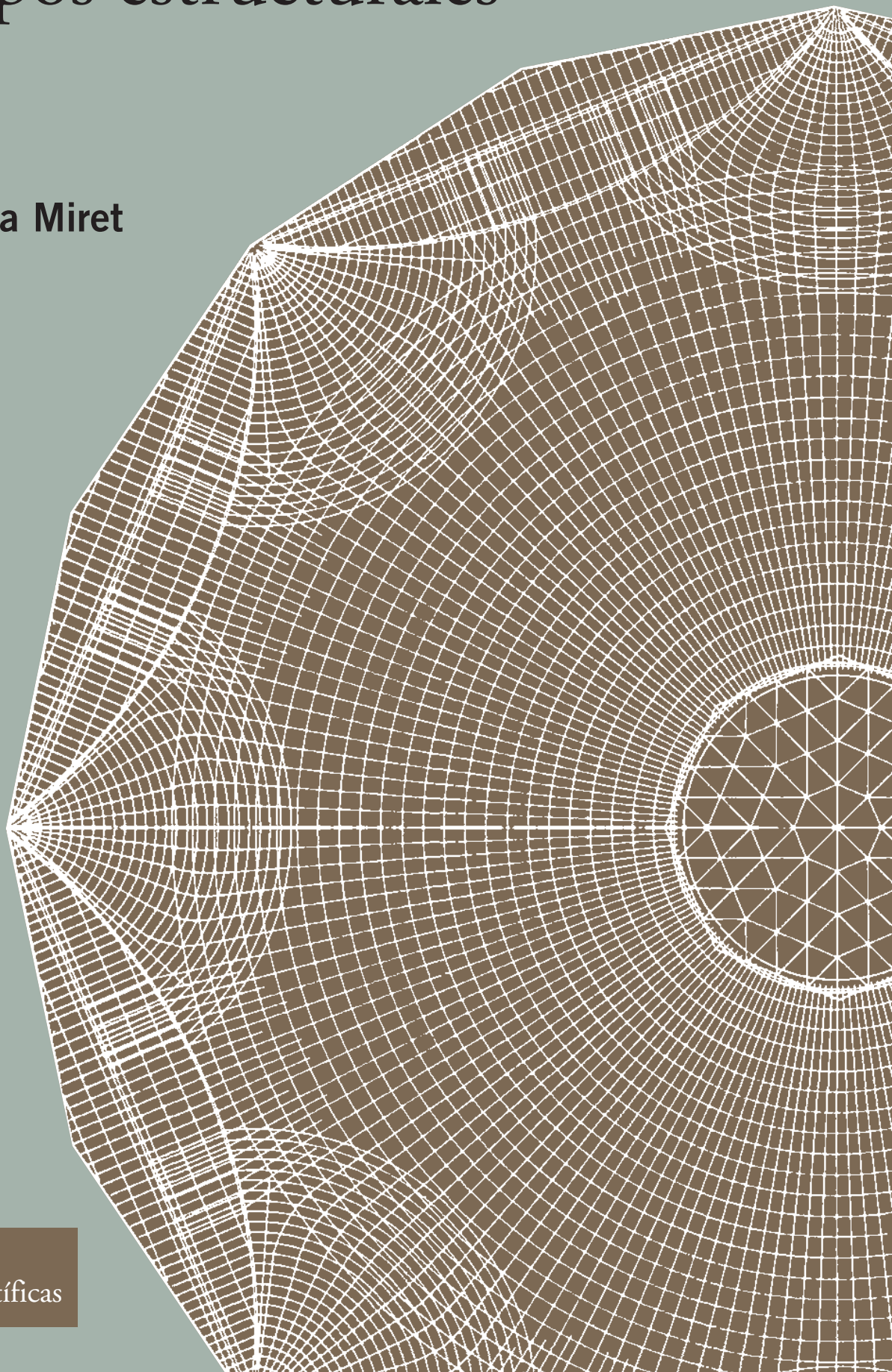


Razón y ser de los tipos estructurales

Eduardo Torroja Miret

Consejo Superior de
Investigaciones Científicas



Razón y ser

de los tipos estructurales

Eduardo Torroja Miret

Razón y ser

de los tipos estructurales

Edición revisada por
José A. Torroja

CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS
MADRID 2010

Reservados todos los derechos por la legislación en materia de Propiedad Intelectual. Ni la totalidad ni parte de este libro, incluido el diseño de la cubierta, puede reproducirse, almacenarse o transmitirse en manera alguna por ningún medio ya sea electrónico, químico, mecánico, óptico, informático, de grabación o de fotocopia, sin permiso previo por escrito de la editorial.

Las noticias, asertos y opiniones contenidos en esta obra son de la exclusiva responsabilidad del autor o autores. La editorial, por su parte, sólo se hace responsable del interés científico de sus publicaciones.

Primera edición, 1957

Segunda edición, 1960 (más once reimpressiones)

Tercera edición revisada, 2007. Primera reimpresión, 2010

Catálogo general de publicaciones oficiales:
<http://www.060.es>



Dibujos: G. Echegaray y M. Barbero. Arquitectos

© Herederos de Eduardo Torroja Miret

© De la presente edición: CSIC

ISBN: 978-84-00-08612-1

NIPO: 472-10-075-1

Depósito Legal:

Edición al cuidado de Ediciones Doce Calles, S. L.

En esta edición se ha utilizado papel ecológico sometido a un proceso de blanqueado ECF, cuya fibra procede de bosques gestionados de forma sostenible.

Índice

Capítulo I	
Planteamiento general del problema	13
Capítulo II	
El fenómeno tensional	23
Capítulo III	
Los materiales clásicos	37
Capítulo IV	
Madera y acero	51
Capítulo V	
El hormigón armado, el pretensado y la prefabricación	67
Capítulo VI	
El soporte y el muro	81
Capítulo VII	
El arco	91
Capítulo VIII	
La bóveda y la cúpula	105
Capítulo IX	
La viga de alma llena y la placa	123
Capítulo X	
Triangulaciones y mallas	139
Capítulo XI	
La contención	155
Capítulo XII	
La cubierta y el cerramiento	167
Capítulo XIII	
El piso y el edificio	189
Capítulo XIV	
Puentes y acueductos	201
Capítulo XV	
Funcionalismo estático-resistente	217
Capítulo XVI	
Procesos de ejecución	231
Capítulo XVII	
La expresión estética	247
Capítulo XVIII	
Línea y superficie	263
Capítulo XIX	
La génesis del esquema estructural	281
Capítulo XX	
El cálculo	295
Capítulo XXI	
El proyectista y la organización	307
Índice de figuras	315

Prólogo

En 1957, Eduardo Torroja publica *Razón y Ser de los tipos estructurales*, libro de difícil catalogación en la literatura técnica sobre ingeniería estructural. No es un libro de texto sobre análisis estructural ni sobre el comportamiento de sus materiales, aunque tiene un profundo carácter didáctico en ambos sentidos. Ni es un libro solamente informativo sobre los tipos estructurales al uso y sus formas. Ni, aún menos, es un libro de investigación. Es, más bien, el conjunto de reflexiones que un proyectista de estructuras expone como esquema de su proceso mental, tanto racional como irracional, o emocional, a la hora de plantearse un nuevo proyecto; del poso de experiencias y vivencias de una vida de trabajo en este campo. En él, Torroja no sólo habla de conceptos técnicos; también habla de sus preferencias estéticas, de las posibilidades formales de determinadas líneas y superficies, de la responsabilidad del proyectista y de su organización... Ingenieros, arquitectos, estudiosos o simplemente interesados por el diseño estructural, encontrarán en sus páginas ideas que capten su atención, y se sentirán atraídos por el cúmulo de conceptos, imágenes, reflexiones y, en definitiva, de enseñanzas y sugerencias que en él se condensan.

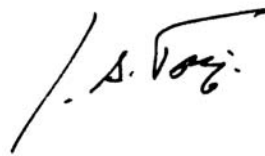
Razón y Ser, como suele conocerse coloquialmente el libro, tuvo un rápido éxito. A su primera edición, editada por el entonces Instituto Técnico de la Construcción y del Cemento, siguió una segunda, en 1960, corrigiendo alguna errata de la primera –e introduciendo, sin quererlo, algunas nuevas–, a la que Torroja añadió unos párrafos en el capítulo XII, relativos al uso de las mallas tesas en cubiertas, una técnica todavía poco utilizada en su época. Su difusión internacional fue asimismo rápida, viendo la luz ediciones en italiano, alemán y japonés. La prematura muerte del autor, en 1961, impidió que se concretasen contratos de edición en EE.UU., Francia, Polonia y Yugoslavia. En España, cuando el Consejo Superior de Investigaciones Científicas concentró las publicaciones de todos sus Centros, su Departamento de Publicaciones, ante la demanda del libro, siguió realizando hasta once nuevas reimpressiones, todas ellas a partir de aquella segunda edición de 1960.

Hace algún tiempo, la Comisión de Libros del Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos propuso establecer contactos con el Departamento de Publicaciones del CSIC para realizar una nueva coedición de esta obra, idea a la que se sumó el Centro de Estudios Históricos de Obras Públicas y Urbanismo, del CEDEX, en cuyo «Archivo Torroja» se encontraban los originales de *Razón y Ser*. El libro que el lector tiene en sus manos es el resultado del esfuerzo conjunto de estas tres instituciones.

Como ocurre con frecuencia al plantearse una nueva edición, en particular de un texto de estas características, cabe la duda sobre la pertinencia de realizar su actualización a la realidad de la construcción actual. Mucho ha cambiado esta realidad desde finales de la década de los 50 hasta nuestros días; y seguro que Torroja, si hubiese vivido

veinte años más, habría ampliado el libro con comentarios sobre los nuevos tipos estructurales y procesos constructivos en boga hoy en día. Pero no sabemos lo que habría escrito ni cómo lo habría hecho. Por otra parte, *Razón y Ser* refleja el pensamiento de un proyectista de estructuras de una determinada época, con unos medios técnicos y hasta con unas sensibilidades estéticas propias de esa época. Por todas estas razones, se ha tomado la decisión de no actualizar el texto, manteniéndolo íntegro sin modificación alguna, corrigiendo las erratas encontradas. Solamente, para ilustrar el texto de los párrafos añadidos por el propio autor en la segunda edición, se han incluido tres nuevas imágenes en el capítulo XII, extraídas de las diapositivas utilizadas por Torroja en sus clases de «Tipología Estructural» en la Escuela de Ingenieros de Caminos de Madrid, así como algunos nuevos pies de imágenes aclaratorios de su contenido.

Estoy seguro de que esta tercera edición revisada, fruto de este esfuerzo editorial a tres bandas, será decisiva para mantener el interés por este libro y, al mismo tiempo, el recuerdo de su autor, Eduardo Torroja.

A handwritten signature in black ink, consisting of a diagonal slash followed by the name 'A. Voz'.

Cada material tiene una personalidad específica distinta, y cada forma impone un diferente fenómeno tensional. La solución natural de un problema –arte sin artificio–, óptima frente al conjunto de impuestos previos que la originaron, impresiona con su mensaje, satisfaciendo, al mismo tiempo, las exigencias del técnico y del artista.

El nacimiento de un conjunto estructural, resultado de un proceso creador, fusión de técnica con arte, de ingenio con estudio, de imaginación con sensibilidad, escapa del puro dominio de la lógica para entrar en las secretas fronteras de la inspiración.

Antes y por encima de todo cálculo está la idea, moldeadora del material en forma resistente, para cumplir su misión.

A esa idea va dedicado este libro.

Planteamiento general del problema

En la literatura técnica de la construcción se encuentran cientos de obras, de carácter teórico, sobre el cálculo de sus estructuras; muy pocas sobre las condiciones generales de sus diferentes tipos, sobre las razones fundamentales que los determinan, sobre las bases que han de orientar el problema de su elección y las ideas rectoras que guían al proyectista en su trabajo inicial, siguiendo principios que, poco a poco, ha ido asimilando su mente, pero en los que rara vez se para a reflexionar.

No se trata, en realidad, de decir, en esta obra, nada nuevo sobre el tema. Sólo se pretende acompañar al técnico y proyectista de la construcción –sea arquitecto, ingeniero o simplemente aficionado– en una tranquila divagación por el laberinto, cada vez más enredado, de esta técnica, para espigar, ordenar y recalcar ideas y conceptos fuera de todo lo cuantitativo y numérico.

Las teorías rara vez dan más que una comprobación de la bondad o del desacierto de las formas y proporciones que se imaginan para la obra. Estas han de surgir primero de un fondo intuitivo de los fenómenos, que ha quedado como un poso íntimo de estudios y experiencias a lo largo de la vida profesional. De esto y sólo de esto se pretende tratar ahora.

