, el ángulo de ramificación, etc. Toda optimización de un diseño, orientada a un menor gasto de material, debe empezar por la forma. Los detalles estructurales, los materiales y el tipo de estructura primaria son importantes también, pero en segundo lugar. El análisis estructural y la elaboración constructiva normalmente no traen mayores dificultades, y pueden ser llevados a cabo, en la mayoría de los casos, con métodos corrientes y convencionales. Aunque las reglas básicas y las leyes de la forma y construcción óptimas de estructuras ramificadas no estén investigadas globalmente, ya son conocidas en sus líneas esenciales o al menos son reconocibles.

Parece, sin embargo, que se ha redescubierto la calidad arquitectónica y la atracción estética de las estructuras ramificadas por principio, sin observar primero más conocimientos sobre las propiedades geométricas y estructurales de las ramificaciones arbóreas y profundizar en un campo desconocido pero prometededor para la arquitectura.

Dibujos de árboles técnicos: de la columna simple a una estructura arbórea con nueve generaciones. Parámetros dados: relación constante entre longitud y diámetro (área) de las varillas en cada generación, y suma constante de los diámetros (áreas) de las varillas en todas las generaciones (fig. 35).

Dibujos en ordenador de un soporte arbóreo bajo las mismas cargas verticales en cada punto de apoyo: desplazamientos, momentos de curvatura, fuerzas cruzadas (transversales), fuerzas normales (de arriba izquierda a abajo derecha). (Figs. 36 y 37.)

Maqueta de una estructura membranosa pretensada (tienda) apoyada sobre columnas arbóreas (fig. 38).

Maqueta de una cúpula hexagonal de varillas «al revés», sustentada por varios soportes ramificados (fig. 39).

### 3. Diseño y determinación de la forma

Las estructuras portantes ligeras y amplias no se diseñan del modo y manera corrientes. Sus formas y construcciones tienen un proceso de planificación que se distingue de la obra de construcción convencional. Su parte esencial es la determinación de la forma. En este caso, la elección subjetiva de una forma arquitectónica se sustituye por una determinación objetiva de la forma.

La determinación de la forma es una operación empírica que descansa sobre leyes físicas sencillas y —según el tipo de construcción— está determinada por las leyes de generación de la forma. Esta operación se puede llevar a cabo experimentalmente con maquetas o con programas matemáticos en ordenador.

La «libertad de proyección» ya no se encuentra en cualquier forma modelada, sino en la elección y transformación de las ventajas y condiciones para la determinación de una forma óptima. A cada tipo de construcción de una estructura ligera corresponde uno o varios métodos de determinación de la forma que contienen todos los rasgos y propiedades esenciales de este tipo de construcción. La decisión por un tipo de construcción determinado significa por principio el establecimiento de un método de determinación de la forma, y viceversa.

Forma y construcción se condicionan recíprocamente y forman una unidad no separable. Cada cambio de la forma tiene consecuencias inmediatas sobre la construcción y su comportamiento portante. Toda exigencia en relación con la capacidad portante y con la estabilidad influye directamente sobre la forma.

Cada decisión formal o constructiva implica unas posibilidades de producción y de montaje.

La determinación de la forma es un proceso integral de optimización progresiva. Los criterios son calidad arquitectónica y estática de la forma y construcción, así como la función y utilidad de la obra de construcción y su integración en un entorno construido y natural. En cada fase de un proceso de determinación de la forma, todos los aspectos de la obra de construcción a proyectar deben estar incluidos en perfecta armonía si es posible. Para la proyección significa esto que arquitectos e ingenieros, expertos y constructores deben cooperar en equipo «codo con codo» desde el principio y en todas las fases.

### 3.1. Determinación de la forma con maquetas

El significado de la maqueta en un proceso de determinación de la forma supera con diferencia la importancia que le corresponde, por lo común, en un proceso de proyección «normal».

En éste, la maqueta es un medio complementario para la presentación de la arquitectura: es una reproducción de la obra de construcción cuya forma y construcción fue determinada de otro modo. Aquí la maqueta es el objeto de la planificación: es la obra misma en menor escala; por tanto, simplificada necesariamente y reducida a lo esencial, aunque con todos sus rasgos y propiedades fundamentales de forma y construcción. En la maqueta determinante de la forma, el estado de la planificación de una estructura ligera es visible y tangible en cada fase y en cada momento.

En el proceso de determinación de la forma, son necesarias normalmente varias maquetas de diverso tipo y calidad. Esto depende tanto del tipo de construcción elegido, del tamaño de la obra de construcción y de la complejidad de su forma, como de la cantidad de información que se quiera transmitir y la precisión deseada (por ejemplo, maqueta previa y maqueta de medición) y de la finalidad de aplicación de la respectiva maqueta (por ejemplo, determinación de la geometría, del corte, las fuerzas o las deformaciones). Los tipos de maqueta se distinguen sobre todo en el material y en la técnica de construcción. Además, hay diferencias sustanciales en los métodos de valoración y medida.