El cálculo no es más que una herramienta para prever si las formas y dimensiones de una construcción, simplemente imaginada o ya realizada, son aptas para soportar las cargas a que ha de estar sometida. No es más que la técnica operatoria que permite el paso de unas concepciones abstractas de los fenómenos resistentes a los resultados numéricos y concretos de cada caso o grupo especial de ellos. El asombroso avance, que en las teorías mecánicas de los elementos sustentantes de las construcciones han producido los siglos XIX y XX, hace menospreciar excesivamente el estudio ontológico de la morfología resistente. Todo proyectista que descuide el conocimiento de sus principios, está expuesto a graves fracasos; y el caso es que en las escuelas hay tanto que aprender que rara vez queda tiempo para pensar.

Para acertar en la concepción y traza de las estructuras, y aun de las construcciones en general, es necesario meditar y conocer bien las causas profundas, la razón de ser, de su mayor o menor aptitud resistente; y se trata de enfocar, ahora, la cuestión, prescindiendo de todo lo accesorio y, en especial, de todo lo que representa un proceso o un valor numérico; se trata de considerar el problema desde puntos de vista más generales y cualitativos. Porque es absurdo descender a la concreción cuantitativa sin la seguridad de tener encajado el conjunto en sus acertados dominios. Es un error demasiado corriente empezar a calcular la viga número 1 sin haber antes meditado si la construcción debe llevar vigas o no.

El empeño es audaz, porque, como decía Confucio, tan inútil es aprender sin meditar, como es peligroso pensar sin antes haber aprendido de otros; y en este caso,

es raro encontrar, entre la literatura moderna –la de hace unos decenios puede, ya, resultar inútil–, autores que presenten el problema tal como ahora se pretende enfocarlo. Pero, la misma banalidad de estos comentarios, quizá sirva para decidir a otros a hablar y escribir sobre el tema, cubriendo ese bache que acusa la literatura técnica.

En todo problema de este género, se tiene una finalidad con unas condiciones esenciales, y otras accesorias, que cumplir; y se tienen unos medios para realizarlo.

La finalidad varía enormemente de un caso a otro, pero siempre existe. Construir por construir resulta demasiado costoso para servir de juego a los hombres maduros de ésta y de todas las épocas. No siempre alcanza ese algo; pero construye para algo.

Las obras no se construyen para que resistan. Se construyen para alguna otra finalidad o función que lleva, como consecuencia esencial, el que la construcción mantenga su forma y condiciones a lo largo del tiempo. Su resistencia es una condición fundamental; pero, no es la finalidad única, ni siquiera la finalidad primaria.

Para lo que aquí interesa, las finalidades funcionales primarias podrían agruparse en la siguiente forma:

- 1.º Aislar un determinado volumen del exterior. O sea, defender ese volumen de los agentes naturales exteriores: viento, lluvia, nieve, ruidos, temperaturas, vistas de otras personas, etc. Desde el punto de vista estructural suelen distinguirse, en este grupo, los muros de cierre y las cubiertas.
- 2.º Sostener cargas fijas o móviles. Es decir, pontear o establecer una plataforma que permita el paso de personas, vehículos, etc. Son, de una parte, los pisos de los edificios, y de otra, los puentes, viaductos, pasarelas, etc.
- 3.º Contener empujes horizontales o establecer un paramento, que soporte los empujes de tierras, aguas u otros materiales líquidos, áridos o materias análogas. Son las presas, paredes de depósitos y silos, muros de contención, diques de abrigo, etc.

Aparte de los grupos de construcciones establecidos, existen otros de menos generalidad –como pueden ser tuberías, revestimientos de túneles, mástiles, chimeneas, canales, muros de cerca, etc.–, y que no son fáciles de clasificar rígidamente, ni oportuno el hacerlo ahora.

La finalidad funcional primaria va siempre acompañada de otras, más o menos obligatorias, que determinan infinidad de variaciones, y que dan personalidad propia a cada caso concreto.

Así, por ejemplo, el tablero de un puente carretero ha de presentar superficie lisa y de poca pendiente para permitir el paso de vehículos; si es de peatones, puede ya presentar escalones, aunque no sea lo más conveniente por razones de comodidad. Una vivienda necesita huecos para dar paso a la luz; pero, aun cuando fuese económico con nuevos materiales, puede no convenir que sea continuamente transparente en toda su superficie. Y, así, podrían multiplicarse los ejemplos.

Existen, pues, unas condiciones imprescriptibles, otras puramente accesorias o de conveniencia, y unas intermedias absolutamente necesarias cualitativamente, pero que admiten, en lo cuantitativo, un margen mayor o menor. Por un puente colgante, sin viga de rigidez, podrá ser posible el paso como en un tobogán, pero, nadie



I-1. Acueducto romano, en Segovia. Fotografía: M. García Moya.

admitiría esta solución; sin embargo, una pequeña flecha es bien aceptable. Hasta dónde se acepta la elasticidad del sistema es punto difícil de concretar y está sujeto a opiniones puramente subjetivas.

En todos estos casos hay que llegar a un compromiso con las posibilidades técnicas, económicas y otras que se irán comentando.

Pero, en cualquier caso, debe subrayarse la gran importancia que tiene el fijar, en cada caso, la finalidad y las características de la construcción propuesta, diferenciando en ellas lo esencial, de lo conveniente, y de lo simplemente accesorio.

Por otra parte, toda construcción tiene una función resistente que cumplir. Se emplea aquí la palabra resistente en un sentido lato y poco técnico. Se refiere a todo

el conjunto de condiciones, necesario para asegurar la inmovilidad total y parcial; es decir, el mantenimiento estático de las formas a lo largo del tiempo.

Porque no basta que su resistencia aleje el peligro de rotura. Es necesario también que la construcción sea estable e inmóvil. Una obra puede caerse o volcar sin romperse —que se rompa o no al llegar al suelo es secundario—, puede deslizarse sobre el cimiento, o acomodarse al movimiento de las olas como un barco. Las construcciones que se van a tratar aquí, no deben admitir semejantes movimientos ni resultar deformables como un trampolín. Quizá, en lugar de hablar de una función resistente, sería, pues, mejor hablar, con más generalidad, de una función estática.

La función estática es siempre esencial; porque si una cosa, para cumplir su finalidad, no necesita ser resistente y estable, no se la llama construcción; o no entra en las que aquí interesan.

La construcción ha de mantener sus características esenciales un cierto tiempo mínimo. Estas características son sólo las geométricas o de forma. Se requiere que los materiales, de que está hecha la construcción, se mantengan frente a todo género de agentes exteriores; es decir, que no sean heladizos los que han de sufrir este agente; que soporten los efectos de las variaciones térmicas, del viento, del agua de mar y de sus olas, las marítimas, etc.; que mantengan sus propiedades aislantes térmicas o sonoras; su color, su masa, etc. En definitiva, se requiere mantener sus propiedades, necesarias o interesantes, frente a cualquier agente al que vaya a estar sometida la construcción.

Aun reduciendo el problema estático a lo típicamente resistente, conviene observar que son muchos y muy diversos los tipos de calidad mecánica que se pueden requerir.

Primeramente, los materiales han de ser resistentes, en cuanto resistencia represente su aptitud para soportar las sollicitaciones mecánicas a que han de estar sometidos en cada zona. Para ello, se requiere conocer esos estados de sollicitación. Su deducción, a partir de un conjunto de cargas o fuerzas exteriores, que se toman como dato, y de las características mecánicas (elásticas, plásticas, etc.) del material, constituye la parte más tratada en libros y escuelas técnicas; por eso, en lo relativo a esta cuestión, sólo de los fundamentos o líneas generales se tratará más adelante.

Pero, no debe olvidarse que, alrededor del fenómeno de resistencia tensional interna, se presenten multitud de variantes, cada una de las cuales requiere, del material, una propiedad específica diferente. En unos casos, se requiere resistencia superficial a la abrasión —como en un piso—, porque ha de estar sometido a un cierto tipo de desgaste; en otros, se exige una cierta dureza, etc. Pero conviene dejar, para más adelante, la discriminación del tema, porque es largo y requiere capítulo aparte.

Pasando a otro aspecto: todos saben que la construcción tiene siempre unas condiciones o limitaciones de tipo económico. A igualdad de las demás condiciones, la obra debe ser lo más económica posible.

Ciertamente hay obras suntuarias. La razón humana y social del lujo son difíciles de enjuiciar. Sus excesos son siempre criticables; pero, aquél está en el fondo de la naturaleza humana. El problema, como siempre, está en marcarle sus justos límites, que varían mucho de un caso a otro. Fuera de algunos casos excepcionales y aun en ellos, existen siempre unos límites de carestía que marcan hasta dónde la obra es realizable

o no. Y, en general, puede decirse que, a igualdad de efectos, la condición de mínimo coste es siempre válida y debe atenderse.

La solución, sin embargo, no es casi nunca clara y determinada; tradúcese en aumento o disminución de la seguridad de la obra, de su duración, de las posibilidades que se persiguen, de su mejor apariencia estética, etc. Y si la variable costo es definible numéricamente, las ventajas o inconvenientes que ella implica, en órdenes tan diversos, son, con frecuencia, imposibles de valorar cuantitativamente. Por ello, el enjuiciamiento, necesariamente subjetivo de la cuestión, da lugar frecuentemente a discusiones y opiniones encontradas.

Sin embargo, como en muchos de estos problemas, la lógica e incluso la matemática pueden prestar valiosos recursos al servicio del sentido común y de la equilibrada ponderación que deben regir siempre los juicios humanos.

El costo depende, a su vez, de multitud de variables, tales como: el precio de los materiales, el valor de los jornales y el rendimiento de la mano de obra, el de los gastos generales y de todo orden que pesan sobre el conjunto, así como del proceso constructivo que se elija, dentro de los que el avance de la técnica permita en cada caso.

Y aun en el ámbito económico hay que considerar también los gastos de conservación, que pueden resultar diferentes de un material a otro, e incluso de uno a otro tipo estructural, de unas a otras dimensiones. Por otra parte, el costo ha de mirarse en relación con los beneficios, directos o indirectos, mensurables o imponderables, que se esperan de la construcción.

Se acostumbra a hacer los presupuestos de cada construcción concreta, dentro del estrecho marco de condiciones locales establecidas en el momento; pero, el técnico, consciente de su misión en el seno de la sociedad que le rodea, debe pensar también que conviene, de cuando en cuando, enfocar el problema desde más lejos, con caracteres de generalidad, y meditar sobre las enormes consecuencias sociales y económicas que traen consigo estos problemas. El que la técnica esté más o menos avanzada, mejor o peor organizada en su conjunto gremial y adaptada a las características propias del país, puede dar lugar a que, en el conjunto de la economía nacional y del bienestar social, se produzcan mejoras notables o terribles pérdidas que pueden representar fácilmente cientos de millones.

La importancia que se ha dado a este tema en los últimos lustros en el mundo entero, las organizaciones que se han montado en todos los países, para facilitar y empujar el progreso de la técnica con vistas a una mayor eficacia y un menor costo de las construcciones, son temas del mayor interés; pero quedan bastante al margen del que se quiere tratar aquí.

Conviene, pues, solamente recordar –para no volver sobre ello–, que en la economía total de un tipo de construcción o de un elemento, pueden influir factores tan variados como: el clima, la superficie y densidad de población nacional, la facilidad de sus transportes, la industrialización del país, la capacitación del personal obrero, el volumen de elementos análogos en otras obras simultáneas o que se han de realizar en un futuro próximo, etc.

Unido o en pugna con la condición económica, se presenta el plazo de construcción. Toda obra, en una región y una época determinadas, tiene una marcha

de ejecución que es la más económica o de menor costo directo. Pero, hay que tener en cuenta otras razones que pueden hacer conveniente alterar esta marcha, incluso por razones económicas, cuando el problema se enfoca en su conjunto; y, como consecuencia de ello, puede incluso cambiar el tipo estructural que convenga elegir.

Falta de dinerario a corto plazo o razones presupuestarias, con el consiguiente establecimiento de consignaciones anuales fijas, puede obligar a una marcha más lenta para evitar el encarecimiento que representa un adelanto de dinero a préstamo. Por el contrario, los intereses intercalarios de los capitales sucesivamente inmovilizados durante la construcción y, aún más, el quebranto que representa retrasar los beneficios que la construcción haya de producir una vez terminada, pueden justificar aumentos importantes del costo directo de la misma a favor de una mayor rapidez.

La marcha más económica de la obra y el propio tipo de la misma deberán, pues, estudiarse, teniendo en cuenta todo esto y haciendo el estudio financiero completo. Es un problema de costo y de productividad del dinero sucesivamente empleado en la obra.

Otro aspecto más encajado en el tema de esta obra es el aspecto estético de la construcción.

Hay monumentos en los que esta cuestión puede decirse que constituye o envuelve totalmente la finalidad primaria; en otras, de tipo industrial o de misión puramente sustentante y sin posibilidad de vista, el factor estético es despreciable y puede llegar a desaparecer totalmente.

Hasta qué punto hayan de sacrificarse a ese factor estético los factores económicos será, pues, cuestión de consideración diferente en cada caso; pero siempre ha de valorarse su influencia, aun cuando sólo fuese para justificar su abandono.

La condición estética debe incluirse siempre, como una de tantas condiciones esenciales o accesorias de la finalidad que se busca. Convendrá comentarla por separado, porque tiene su modalidad propia y sus relaciones específicas con la función estática del conjunto; y porque, por otra parte, en la mayoría de las construcciones, sus exigencias no son tan concretas como el resto de las que se consideran en el grupo de finalidad; al separarlas, se puede, en este último grupo, incluir solamente las de finalidad utilitaria, o funcionales, que provocan la construcción; mientras que la estética se encuentra más abstractamente unida al conjunto y más especialmente –al menos hasta hoy– a las partes visibles de la construcción. Hasta dónde las exigencias estéticas son de orden visual y hasta dónde de orden intelectual, en cuanto se requiere que la apariencia externa arrastre a la comprensión de los fenómenos funcionales y estructurales internos, es punto difícil de definir y que requiere meditación especial. Sobre todo ello habrá de hablarse más adelante.

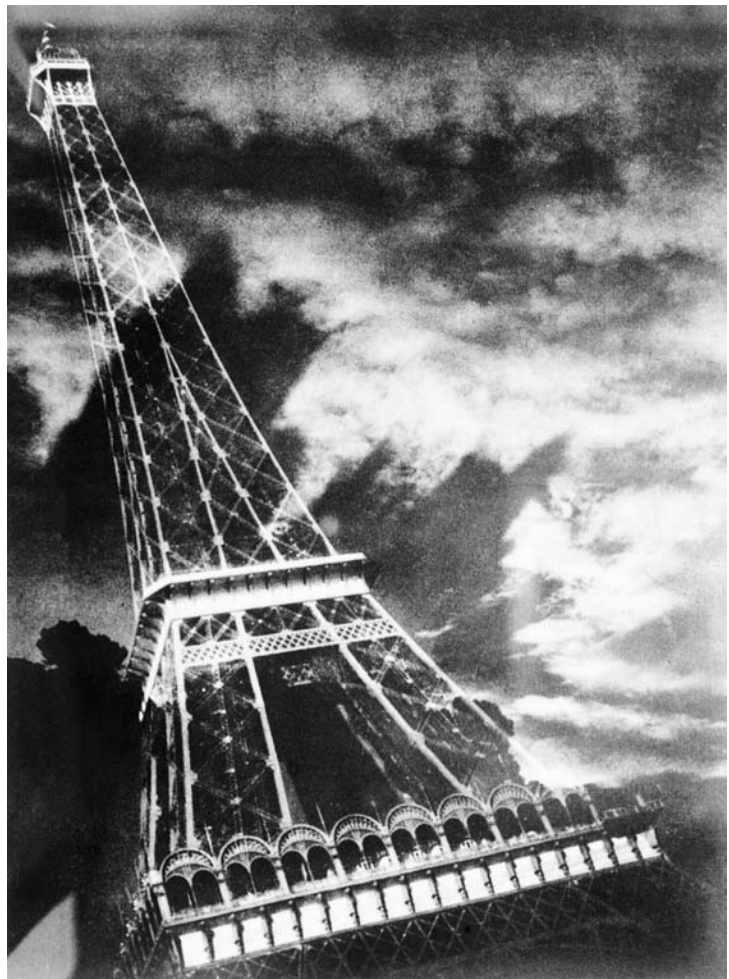
De todo este conjunto de consideraciones y factores, tan heterogéneos, ha de salir el planteamiento del problema que trata de resolver el proyectista; pero no son ellos, ni con mucho, los únicos que ha de considerar.

Hay que tener en cuenta que, para resolver el problema, el constructor cuenta con unos materiales determinados y con unas técnicas de construcción o procesos constructivos de los que es difícil salirse en un momento determinado.

Cada material posee un conjunto de características propias que lo hacen más o menos apto para un tipo de construcción o parte de ella, para uno u otro proceso constructivo, para una forma de sollicitación mecánica, etc.

Las características propias de cada material influyen, pues, en el tipo estructural que se ha de elegir. La piedra es apta para resistir la compresión y no lo es para la tracción. Por su masa y peso, puede ser buena para aquellos tipos estructurales que se estabilizan por el peso propio, y mala para otros tipos de sollicitación. El proceso constructivo es también diferente de un material a otro; y su aspecto, su resistencia a los efectos de la intemperie, como tantas otras cosas, varían enormemente con la clase de materiales que se empleen. Unos pueden resultar económicos en una región y caros en otra. La cantidad de variables y condiciones que influyen es inmensa.

Por último, no debe echarse en olvido la técnica o proceso constructivo que se pretende seguir. Este depende, naturalmente, de los materiales que se utilicen; y en su elección, habrán de tenerse en cuenta las otras condiciones ya mencionadas: existencia y



I-2. De la «Tour Eiffel».
Fotografía: Boucher Adep.

economía de la mano de obra apta para él, o de la maquinaria auxiliar correspondiente; plazo que obligue a adoptar el sistema más rápido o, por el contrario, el más económico; número de repeticiones de elementos iguales que permita la amortización de determinadas instalaciones, etc.

En resumen: cada construcción tiene su finalidad y sus características propias; tiene, en consecuencia, unas condiciones resistentes que cumplir; tiene unas exigencias económicas y de plazo de construcción; y, en general, tiene, también, una interpretación estética más o menos exigente. Para realizar dicha obra se dispone de unos materiales con características propias y de unas técnicas para manejarlos y realizar la obra.

En el concepto de finalidad, hay siempre unas condiciones esenciales, que pueden ser de órdenes muy diversos; hay otras que, aun cuando imprescriptibles en su esencia, no son determinadas cuantitativamente; y se presentan, en fin, otras accesorias de pura conveniencia, de las que, en último extremo, se podría prescindir, si fuese necesario sacrificarlas en aras de otras cosas; o, por lo menos, reducirlas a un mínimo en sus exigencias.

La función resistente o estática es esencial, por cuanto, de no serlo, la obra se saldría del tema que aquí se trata; pero, no es nunca la razón única y primordial de la construcción. Sin embargo, interesa destacarla, por cuanto es aquella —o lo que ella impone en relación íntima con las demás condiciones—, el tema que se ha de analizar y que podría definirse así: «De cómo elegir el tipo estructural que, dentro de las condiciones que le impone su finalidad, resulte más adecuado y económico para construirlo con los materiales y las técnicas de que se dispone». Aclarando que, al decir tipo estructural, se hace referencia al conjunto de elementos resistentes capaz de mantener sus formas y cualidades a lo largo del tiempo, bajo la acción de las cargas y agentes exteriores a que ha de estar sometido; es decir, a la parte de la construcción que garantiza la función estática antes citada y que, a falta de otra palabra mejor, se le llama «estructura».

Se da aquí, a esta palabra un sentido más lato del corriente, que la refiere solamente al conjunto de piezas prismáticas o asimilables a ellas, al que se aplica normalmente la teoría de la Resistencia de Materiales —lo que antiguamente se llamaba la *palazón*—. Aquí se llama, ahora, estructura, igualmente a eso que a un muro macizo o a una presa de gravedad; y para distinguir mejor, podría reservarse el nombre de «entramado» para el primer grupo de estructuras.

En las construcciones de la antigüedad, no era tan frecuente el separar la parte estructural, o sustentante de la construcción, del resto de los elementos de relleno. Hoy, esta distinción total es corriente; y, por ello, hay motivo para ocuparse de la estructura en sí y en sus relaciones con el resto de sus elementos. Cuando todos ellos se funden en uno solo, como sucede, por ejemplo, en la presa, el problema sigue interesando igualmente desde estos puntos de vista.

Los fenómenos estático-resistentes requerirán, por tanto, atención especial; pero, sin olvidar el resto de las condiciones que entran en el problema conjunto de la construcción. Porque, precisamente el menospreciar el resto, el pensar sólo en la estructura, es un defecto corriente del técnico; del mismo modo que lo es, frecuentemente, por parte del artista, el menospreciar la estructura al idear la traza general y los detalles del conjunto. Las exigencias económicas y estéticas han de estar siempre presentes

en el ánimo del proyectista, aun si sólo se trata de crear la forma estructural, porque ella sola, sin integrarse en el conjunto de la construcción, no tendría razón de ser.

En definitiva, el problema ha de plantearse con estas cuatro premisas o conjunto de ellas: finalidad utilitaria; función estructural o estática; exigencia estética, y limitación económica.

Para resolverlo, se dispone –como se dijo– de unos materiales y de unas técnicas. Sólo mediante un profundo conocimiento de las características mecánicas, y de otros órdenes, de los materiales, de las técnicas que cada uno requiere y de los medios de que se dispone para manejarlos, se puede atinar en la elección conveniente, tanto de los materiales como de los procesos de ejecución, y encontrar el tipo estructural óptimo con sus formas resistentes ajustadas a todas las exigencias.

El resultado debe comprender estas cuatro cosas: el material, el tipo estructural, sus formas y dimensiones, y el proceso de ejecución en relación con los elementos auxiliares que requiera. Las cuatro cosas van unidas y se influyen mutuamente; sólo una atinada elección de las cuatro puede dar la solución óptima; ninguna puede considerarse independiente de las otras; ninguna puede olvidarse.

Según que el material sea la piedra o sea el acero, variará esencialmente el tipo estructural, el proceso de ejecución, las dimensiones y los medios auxiliares por utilizar. La carencia de determinados medios auxiliares o su elevado coste puede hacer prohibitivo el empleo de ciertos materiales o de tal sistema de construcción; y no es necesario insistir en que lo mismo sucede con cualquiera de los otros puntos.

La variedad de condiciones, más o menos imperativas, que aparecen entre todos estos elementos, hace el problema más difícil de solución. Esquematiéndolo en forma matemática podría decirse que se tienen las siguientes:

Ecuaciones	Incógnitas
Finalidad utilitaria	Material
Estatismo (Función estática)	Tipo estructural
Cualidades estéticas	Forma y dimensiones resistentes
Condiciones económicas	Proceso de ejecución

A estas ecuaciones han de añadirse las que podrían llamarse de compatibilidad, que establecen las mutuas exigencias e influencias de unas incógnitas en otras. Todas ellas hacen el sistema incompatible, en el sentido de que no es posible satisfacerlas todas plenamente o en todo el grado que se quiera; y es necesario conformarse con resolver el problema aproximadamente, limitando, al mínimo, los inconvenientes, y sacrificando, en parte, condiciones menos importantes. Solamente puede pretenderse que el sistema cierre con el mínimo error.

Los recursos del cálculo sólo sirven para afinar las dimensiones o para comprobar si están suficientemente afinadas. Todo lo demás no se puede obtener por métodos deductivos. Unos tanteos pueden servir, cuando más, para resolver el problema económico, determinando cuál de dos soluciones preestablecidas es la más barata; el resto queda, en gran parte, dentro del campo de lo subjetivo y opinable, siempre sujeto a críticas y enjuiciamientos diversos.

Por eso, el proyectar, aun cuando sólo sean estructuras, si bien tiene mucho de ciencia y de técnica, tiene mucho más de arte, de sentido común, de afición, de aptitud, de delectación en el oficio de imaginar la traza oportuna, a la que el cálculo sólo añadirá los últimos toques con el espaldarazo de su garantía estático-resistente.

Esta rápida visión del conjunto de temas y facetas, que entran en el problema, ha de servir de guía para ir esbozando, una a una, las cuestiones que influyen en él. Aun cuando se trate de diferenciarlas para poder analizar el problema, todas ellas están tan ligadas entre sí, que, continuamente, al tratar de una, habrá que referirse a otras; y solamente, al integrarlas después, podrá lograrse alguna garantía de acierto en su enjuiciamiento.

No se pretende aquí –y aun así es mucha la osadía– más que dar ideas y conocimientos generales; porque la variedad de casos es tal, que fuera locura intentar descender al detalle. Nada de lo dicho ni de lo que sigue es nuevo; no es más que un conjunto de perogrulladas. Pero, aun así, puede ser interesante el revisarlas y agruparlas en unas páginas; por cuanto, es siempre del mayor interés el meditar sobre ellas y el grabarlas más y más en el espíritu –de técnicos de la construcción–, para poder, con más facilidad, seguir las buenas normas que, constituyendo un hábito o segunda naturaleza, han de conducir con naturalidad y acierto por el arriesgado y alucinante camino de la creación.