A menudo es posible hacer útil una maqueta para diversas exigencias y finalidades, por ejemplo a través de la mejora bien calculada de la forma, la variación de detalles, la solidificación de la superficie, la incorporación de instrumentos de medición o la aplicación de distintos métodos de medición; y con esta maqueta —modificada gradualmente— recorrer varias fases del proceso de determinación de la forma.

Se pueden diferenciar tres tipos de maquetas: pre-maquetas, maquetas de medición y maquetas especiales. El orden de sucesión corresponde, en principio, al modo de proceder en el proceso de determinación de la forma.

Las *pre-maquetas* son maquetas sencillas, casi siempre pequeñas y a veces todavía bastante genéricas, con las cuales se pueden desarrollar y presentar, relativamente de prisa y sin grandes gastos, las primeras ideas de formas y construcciones; por ejemplo, tejidos de medias extendidos para tiendas y redes de cuerda

(fig. 40), globos hinchados para estructuras neumáticas, mallas metálicas curvadas para cubiertas de malla (fig. 41), películas y pompas de jabón para tiendas y estructuras neumáticas. Estas maquetas sirven para el acercamiento a una forma buscada y a sus posibilidades constructivas y proporcionan una amplia base inicial para la selección y el desarrollo posterior de la forma y construcción definitiva.

Las auténticas maquetas de determinación de la forma son las *maquetas de medición*, pues la determinación de la forma significa el registro y la fijación de valores geométricos y —en tanto la maqueta sea apropiada para ello— de valores estáticos. El conocimiento exacto de la forma en longitudes, anchuras y alturas; en coordenadas, ángulos, curvaturas y curvas de nivel; en desarrollos y cortes, es el fundamento para todos los siguientes pasos de proyección hasta la realización de la obra de construcción, especialmente para el cálculo estático y para la medición de los elementos de construcción. Ejemplos de maquetas de medición son, entre otros, las películas de jabón y los tejidos para tiendas y redes de cuerda; las pompas de jabón y películas de goma formadas con yeso para estructuras neumáticas, y redes de cadena colgantes para cubiertas de malla.

La comprobación a partir de una maqueta de valores estáticos como las cargas, el pretensado, las fuerzas y tensiones, las deformaciones y dilataciones, sólo es posible cuando ésta es similar en lo geométrico y en lo estático-elástico a la obra proyectada (por ejemplo, una maqueta de red metálica pretensada para una construcción de red de cuerda). Sobre la base de las leyes de la estática de maquetas, estos valores pueden transferirse directamente de la maqueta a la obra de construcción. Así tenemos a disposición todos los datos necesarios para el cálculo, la medida y la realización de una estructura portante de superficie ligera y extensible.

Las *maquetas especiales* son, por ejemplo, maquetas de sección de determinadas partes de una forma examinadas con mayor minuciosidad a una escala mayor (puntos altos o profundos, cortes de superficies, entre otros); maquetas de movimiento de estructuras portantes transformables en las que se estudian los procedimientos de conducción, el replegamiento, el doblamiento y la mecánica motora en distintos estadios; maquetas de demostración que sirven para el estudio de planteamientos de problemas especiales: interacción en el entorno, interacción entre el espacio

interior y el exterior, caída de la luz o proyección de la sombra en distinta posición del sol, posibilidades de desmontaje o de futuras ampliaciones (fig. 42); maquetas de túnel aerodinámico (fig. 43).

### 3.2. Películas y pompas de jabón

Las maquetas de películas de jabón son el método fundamental de determinación de la forma para tiendas y redes de cable. Las maquetas de pompas de jabón tienen el mismo significado elemental para la determinación de la forma de estructuras neumáticas.

La forma de la película de un líquido, que se extiende entre dos bordes cualesquiera cerrados espacialmente, es una superficie mínima. Resulta de la tensión superficial del líquido debido a fuerzas intermoleculares, y es tan finamente delgada que una variación de su forma por medio del peso propio es imperceptiblemente pequeña. Para conseguir grandes tensiones de superficie, y con ello largos períodos estáticos y extensión suficiente, se utilizan para la producción de las películas soluciones de jabón o detergentes principalmente.

La superficie mínima de una película de jabón es una forma autoformativa. Una maqueta cuyos bordes consisten en finos hilos es sumergida en la solución. Al sacarla emerge la película jabonosa por sí sola y sin influencia exterior. Una pompa de jabón es también autoformativa, sólo dependiente del contorno prefijado y de la presión interna. Si estos experimentos se realizan en una cámara climatizada, sin polvo, con un alto grado de humedad y baja temperatura, las maquetas se mantienen hasta una hora y media. La medición geométrica de la forma tiene lugar a través de tomas fotográficas de la maqueta sobre un cristal mate reticulado (fig. 44).