La heterogeneidad de los factores comentados es tan fuerte que necesariamente ha de acusarse de unos capítulos a otros. Temas tan diferentes, como el tensional y el estético, requieren forzosamente, no sólo un tratamiento diferente, sino inclusive un estilo de exposición totalmente distinto, que ha de chocar al lector cuando pase de un capítulo a otro. No se ha querido tratar de disimularlo ni uniformarlo, porque es precisamente esa diversidad y hasta antinomia de los distintos factores, cualidades, conceptos, ideas y sentimientos la que ha de llevar el proyectista integrada dentro de sí en el propio carácter e idiosincrasia de la persona. La perfección del proyecto no puede ser la simple consecuencia de lo aprendido en los libros, sino la natural derivación de una personalidad bien equilibrada en toda su complejidad; y en el fondo, como siempre, lo que interesa fundamentalmente es la formación de esa personalidad.

Y todavía una advertencia: lo que importa no son las opiniones que dé el autor, quien no pretende imponérselas a nadie; no importa estar o no de acuerdo con muchas de las que exponga. Lo que pretende es tan sólo llamar la atención sobre ellas, porque lo esencial es meditar, una y otra vez, sobre las diversas cuestiones planteadas, hasta formar un criterio propio y consciente sobre la valoración relativa de los diferentes temas y su eficaz forma de integración en el proceso creador de la obra.

El fenómeno tensional

Vano sería el empeño de quien pretendiese dar con la atinada traza de una estructura, sin haber asimilado, hasta la médula de sus huesos, los principios tensionales que rigen todos sus fenómenos resistentes; tan vano como el de un médico que se pusiese a recetar y ordenar el tratamiento de sus enfermos, sin conocer la fisiología del organismo humano.

No basta haber estudiado las teorías resistentes y los procesos de desarrollo de sus cálculos; es necesario haber meditado y experimentado sobre todo ello hasta lograr sentir como algo propio, natural y congénito, sus fenómenos de tensión y de deformación, para intuir de golpe cómo va a trabajar la estructura y cuál sería su forma de rotura, para que aparezca a sus ojos todo eso con la misma claridad y convicción con que prevé la caída de una piedra en el espacio o el impulso ineluctable que empuja la flecha al salir del arco de la ballesta.

No es, ni con mucho, el complejo y abstruso desarrollo matemático el que puede inducir al espíritu a imaginar la estructura, ni guiar la mano al trazarla, sino el íntimo sentimiento de sus formas de trabajo, hecho tan propio que llegue a parecer que es la propia persona la que trabaja con aquélla y con cada uno de sus elementos como algo vivo y sensitivo. Como dirían lo alemanes, se necesita llegar a un verdadero «Einfühlung» del proceso resistente, sentido a través de lo deformatario que siempre va esencialmente unido a todo lo tensional.

Dicho en lenguaje más conciso y académico: la heurística de la estructura requiere el conocimiento intuitivo de su etopeya resistente y la de los materiales que la constituyen.

Si mucho antes de conocer la técnica actual, la humanidad ha sido capaz de idear y construir obras tan adaptadas a sus necesidades estático-resistentes, y tan eternamente satisfactorias en sus formas estéticas, ha sido precisamente porque había sabido contemplar antes, con íntima delectación, las ramas de los árboles concurvados bajo el peso de sus frutos, y tensas las cuerdas de los columpios que mecieron su juventud, desde los viejos tiempos de las tanagras micénicas cuando menos.

Por eso, no estará de más dedicar unas páginas al tema. Aun cuando no se diga nada nuevo, siempre un simple comentario permite apreciar un diferente sesgo de la cuestión; y sólo a fuerza de pensar y experimentar, se va instilando en el espíritu el poso que ha de guiarlo después, desde sus reductos subconscientes.

II-1. Figurilla prehistórica cretense. Fotografía: (Museo de Candía). De «Summa Artis», J. Pijoán. Espasa Calpe, S. A.



Tres conceptos diferentes, aunque ligados entre sí, han de considerarse en toda la estructura, así como en cada uno de los elementos que, enlazados entre sí, forman aquélla: el equilibrio, la resistencia y la estabilidad.

El más fácil de intuir es el equilibrio; equilibrio que ha de ser estático, es decir, que ha de asegurar la inmovilidad de la estructura en conjunto, y de cada una de sus partes por separado, respecto al cimiento que la sustenta. Estos equilibrios requieren que la composición del conjunto, la forma de sus elementos y sus modos de enlace, sean tales que automáticamente se produzcan unas fuerzas pasivas o reacciones de los apoyos, capaces de equilibrar las otras fuerzas causales o libres (sobrecargas, pesos, etc.), que van a actuar sobre la estructura con valor causal del fenómeno, y entre las que están incluidas las del peso propio de la misma o acción de la gravedad sobre su masa.

Salvo casos excepcionales, es fácil comprender, de un solo golpe de vista, si el sistema de apoyo y de enlaces satisface cualitativamente las exigencias de este equilibrio y hacen la estructura estáticamente completa. Mejor que entrar en explicaciones es observar la fig. II. 2 para comprender lo fácil que suele ser el saber si, con un determinado sistema de enlaces, los elementos de la estructura pueden o no asegurar la fijeza, o equilibrio estático, de dichos elementos, bajo la acción de las fuerzas a que van a estar sometidos.

Que sean o no, suficientemente resistentes para soportar estas acciones pueden ser, ya, una cuestión de cálculo. Pero, antes de entrar en él interesa asegurarse de que la disposición estructural elegida no va a permitir el libre movimiento de los elementos que se conjugan.

No hay que olvidar, por ejemplo, que ciertos enlaces no son reactivos más que en un sentido, y no en el contrario; y pueden dar lugar a que, bajo la acción de ciertas cargas, la estructura funcione como si dicho apoyo no existiese.

Análogamente, en un macizo, que presenta juntas no resistentes prácticamente a tracción, o en el plano de asiento del macizo sobre el terreno, habrán de disponerse las cosas de modo que la resultante de todas las cargas caiga dentro de la superficie de apoyo, en sentido tal que provoque una compresión; y, ésta con suficiente inclinación, en relación con el coeficiente de rozamiento entre el macizo y el terreno, para evitar toda posibilidad de deslizamiento.

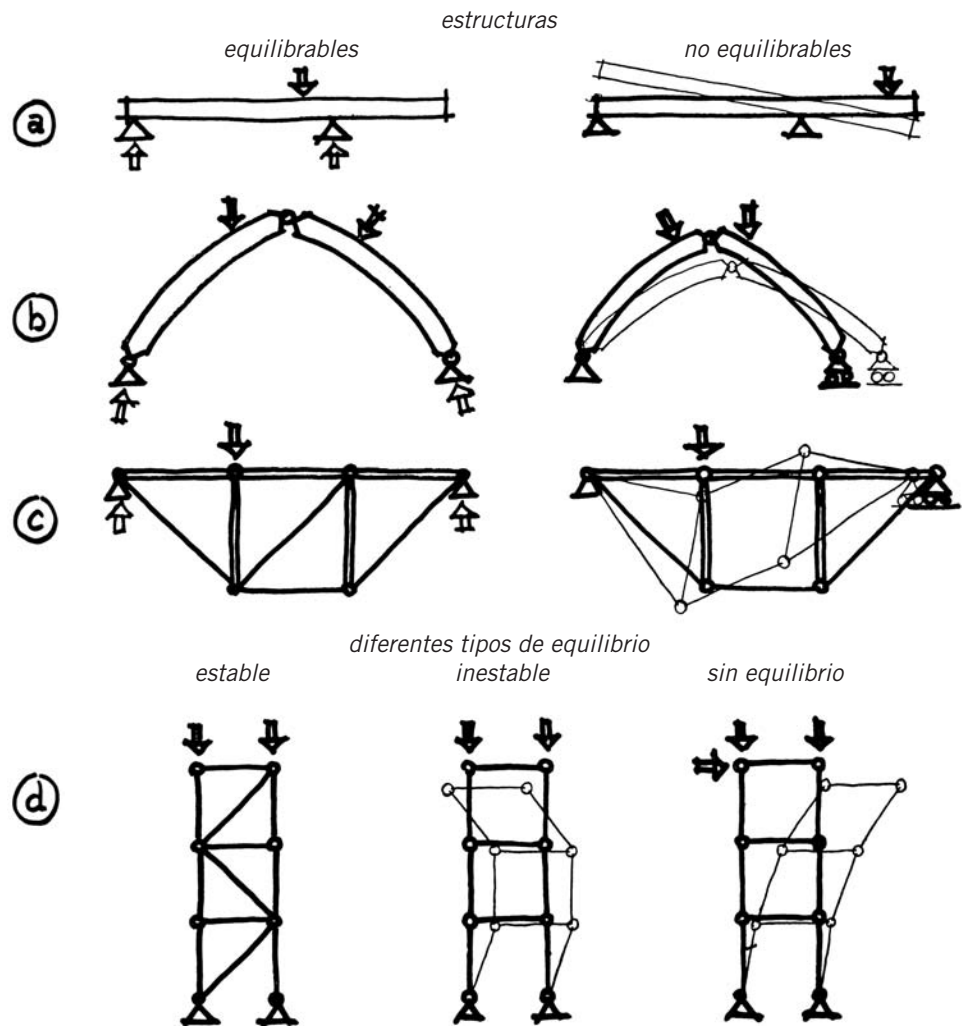
No basta que esto se cumpla para el conjunto de la estructura, sino que se ha de cumplir igualmente para cualquier parte o elemento de la misma, de acuerdo con los enlaces correspondientes. Las dunas tienen formas completamente estables, difíciles de ser arrastradas en su conjunto; pero basta una ligera brisa para irse llevando, uno a uno, los granos de arena de una ladera a otra y producir el mismo efecto de trasladarla lentamente como si fuese deslizándose sobre el terreno.

El equilibrio, además de ser estático —quizá pudiera decirse, para ser estático—, ha de ser estable; no puede ser indiferente, ni menos inestable. La estructura representada en la figura II. 2d está equilibrada mientras no se la empuje horizontalmente; pero, bastaría la más mínima acción, en esta dirección, para que se viniera abajo.

Todos estos conceptos son clara y fácilmente intuibles. Es difícil, pues, que el técnico se equivoque con ellos, porque todos han experimentado, en una u otra forma, esos fenómenos.

Se trata de equilibrios o fuerzas causales o libres contra fuerzas reactivas de apoyo o enlaces; y, por consiguiente, son independientes de la escala. Un modelo reducido funciona, a estos efectos, igual que la propia estructura. Su experimentación es fácil; y la experimentación es la mejor guía educadora de la propia intuición en estas cuestiones como en tantas otras.

Un modelo reducido puede servir para enjuiciar fácilmente si ha de alcanzarse o no el equilibrio con unas proporciones determinadas, independientemente del tamaño del modelo en relación el de la obra real, cuando se trata de fuerzas de igual tipo, que variarían homotéticamente con la escala; p. ej., en el caso de una bóveda cuyos pesos propios han de equilibrarse con los del contrafuerte en que apoya, o en el de una presa de gravedad en el que los empujes volcadores del agua y los estabilizantes del peso propio son todas fuerzas ponderales. En estos casos, si se sostiene el modelo, hecho con materiales de iguales pesos específicos que los de la propia construcción, la construcción se sostendrá también.



II-2. Diferentes tipos de enlaces y de equilibrio.

No sucede lo mismo cuando se trata de empujes de viento contra pesos estabilizantes, porque las resultantes del viento aumentan proporcionalmente el área en que actúan, o sea, el cuadrado de la longitud, mientras que los pesos aumentan con el cubo de ésta. En este caso, si el modelo se sostiene, la obra se sostendrá también; pero que el modelo vuelque no quiere decir que la obra haya de hacerlo. Para hacer semejantes las condiciones habría que someter el modelo a una presión, de viento o equivalente, multiplicada por la relación de escalas longitudinales.

Independientemente de estas condiciones primarias de estabilidad que, a poca práctica de la profesión que se tenga, se enjuician rápidamente, hay que considerar también los problemas de resistencia. El material ha de ser capaz, en todos y cada uno de los volúmenes elementales de la estructura, de soportar las fuerzas internas a que se le somete como resultado del estado de carga general y de las acciones locales de cada fuerza exterior.

El técnico, con sus estructuras corrientes de piezas lineales, se acostumbra demasiado a considerar únicamente las formas de sollicitación y de resistencia a tracción, a compresión o a esfuerzo cortante que pueden y suelen considerarse por separado, a los efectos de la rotura en las barras, soportes, vigas, arcos, etc.

Es, pues, conveniente llamar la atención sobre el hecho de que éstos no son más que casos particulares del general de tensión tridimensional, representable por sus tres tensiones principales ortogonales entre sí. Como esta obra no es un libro de texto ni de enseñanza, no se puede tratar aquí de deducir las complejas leyes que rigen los estados tensionales que el técnico debe conocer. Pero, aun sabidos para él, no estará de más recordar que las fuerzas exteriores, incluidas las reacciones, necesitan transmitir y equilibrarse a través del sólido, creando, en cada elemento diferencial del mismo, un estado de tensión. Sobre cada plano que se imagine por ese punto actúa una fuerza que, en general, varía de intensidad y de oblicuidad al variar la orientación del plano.

Pero siempre hay tres orientaciones perpendiculares entre sí, sobre las cuales las fuerzas que actúan son normales al plano. Es decir: siempre se puede imaginar en el entorno de cada punto, un cubo elemental orientado de forma que sobre sus caras actúen fuerzas normales solamente. De los valores de esas tensiones depende que el cuerpo pueda resistir, o no, ese estado de tensión. Las envolventes de estas direcciones forman, en general, la red de las llamadas líneas isostáticas que permiten una buena representación del fenómeno tensional; y esta representación puede hacerse algo más intuitiva imaginando que, a lo largo de cualquiera de esas líneas, el sólido se acorta o se alarga proporcionalmente a la tensión (tracción o compresión por unidad de superficie) correspondiente. Ciertamente la influencia del coeficiente de Poisson hace que esta deformación dependa también de las otras dos tensiones principales; pero, ello no tiene demasiada importancia para un primer enjuiciamiento aproximado, ni es tampoco difícil de tener en cuenta.

Restringiéndose al problema plano, para verlo mejor (fig. II. 3a), resulta que el dintorno tensional se puede imaginar como una malla, según esta red ortogonal de isostáticas, formada de bielas articuladas entre sí (b); las cuales se deformarían alargándose o acortándose, según el esfuerzo que a cada una corresponda; pero sin variar los ángulos con que se cruzan. En cada nudo del interior se puede imaginar aplicado el

peso de la parte correspondiente del sólido, y en los de la superficie las fuerzas que actúen sobre ella. Las bielas soportan y transmiten así las fuerzas exteriores hasta los apoyos. Claro es que el equilibrio de esta malla resultaría inestable o incompleto, en general, necesitando las diagonales para evitarlo; pero, en el sólido, vienen sustituidas por la continuidad del material.

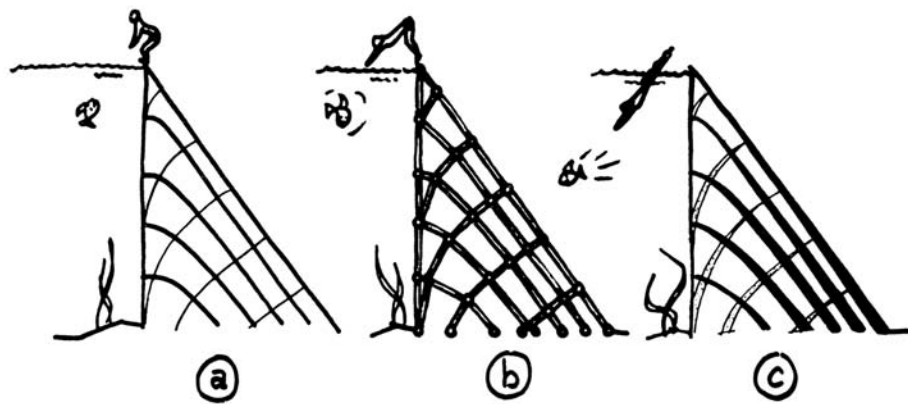
Si, sobre estas líneas isostáticas, se representan, con segmentos de diferente longitud o diferente espesor (fig. II. 3c), los valores de las tensiones principales correspondientes, se tendrá una representación muy clara e instructiva del fenómeno de que se trate.

Cada volumen elemental de sólido, con sus caras orientadas según la red, puede considerarse equilibrado por las cuatro fuerzas (por unidad de superficie) que representan, por su espesor respectivo, las cuatro semirramas de la red de isostáticas que acometen normalmente a las caras del cubo.

Es el «plexo tensional», que por sus direcciones y espesores, muestra cómo las fuerzas se transmiten por el interior del sólido, cómo van variando de dirección y de intensidad, cómo se refuerzan en ciertas zonas que, por ello, se hacen más peligrosas; y cómo, en fin, se esfuminan y pierden virulencia al propagarse por el macizo indefinido del terreno de cimentación.

La observación de esta malla enseña muchas cosas. Ella muestra, por ejemplo, que si las fibras, que siguen un borde cóncavo, están en tracción, han de presentarse necesariamente otras tracciones normales para evitar que aquellas fibras se despeguen del resto del sólido; y, por el contrario, si están en compresión, se han de comprimir transversalmente; cuanto más cerrada sea la curvatura de una familia de isostáticas tanto mayor ha de ser la variación de las tensiones transversales a lo largo de las otras, y, en fin, el adiestramiento en el estudio, interpretación y manejo del plexo tensional es el mejor camino para un rápido enjuiciamiento cualitativo del estado de tensión que ha de producirse dentro de un determinado contorno de sólido, bajo la acción de las cargas y reacciones que haya de soportar.

La continuidad del medio y de sus deformaciones y la necesaria ortogonalidad de la malla pueden, en muchos casos, facilitar el trazado aproximado de la solución previsible; y conducir, por él, a la corrección de las formas del contorno en busca de la solución óptima de la estructura resistente.



II-3. Plexo tensional en una presa de gravedad.

No es éste lugar apropiado para extenderse en comentarios detallados y ejemplos de dintornos tensionales: y, por ello, basta señalar el interés práctico y didáctico que ofrece, y al que no se suele dar en textos y enseñanzas toda la importancia que tiene.

El imaginar la estructura deformándose, bajo la acción de las cargas a que se la somete, es indudablemente la mejor ayuda que se puede tener al tratar de imaginar, no sólo el estado de tensión del sólido, sino también el lugar y la forma en que el material puede fallar. Del mismo modo que la experiencia diaria habitúa a ver las mal llamadas piezas prismáticas deformarse y romperse por tracción o flexión, se puede alcanzar ese mismo hábito y esa intuición en otros casos más complejos; e incluso, comprender mejor cómo trabaja y cómo falla el material en aquellos casos sencillos. Para ello, conviene siempre analizar la figura deformada y estudiar las líneas de deslizamiento a 45° con aquellas isostáticas y, en definitiva, *los plexos deformatorio y tensional*. Todo el tiempo que se dedica a discurrir sobre ellos es siempre una fuente fecunda de inagotables enseñanzas.

Un buen maestro recomendaba a sus discípulos, cuando empezaban a estudiar estas cuestiones tensionales, que llevasen siempre en el bolsillo una goma de borrar, con una retícula y unas circunferencias trazadas en sus caras, para observar sus deformaciones. Así se ve cómo las circunferencias se convierten en elipses (fig. II. 4a) y cómo las direcciones inicialmente perpendiculares, varían de ángulo entre sí, excepto cuando las direcciones de la retícula coinciden con las tensiones principales.

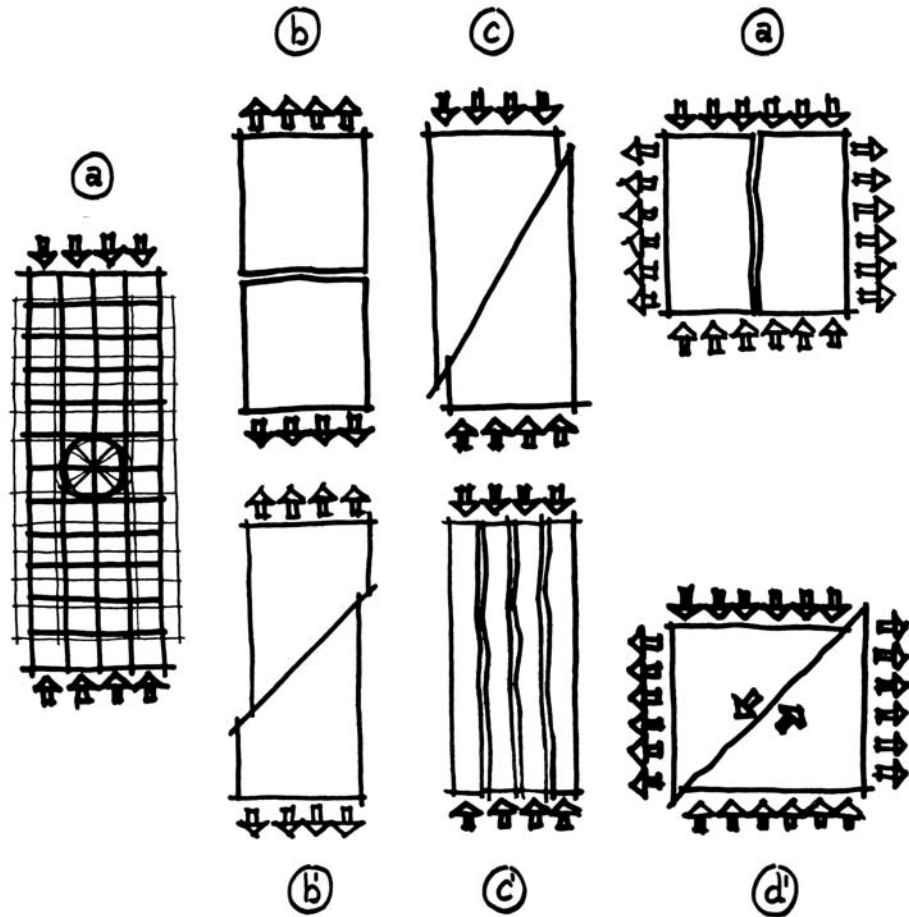
La experiencia se aclara todavía más cuando se complementa con la observación de otra barra análoga de material plástico, como la cera o la arcilla de alfarero. En ésta se ve bien claramente que el material puede romper por separación perpendicularmente a la dirección de la máxima tracción (fig. II. 4b), o fallar por deslizamientos sucesivos (b') según planos a 45° con ella, en los que la proyección del esfuerzo da lugar a una tensión tangencial máxima, provocadora del deslizamiento. Parecidos deslizamientos se observan al someter la probeta a compresión; si bien entonces la inclinación de los planos de deslizamiento y rotura puede variar (c) por efecto del rozamiento interno; y aun en ciertos materiales puede aparecer la rotura, según planos paralelos a la compresión (c'), por la dilatación correspondiente al efecto Poisson.

Bajo un esfuerzo cortante puro, el material, según sus características intrínsecas, romperá por deslizamiento según estas orientaciones de la tensión cortante (d'), o por separación a 45° con ellas (d); porque este tipo de esfuerzo —como es sabido— no es otra cosa que el efecto de dos tensiones principales iguales y de opuesto signo (tracción una y compresión la otra), que dan lugar a una tensión cortante de igual valor según los planos bisectores de aquéllas.

Interesa también, en relación con la resistencia, llevar al ánimo del proyectista —y en particular al ocuparse de los detalles de una estructura, tipos de enlaces, etc.—, que la rotura no depende sólo de la mayor tensión principal a que se somete al material, sino también de las otras dos, normales a ella, y que no siempre son despreciables.

En efecto: las diferentes curvas de resistencia intrínseca de los diversos materiales de construcción demuestran la importancia, en la resistencia y en el tipo de rotura, tanto del valor y del signo de la tensión principal máxima como de la diferencia entre la máxima y la mínima.

II-4. Deformaciones y roturas de tracción, compresión y cortante.



Si es cierto que unos materiales son frágiles y otros dúctiles, no lo es menos que la mayoría de éstos, si no todos, acaban por romper frágil y bruscamente si se les somete a una equitracción en todas direcciones; y, por el contrario, se ductilizan y acaban por aceptar deslizamientos importantes, sin romperse, bajo elevadísimas compresiones triples.

Sobre este tema puede ser muy aleccionador considerar lo que les ocurre a los líquidos y a los áridos que, en cierto modo, marcan comportamientos opuestos.