La superficie mínima de una película de jabón cumple dos condiciones. En primer lugar, las curvaturas están igualmente contrapuestas en cada punto de la superficie. En segundo lugar, la tensión de superficie en cada punto es igual en todas direcciones, y sólo entran tensiones de tracción.

La segunda condición también se cumple en una pompa de jabón llena de aire, esto es, una pompa formada neumáticamente y estabilizada. En sentido estricto, sin embargo, ésta no es una superficie mínima porque presenta una curvatura en forma de cúpula. No obstante, a la pompa de jabón se le da el nombre de «superficie mínima» porque —independientemente

de la magnitud de la presión interior— cubre siempre el volumen más grande posible en la superficie más pequeña (fig. 45).

La forma de la película mínima es la forma más ventajosa, constructivamente para el estado de tensión de una tienda o de una red de cuerda pretensada, o bien de una estructura neumática bajo constante presión interna, y requiere gastos mínimos en material. Esto no es aplicable necesariamente a otros casos de carga bajo exigencias exteriores, como por ejemplo el viento o la nieve, que normalmente se distribuyen desigualmente y aparecen en direcciones y tamaños variables.

La determinación de forma con una película de jabón o con una pompa, por tanto, puede ser con frecuencia sólo un primer paso: la superficie mínima proporciona una forma inicial que debe seguir desarrollándose hacia la forma de construcción definitiva con otros medios de determinación de la forma. Ello significa, concretamente, que en muchos casos será necesario, por razones de la carga y del comportamiento portante, variar la forma de la superficie mínima para la ejecución de una construcción; por ejemplo, a través de cambios bien calculados de las curvaturas de superficie, o a través de una incorporación de reforzamiento de membrana y cuerdas complementarias, con lo cual no sólo cambia la geometría de la forma, sino que también queda condicionada la distribución de tensiones en la forma.

### 3.3. Tejidos y láminas

Las maquetas de tejidos y láminas son los dos métodos de determinación de la forma más importantes para la elaboración y el desarrollo de forma y construcción en tiendas y redes de cuerda, así como en estructuras neumáticas.

Un tejido debe ser elástico (igual en las dos direcciones de la malla, si es posible) o bien permitir el corrimiento de los ángulos entre ambas direcciones de los hilos para posibilitar las formas espaciales. O debe tener ya un corte aproximativo que se optimice en la maqueta. En general, la forma de una tienda o de una red de cuerda determinada con una maqueta de tejido siempre diferirá, más o menos, de la superficie mínima.

Se utilizan tejidos ligeros producidos industrialmente y tejidos de rejilla de todas clases de lana, seda, poliéster, poliamida y otros (fig. 46). Para las redes de

cuerda también se utilizan las redes de hilo o de alambre elaboradas a mano.

Una lámina sólo se puede transformar, a raíz de su elasticidad, en una forma independiente y curvada sin arrugas. Cuando se forma para una tienda o para una red de cuerda por medio de pretensados exteriores, se comporta similarmente a la superficie mínima.

Este tipo de maquetas se puede utilizar para el cálculo de tensiones y fuerzas que actúan sobre las estructuras.

### 3.4. Redes colgantes

Son el método fundamental de determinación de la forma para cubiertas de malla, la cual se puede caracterizar con tres palabras clave: colgante, inversión y forma de concha.

La forma colgante es una figura autoformativa en la que sólo intervienen fuerzas de tracción. A partir de la inversión de ésta, resulta la superficie de apoyo de la concha de malla resistente a la flexión, en la que bajo el peso propio sólo intervienen fuerzas de presión y no se presenta ni un momento de flexión.

Una forma colgante no es una superficie mínima. Las curvaturas tienen forma de cúpula. Las fuerzas en cada nudo de la red son de tamaño diverso y no se distribuyen regularmente —a excepción de las formas simétricas.

La producción de una red colgante de cadenas o de ganchos y anillas es relativamente costosa.

Una maqueta de red colgante es una maqueta de medición. Proporciona todos los valores geométricos exigibles sobre la forma de una concha de rejilla y el corte de la rejilla y de los bordes.

La determinación de la forma con una red colgante da como resultado la forma de construcción definitiva, con lo cual se descuidan diferencias geométricas de poca consideración entre las líneas poligonales de la red y las varillas curvadas de la rejilla.

Básicamente, el método de determinación de la forma con redes colgantes es apropiado para todo tipo de cubiertas con superficie cerrada, así como para cubiertas de varilla con retículas de módulos de cuatro o más lados.

### 3.5. Hilos en agua

Este método sirve para la determinación de la forma de soportes y estructuras ramificadas. Se introduce en agua una maqueta de hilos de lana o de seda con una longitud dada. Cuando la maqueta se extrae del agua, los hilos se unen unos junto a otros a consecuencia de la tensión de superficie del agua y construyen un sistema ramificado (figs. 47 y 48).

Sin embargo, sí se ha desarrollado un *know how* propio para el cálculo sobre maquetas y su traslado al diseño por ordenador que permitiría ser desarrollado en otra ocasión más específica.