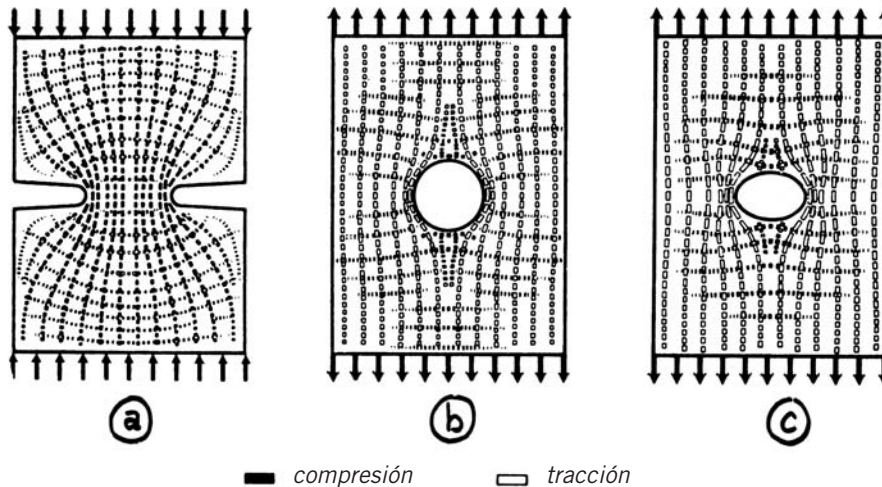
Parece, a primera vista, que los líquidos no tienen resistencia a tracción; pero esto es falso. A lo que un líquido no opone prácticamente resistencia es al deslizamiento, es decir, a la tensión cortante; o sea, a una diferencia de tensiones principales. El líquido es como un sólido extremadamente dúctil. Cuando se ha logrado someter el agua desaireada a una tracción centrífuga perfectamente isótropa –lo que no es fácil–, se ha visto que resiste tensiones hasta de 900 kg/cm^2 . Si bien se mira, se ve que tampoco los líquidos son capaces de soportar compresiones simples; si se les comprime con un émbolo, que no ajuste en el vaso, el líquido se sale; y si el émbolo ajusta, son las paredes del cilindro las que reaccionan produciendo compresiones laterales de igual intensidad en todas direcciones.

Si en vez de agua se llena el vaso de arena, el émbolo, sin ajustar, encuentra una cierta resistencia porque el rozamiento interno de la arena equivale a una resistencia al deslizamiento; y si es un sólido con cohesión, la diferencia de tensiones principales puede ser tanto mayor cuanto mayor es esta cohesión.

Hay, pues, que pensar que la resistencia no es una simple magnitud, expresable por sólo un número. El síndrome del fallo resistente es muy complejo y con facetas tan interesantes como los propios valores tensionales que le producen. El que la posible rotura se prevea frágil o dúctil es importante a todos los efectos y, en especial, a los del coeficiente de seguridad y a las precauciones que deban tomarse; pues, la rotura dúctil, con grandes deformaciones previas, permite, en la generalidad de los casos, reajustes de tensión que descargan la zona peligrosa, cuando es relativamente pequeña; y en todo caso advierte del peligro a tiempo de evitar el desastre; mientras que la rotura frágil por decohesión no presenta pródromo alguno que advierta la proximidad de la catástrofe.

La consideración de estas particularidades del desfallecimiento resistente propio de cada material, unida a la del proceso tensional que ha de producirse, explica muchos fenómenos cuyo conocimiento y oportuna utilización son del mayor interés para la buena formación de una estructura. Se comprende, por ejemplo, que unas entalladuras como las indicadas en la figura II. 5a, introducidas en una pieza en compresión, pueden permitirle funcionar como una rótula bajo carga de compresión suficientemente fuerte y ángulos de giro pequeños; porque la incurvación, que sufre la red de isostáticas, hace que, en la zona del cuello, se produzca un estado de compresión triple que plastifica el material aumentando su resistencia y permitiendo deformaciones y giros que, de otro modo, no admitiría sin rotura. Justamente lo contrario sucede si la pieza estuviese sometida a tracción.

Análogamente, basta la presencia de un pequeño agujero circular (fig. II. 5b) en una chapa sometida a tracción, para que el valor de la tensión se triplique junto a la superficie del taladro, y para que, en dirección perpendicular a esta tracción, aparezcan compresiones. Si en lugar de un agujero circular se hace uno elíptico c) con el eje



II-5. Plexo tensional de rótulas y entalladuras.

mayor perpendicular a la dirección de la tracción o se hace una entalladura, la sobre-elevación de la tensión es tanto mayor cuanto más apuntada es la elipse, y llega teóricamente a infinito cuando la entalladura se convierte en una fisura. Los ángulos entrantes en tracción son, por eso mismo, los más propicios a iniciar grietas y roturas bruscas.

Si, en estos casos, el material no se rompe al menor esfuerzo, es porque esa sobre-tensión se concentra en los bordes de la entalladura y en un ancho pequeño respecto al de ésta; y en esas pequeñas zonas en las que la diferencia de tensiones principales es grande, el material acepta deformaciones plásticas, que pueden tomar valores mucho más grandes que las elásticas sin incremento de la tensión. Estas deformaciones plásticas son siempre deslizamientos dúctiles que se aprecian bien en cuerpos muy plásticos como, por ejemplo, las arcillas de alfarero antes citadas.

Todos estos fenómenos tensionales ya no son independientes de la escala, como lo eran los referentes al problema de simple equilibrio exterior; porque, siendo fuerzas por unidad de superficie las que, en definitiva, determinan la rotura del material, al aumentar las dimensiones de la estructura, sus volúmenes y, por tanto, las fuerzas ponderales aumentan más rápidamente que las superficiales; por consiguiente, los pesos de la estructura real pueden producir la rotura, mientras que los de un modelo reducido de la misma, perfectamente a escala, estén todavía muy lejos de poder provocarla.

Otro punto que no ha de olvidarse es que muchos materiales dúctiles, como el acero semidulce, normal en construcciones metálicas, son elásticos hasta unos ciertos valores de las tensiones, y plásticos cuando el estado tensional los sobrepasa. La utilización resistente de estos equilibrios tensionales en régimen plástico —que hoy empiezan a utilizarse e introducirse en el cálculo de las estructuras— presenta, sin embargo, sus inconvenientes, como son, por ejemplo, los de no ser tan inocentemente reversibles como los elásticos. Si han de producirse repeticiones o alternancias de los esfuerzos, el material sufre la llamada fatiga, o sea, la rotura al cabo de un cierto número de repeticiones, con tensiones muy por bajo de la resistencia que ofrece bajo una carga no repetida.

En realidad, el mismo fenómeno se produce aún en un régimen aparentemente elástico. El material puede romperse a tensiones menores que las que resiste en primera carga. Pero esto sólo tiene lugar al cabo de cientos de miles o millones de repeticiones y cuando las tensiones sobrepasan más o menos la mitad de las que es capaz de aceptar el material una o pocas veces. La cuestión sólo tiene, pues, importancia en casos muy particulares de estructuras que puedan sufrir estos grandes números de alternancias del esfuerzo, como pueden ser las cimentaciones de ciertas máquinas oscilantes o algunos puentes de ferrocarril.

Diferente es el problema que otros materiales no hookeanos, como el hormigón, acusan respecto a la ley entre tensiones y deformaciones; esa es una cuestión en cierto modo secundaria y más propia para ser comentada al tratar del comportamiento específico de cada material.

Todo este conjunto de fenómenos prueba cuánto interesa la reflexión y el aprendizaje sobre estas cuestiones, porque las experiencias tensionales de la vida cotidiana

son mucho menos y más difícilmente apreciables que las de simple equilibrio. Y si al técnico –acostumbrado a proyectar los entramados de sus edificios con el encasillado formulario de la más simple teoría de la Resistencia de Materiales– puede parecerle que muchas de estas cuestiones, relativas a las formas de rotura y al plexo tensional, cogen el problema desde demasiado lejos, y que poco o nada han de influir en su imaginación al idear la conocida traza de sus estructuras, debe, por el contrario, pensar que hay muchas clases de ellas en las que las cosas no son tan fáciles y metodizables; que hay muchos detalles de forma, de enlace, de reparto de armaduras, etc., que, con ser detalles, son de importancia fundamental en la resistencia del conjunto; y, en fin, que el trazado a sentimiento de una red de isostáticas no es cosa imposible cuando se ha reflexionado un poco sobre la teoría y se le ha cogido el gusto y el hábito a la cuestión.

Las estructuras pueden estar formadas por macizos de tres dimensiones comparables, como las presas; por elementos superficiales o laminares típicos de hormigón armado; o por entramados de piezas, en las que una dimensión predomina fuertemente sobre las otras dos, sean barras, vigas, arcos o elementos análogos.

Poco se sabe y menos puede decirse, aquí, de los primeros. Desgraciadamente la Teoría de la Elasticidad no ha encontrado forma práctica de aplicar sus principios a los procesos de cálculo, en cuanto el contorno tridimensional del sólido no ofrece una expresión analítica muy fácil; y, aun en formas de revolución, reduce sus soluciones a casos contados. Las teorías elasto-visco-plásticas son todavía mucho más complicadas y de menor aplicación en este tipo de estructuras o macizos.

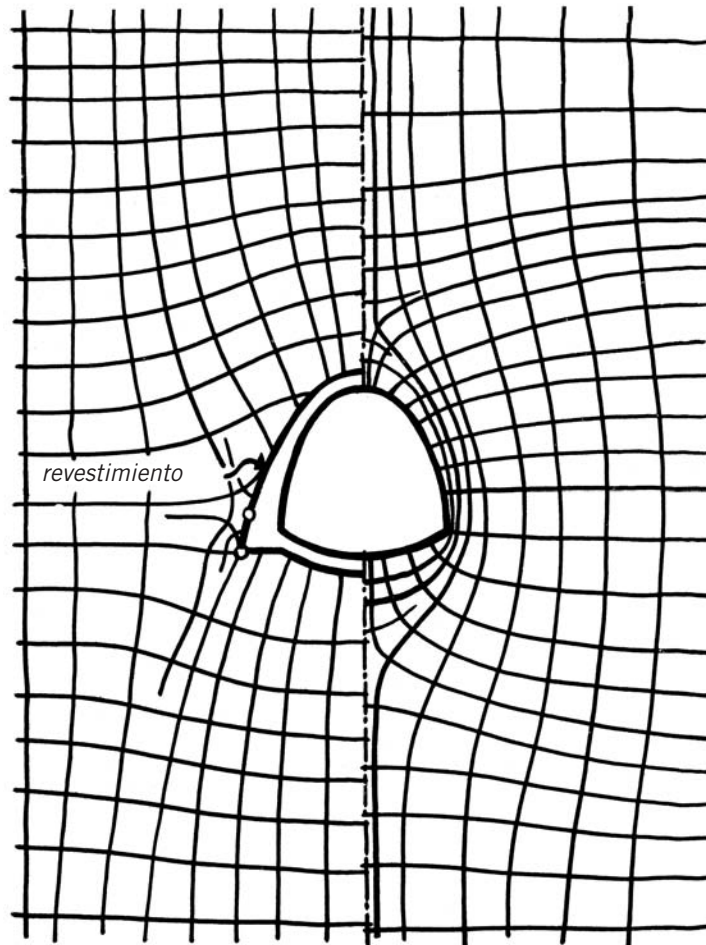
Mucho más fecunda resulta la Teoría de la Elasticidad en lajas planas o en formas prismáticas de sección constante, en las que puede suponerse que todas las rebanadas trabajan por igual, como es el caso de un tubo o el de un revestimiento de un túnel (fig. II. 6). No teniendo que estudiar más que el problema plano, la red de isostáticas y los valores de las tensiones principales pueden obtenerse –aunque no con facilidad–, analítica o fotoelásticamente; y esa representación del estado tensional permite discurrir sobre las formas resistentes óptimas.

Como se verá más adelante, este plexo tensional, propio del trabajo de una laja plana sometida a fuerzas aplicadas en su plano, es de gran interés y se amplía a los elementos laminares curvos, como bóvedas, cúpulas, etc., sobre cuyas superficies se producen estados tensionales análogos, que pueden, en cada punto, considerarse situados en el plano tangente a la superficie media de la lámina curva.

Pero, donde efectivamente el problema resulta mucho más fácil, y donde se encuentra la inmensa mayoría de las estructuras, es en los entramados de piezas, cuyas dimensiones transversales son pequeñas respecto a la longitud. Fuera de algunas placas planas y láminas curvas de hormigón armado, todas las estructuras modernas son conjuntos de este tipo; y frecuentemente la acepción de la palabra estructura se refiere concretamente a ese conjunto de elementos lineales.

El comportamiento de estas piezas alargadas, barras, vigas, soportes, etc., es tan conocido, y hasta tan vivido en la experiencia diaria, que no requiere aquí comentario especial; en el estado de flexión, la deformación del conjunto de la pieza es mucho más apreciable que en tracción o en compresión axil; todo el mundo ha experimentado

II-6. Red de isostáticas en un túnel con y sin revestimiento. (Obtenida fotoelásticamente, por C. de Benito y A. Moreno, en el Laboratorio Central de Madrid).



cómo una rama se incurva bajo el empuje del viento o de dos momentos flectores que, con las manos, se apliquen en sus extremos. Hasta los niños saben, aunque no hayan reflexionado en ello, que una misma regla de dibujo, es mucho más rígida en el sentido del canto que en el del espesor; y si saben algo de aritmética, no se extrañarán mucho si se les dice que, a igualdad de ancho, su resistencia es proporcional al cuadrado del canto, y que la curvatura, que toma, es inversamente proporcional al cubo de este canto. Sin embargo, algunos proyectistas modernos parecen desconocerlo, cuando se empeñan en que los especialistas les hagan vigas de tan poco canto que más parecerían propias de trampolines, y confunden la sensación de estática ligereza con la de atormentado esfuerzo.

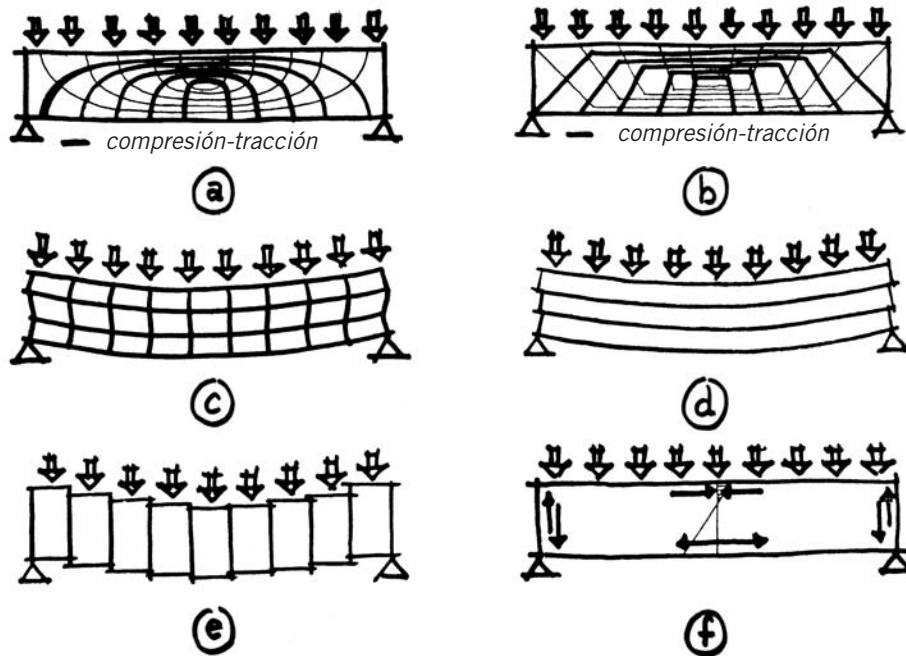
El plexo tensional de una viga, uniformemente cargada, por ejemplo, se representa en la figura II. 7a y puede esquematizarse groseramente por un sistema de barras comprimidas y otro de tirantes (b) que enseña claramente cómo la viga requiere unas fibras longitudinales, resistentes a tracción por abajo y a compresión por arriba; y cómo, para que estas fibras entren en trabajo, se requieren las dos familias de diagonales, también unas comprimidas y otras traccionadas bajo la acción de las cargas.

La viga se deforma como se representa en (c); y son las diagonales las encargadas de evitar los deslizamientos que las fibras longitudinales (d) o de las rebanadas transversales (e) sufrirían al tender las fibras a liberarse de los acortamientos o alargamientos que les impone el tipo de deformación conjunto de la pieza.

El esfuerzo cortante –que, según se dijo, es igual a una tracción y una compresión, ambas a 45°– es resistido por las diagonales; mientras que el momento flector lo es por el par que provocan las tensiones longitudinales de tracción y compresión. Como este par (fig. II. 7f) tiene un brazo mucho más pequeño que el de las fuerzas exteriores que, a cada lado de la sección lo provocan, las tensiones longitudinales resultan, en general, muy fuertes; tanto más cuanto mayor es la esbeltez de la pieza. Por eso interesa, a igualdad de área de sección de ésta, aumentar el canto más que el ancho; porque, con el primero, aumenta el brazo resistente y con el segundo no. En cambio, para el esfuerzo cortante, no hay este multiplicador; y lo mismo daría, al menos teóricamente, aumentar el ancho que el canto. Razones todas ellas que justifican, como es bien sabido, la sección en I.

El fenómeno de torsión es menos utilizado y algo más complejo el cálculo; pero, es también fácilmente comprensible observando bien las deformaciones de la barra de goma antedicha. Bajo este tipo de esfuerzo, la resistencia y la rigidez de la pieza aumentan con el momento de inercia polar; y piden, por tanto, secciones cerradas circulares o en cajón.

Todas estas cosas son sabidas del técnico; y, si se citan aquí, es más bien a modo de ejemplo de cómo interesa discurrir para captar los fenómenos y la importancia que ello tiene.



II-7. Plexo tensional de una viga uniformemente cargada.

No hay que olvidar, por otra parte, que el peligro de rotura no es el único que puede amenazar a una estructura. Hay otro peligro típico que influye mucho en la morfología de estos elementos estructurales, e incluso de la estructura entera. Se refiere al pandeo o, más en general, a las causas de inestabilidad. Del mismo modo que no basta que haya equilibrio de cargas y reacciones exteriores, sino que es necesario que ese equilibrio sea estable, tampoco basta que el estado tensional interno equilibre todos los volúmenes elementales del sólido, sino que se requiere que ese estado tensional conjunto cumpla las leyes de la estabilidad elástica o plástica, según sea el material.

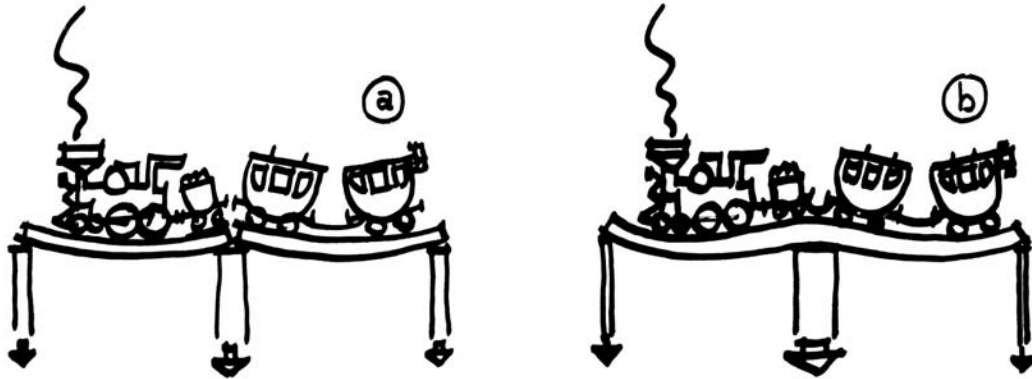
Apoyándose en un bastón recto, pero delgado, llega un momento, en que se dobla sin romperse; aunque la rotura puede venir después, si se fuerza la carga, por efecto de la curvatura y de la flexión debidas a la excentricidad de la fuerza respecto a la nueva directriz que ha tomado el bastón. Como todo fenómeno en que interviene la flexión, el peligro se disminuye aumentando el momento de inercia de la sección en todas direcciones y haciendo ésta hueca para darle más brazo mecánico con la misma cantidad de material.

Análogos fenómenos de inestabilidad se pueden producir en otros casos; por ejemplo, en una ménsula delgada, el pandeo por torsión que le hace curvarse lateralmente saliéndose de su plano y alabeándose.

En general, son fenómenos fáciles de intuir aunque puedan resultar difíciles de calcular. Como su peligro aumenta muy rápidamente con la esbeltez de la pieza en cuanto ésta pasa de ciertos límites, variables de un material a otro, son precisamente los materiales más resistentes —que permitirían mayores esbelteces si no fuese por este peligro— los que, en consecuencia, resultan más sensibles al pandeo; y en su dimensionamiento, ha de tenerse más en cuenta este peligro para establecer los oportunos arriostramientos que, al cortar la longitud libre de la pieza, acorten la esbeltez peligrosa.

Más adelante ha de tratarse de las ventajas e inconvenientes del isostatismo y del hiperestatismo en las estructuras, y poco cabe decir de ello aquí. Así como el saber si una estructura puede, o no, estar equilibrada por la sustentación es reconocible al primer golpe de vista, igualmente lo es el saber si esa sustentación es iso o hiperestática; pues, esta última se caracteriza por presentar más reacciones o coacciones de enlace de las necesarias para ser equilibrable. Pero, de eso a poder enjuiciar la importancia de las reacciones hiperestáticas va mucho trecho; porque se presenta una indeterminación, dentro de las posibles soluciones de equilibrio, que sólo desaparece por la consideración de las deformaciones consiguientes. Sólo imaginando éstas, se puede tener una idea del estado de tensiones y reacciones que cabe prever.

Por ejemplo: en una viga isostática de dos tramos iguales (fig. II. 8a), uniformemente cargados, el soporte central sufre una carga doble que los laterales; pero, si resulta hiperestática por efecto de su continuidad, esta solución, que equilibra las fuerzas actuantes, ya no es compatible con la deformación previsible de la viga. Para mantener la continuidad de la directriz (fig. II. 8b) es necesario que aparezcan unos momentos negativos sobre el apoyo central, los cuales, al suponerse aplicados a cada tramo de la viga isostática, aumentan necesariamente la carga en ese apoyo, aliviando de la suya los laterales.



La solución real se suele determinar, en el cálculo, por la condición que tiene de limitar al mínimo el trabajo que realizan las fuerzas, por efecto de los corrimientos que sufren a causa de las deformaciones. Las cargas tienden a producir el tipo de deformación que les permita realizar el máximo trabajo; y las reacciones, equilibrando aquéllas, se distribuyen entre sí de forma que les obligue a realizar el mínimo. El «statu quo» sólo se altera por la rotura. Pero, todo esto se sale de la consideración puramente cualitativa de los fenómenos que es lo que ahora interesa.

11-8. Deformación de vigas isostática e hiperestática.

El estudio y la determinación de todas estas reacciones hiperestáticas, internas o externas, forman uno de los primeros problemas que hay que resolver al calcular una estructura; y su obtención se complica tanto más cuanto mayor es el grado de hiperestatismo o número de esas reacciones superabundantes.

Su estimación aproximada, rápida, es mucho más difícil que la de las reacciones isostáticas; y sus valores, dependientes de las propias deformaciones del material, siempre son algo más aleatorios que los de las reacciones de carácter isostático. A pesar de ello, encajan siempre en márgenes de error aceptables, y las ventajas que su presencia proporciona a la rigidez y ligereza de las estructuras son importantes; aunque, en ciertos casos, presentan inconvenientes como habrá ocasión de comentar en otros capítulos.

III

Los materiales clásicos

«Para el artista creador, cada material expresa su propio mensaje», dice F. Lloyd Wright; y para comprender ese mensaje es necesario meditar sobre las propiedades de cada uno de ellos hasta empaparse en su peculiar modo de ser y de expresarse; porque, efectivamente, cada cual presenta su etopeya diferente y específica.

No interesan, ahora, los materiales constitutivos de cada fábrica o de cada material, en el sentido que suele darse a esta palabra entre los constructores; no es, por ejemplo el cemento sino el hormigón, o el mismo hormigón armado, lo que se considera aquí como material; no es la piedra en sí, sino la cantería o la mampostería; no el ladrillo, sino la fábrica de ladrillo.

Hecha esta aclaración, pueden agruparse los materiales en: pétreos, metálicos, maderas y hormigón armado o pretensado. Estos cuatro grandes grupos –y, dentro de ellos, los subgrupos que irán apareciendo–, presentan características diferentes y específicas que influyen decisivamente en el tema fundamental que se trata, enunciado en el primer capítulo.

Dentro del primer grupo, se distinguen corrientemente la mampostería en seco, la cantería con sus variantes de sillarejo, etc., la mampostería normal y careada, el tapial, el adobe, y las fábricas de ladrillo macizo, hueco, rasillas, etc.

El más antiguo, del que quedan restos, es la mampostería ciclópea en seco (fig. III. 1) que, sin interés técnico actualmente, sigue teniendo el arqueológico, pues es el antecesor de todos los éxitos posteriores de la cantería.



III-1. Muro ciclópeo ibérico de Tarragona. (De la «Historia de España», de R. Menéndez Pidal).
Fotografía: Museo de Barcelona.

Sus monolitos, silenciosos e inmóviles, tienen fuerza de carácter como los grandes héroes, al decir de Lin Yutang; vírgenes aún de toda herramienta humana, son el último mensaje del primer intento de perdurabilidad del arte de la construcción. Y aún hoy, los menguados hijos de esa técnica, siguen reproduciéndose en las modestas albarradas que cierran las heredades, o en los jorfes que sostienen los bancales de sus tierras, para hacerlas laborables sobre las abruptas pendientes de las montañas.

Cuando las herramientas permitieron labrar la piedra, nació la cantería; y aún quedan obras romanas (fig. I. 1) en las que los sillares se asentaron, unos sobre otros, a hueso, sin mortero de rejuntado. Pero lo mismo la mampostería que la cantería aprovecharon inmediatamente las ventajas que ofrecían los morteros; porque las mamposterías de piedra en seco presentan poca resistencia y estabilidad si no se aumentan grandemente sus espesores. Mucho más resistentes resultan las mamposterías con asiento de mortero; pues, aun cuando, en ellas, la adherencia de éste con la piedra, represente siempre una superficie de más fácil rotura, sus condiciones mecánicas se mejoran notablemente; y tanto más cuanto mayor es el espesor en relación con el tamaño de los mampuestos; y cuanto menos probabilidad presentan de que una superficie de separación, o de deslizamiento, oblicua respecto a la dirección de la compresión, facilite la rotura.

Por eso, se procura que la dimensión máxima del mampuesto sea normal a aquella dirección de la compresión. Esta tendencia hace pasar insensiblemente al sillarejo, y de él, a la sillería aparejada. El mejor aprovechamiento resistente del material permite que los espesores de esta última puedan ser menores que los de la mampostería.

La cantería clásica aplantillada es, en general, la más cara de todas las fábricas y, por eso, es la menos empleada fuera de las obras de carácter monumental o suntuario. Eligiendo una buena calidad de piedra, su durabilidad es prácticamente indefinida, su aspecto magnífico, y la artesanía de su labra le presta todas las posibilidades de las obras clásicas, sobradamente conocidas.

El artista les dio la forma, pero la calidad es algo tan propio del material, que parece pregonar continuamente su primacía e independencia de la labor humana. A golpes saltó el tasquil dejando su huella en el sillar herido y como en carne viva; pero, pronto vuelve el tiempo a devolverle la dermis de su pátina que lo avalora como aroma de vino añejo.

Este material presenta, casi necesariamente, masa relativamente grande; al menos, el disminuirle en exceso sólo conduce a aumentos de coste en lugar de reducciones. Su resistencia a la compresión es grande; por el contrario, la resistencia a la tracción es muy pequeña, no sólo porque la piedra, de por sí, adolezca de este defecto, sino porque el mortero de las juntas es prácticamente incapaz de dar resistencia confiable a tracción. Para mejorarla –cosa siempre conveniente, aun cuando en los cálculos no se la vaya a tener en cuenta–, se recurre a alternar las juntas verticales en las hiladas contiguas, ahuyentando el peligro de que se produzcan grietas, en esa dirección vertical, por cualquier esfuerzo anormal de tracción horizontal que puede presentarse. Las juntas horizontales se dejan continuas, contando con que van a quedar siempre comprimidas y con poco esfuerzo cortante o deslizante en su plano, puesto que las cargas que han de soportar son principalmente las verticales de peso, fundamentales en obras de masa.

Los sillares pueden adoptar formas variadas; sin embargo, para no hacer prohibitivo el coste de la labra, se requiere evitar superficies curvas y ángulos entrantes en las juntas.

Todo esto hace que la cantería sea sumamente apropiada para paramentos vistos, de carácter monumental, en los que la piedra acusa la verdad de su macizo espesor. Es el material de los elementos en que interese la masa y el peso, como en los muros de contención; y, en general, de los que tengan que trabajar exclusivamente a compresión: soportes, arcos, bóvedas, etc. En cuanto aparecen tracciones importantes, el material es prácticamente impotente para resistirlas.

Casi puede catalogarse, como otro material de distinta naturaleza, el de los plaqueados que, aun siendo de la misma materia y procediendo de la misma cantera, nacen ya de otro modo y con otras formas. El aserrado y pulido mecánicos permiten obtener económicamente lajas de contados centímetros de espesor, utilizadas, primero, para aparentar verdaderos sillares de gran espesor y, ya hoy, para expresarse como simples elementos de revestimiento.

Desde un punto de vista clásico, es una solución antinatural, falsa y absurda; sin embargo, no cabe duda de que la técnica moderna ha cambiado las posibilidades de utilización creando una más, y, en cierto modo, un material diferente en cuanto a su función. Porque, en los plaqueados, la piedra —la noble piedra maciza de inmovibles sillares, que daba a la obra la fortaleza y el ser— se ha convertido en una simple cobertura aparente y expletiva que presta a la construcción solamente su faz, pero que necesita adherirse a otra fábrica para sostenerse, como la hiedra alrededor del tronco del árbol.

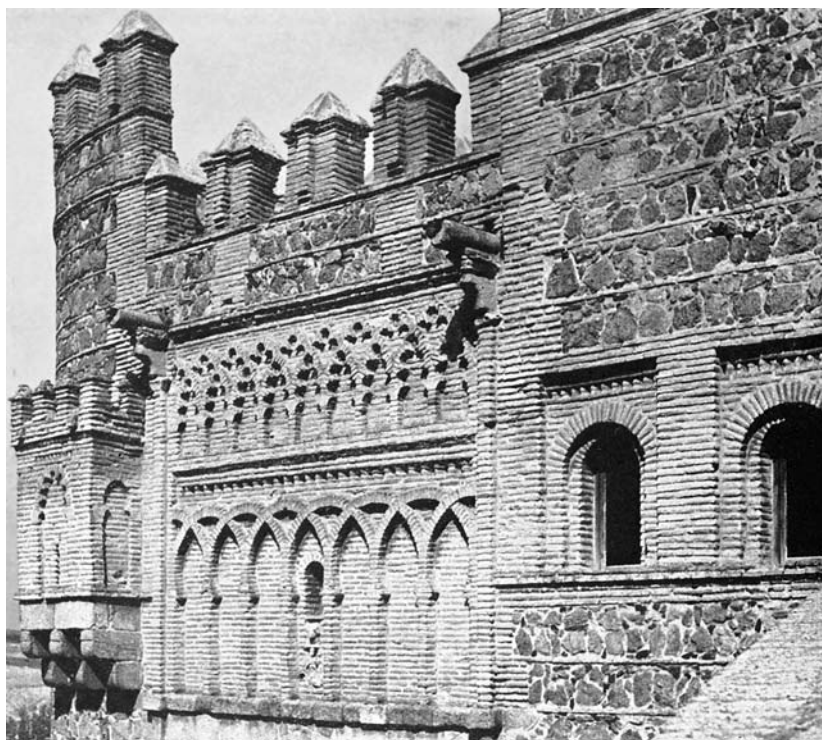
Con estos plaqueados, el técnico no debe olvidar que, en general, la rigidez e indeformabilidad del plaqueado son superiores a las de la fábrica del muro a la cual han de adherirse, y carecen de la tendencia a retraer, propia de las fábricas de ladrillo y hormigón; por ello, ha de cuidarse este punto, asegurando su engrapado y, en último extremo, dejando cierta libertad de movimiento del plaqueado respecto de la masa del muro que reviste.

El ladrillo es el primer material creado por el dominio de la inteligencia humana sobre los cuatro elementos: tierra, aire, agua y fuego. Ese material, tan dócil y humano —en el que el barro, tras laborioso amasado, hábil moldeo y paciente secado, se hizo piedra al calor de un fuego penosamente encendido— presenta, ya, características y morfología, en sus fábricas, netamente específicas y totalmente diferentes de las de las piedras naturales.

Una de ellas es la de proceder de una fabricación en serie; todos los ladrillos de un tipo han de ser iguales; y el número de tipos, forzosamente reducido. Sin embargo, la gran variedad de dibujos y efectos que los artistas de otros tiempos, y en especial los mudéjares (fig. III. 2), supieron lograr para sus frogas con un elemento tan monótono y rígido en sus dimensiones, es sólo comparable a la belleza que el poeta obtiene ajustándose en sus versos a la rigidez de un metro.

Las dificultades de secado y cochura de las arcillas —que las modernas técnicas no han logrado más que reducir parcialmente—, obligan a tamaños pequeños y, actualmente, a formas adaptables a la producción en prensa o en hilera.

Se pueden fabricar ladrillos huecos de paredes delgadas; pero no se ha encontrado el sistema económico de dejar los huecos cerrados sin aparecer en la superficie del



III-2. Friso de la Puerta del Sol, en Toledo. Fotografía: M. García Moya.

ladrillo, lo que proporcionaría indudables ventajas, tanto de tipo constructivo como de aislamiento térmico.

Su escaso volumen y peso, por pieza, se utiliza para facilitar la mano de obra de colocación, al poder manejarse con una sola mano; pero, en realidad, su tamaño no está limitado por esta causa, sino por las posibilidades de fabricación, ya que las grandes piezas huecas permitirían el desarrollo de otras técnicas más económicas. Tanto es esto así, que hay varios intentos de construir con grandes bloques prefabricados de ladrillo para disminuir las operaciones en obra, pasando buena parte de ellas al taller, donde el trabajo mecanizado y en serie proporciona indudables ventajas.

Consecuencia del tamaño reducido del ladrillo es la gran superficie de juntas por unidad de volumen de fábrica. El espesor de estas juntas está, también, obligado entre límites relativamente estrechos.

Hay ciertamente ladrillos con rebajo interior que permiten la llamada junta a hueso; pero la fábrica resultante es antirracional, pues su resistencia es mucho menor y su impermeabilidad, al aire y al agua, prácticamente nula, sin otra ventaja que la, siempre opinable, de su mejor efecto estético.

El tamaño de la arena del mortero y las inevitables pequeñas variaciones de forma y tamaño, de un ladrillo a otro, por efecto de las contracciones y alabeos de cochura, hacen que la junta no pueda ser demasiado pequeña; ni tampoco se puede aumentar mucho, porque el mortero se caería al sentar el ladrillo siguiente.

El mortero –luego se insistirá sobre ello al hablar del hormigón–, presenta retracciones de fraguado apreciables y deformaciones térmicas e higroscópicas superiores a

las del ladrillo. Este, igual que la piedra, tiene un coeficiente de dilatación pequeño y, con buena cochura, el higroscópico es también sensiblemente despreciable.

En cuanto las juntas son gruesas, la influencia de los movimientos del mortero se nota muy apreciablemente en el conjunto de la fábrica en dirección normal a las hiladas; y si la fábrica va unida a otra más rígida, como la cantería, llega a provocar agrietamientos y despegues perjudiciales.

Como estas juntas son normalmente horizontales, la fábrica retrae verticalmente; las variaciones térmicas e higroscópicas son menores, aunque apreciables si el agua llega a embeber y abandonar todo el espesor de la fábrica. El fenómeno de retracción normal al plano de hiladas, es aún más acusado, a la larga, en los morteros de cal.

En sentido longitudinal o paralelo a las hiladas, la influencia del mortero se hace sentir mucho menos a estos efectos; no sólo porque la proporción de juntas es menor, sino porque el aparejo solapado de los ladrillos dificulta el efecto, provocando, en todo caso, fisuraciones del mortero más o menos microscópicas. Los movimientos térmicos e higroscópicos longitudinales pueden prácticamente asimilarse, como en la cantería, a los propios del material base, siempre despreciables.

Los espesores de estas fábricas, ya no son libres; han de ajustarse a múltiplos de las dimensiones de los ladrillos, habida cuenta del espesor de junta con el que puede jugarse algo. Se llega a espesores tan pequeños como el del tabique de panderete con rasillas huecas de 3 cm; y aún menos, pero, para elementos resistentes, estos tipos tienen contadas aplicaciones.

Con conglomerante de yeso, en lugar de mortero de cemento, se logran velocidades de trabajo mucho mayores y fraguado prácticamente instantáneo; pero, bajo el efecto de la humedad, se pierde gran parte de sus ventajas de utilización y posibilidades resistentes, por lo que sigue siendo relativamente poco empleado fuera de las zonas interiores de edificios bien defendidas de la humedad.

En el ladrillo, en fin, no hay que olvidar el color; porque, aunque no permita tanta riqueza como las piedras, presenta sobrada variedad de matices, desde el ocre neutro y pálido hasta el rojo vivo, a través de toda la gama de los rosáceos, para dar a una obra, e incluso a una población entera, un ambiente personal, de alegre verdad y de delicada vibración, difícilmente alcanzable con otros materiales.

En la fábrica de ladrillo, cada uno pierde, dentro del conjunto, aquella personalidad con que se acusaba el gran bloque de la mampostería ciclópea. El ladrillo es algo más humilde, más impersonal, más gregario si se quiere; pero aun así las pequeñas diferencias de uno a otro pueden prestar al conjunto una vibración y una textura que indudablemente es una de las causas de su belleza.

El adobe es un material muy útil en regiones donde abundan las arcillas arenosas aptas para su fabricación; pero, es exclusivamente aplicable a muros y elementos de régimen tensional muy bajo, y en compresión. Por consiguiente, no interesa su consideración y diferenciación como material estructural.

En resumen: las fábricas de materiales pétreos naturales y cerámicos resisten bien a compresión y mal a tracción; son materiales que pueden llamarse «frangibles» para distinguirlos de los tenaces o «traccio-resistentes» —como el acero o la madera—, y que requieren bastante masa en los elementos que con ellos se construyen. Respecto a otras condiciones

de aislamiento térmico y acústico, aspecto exterior, rugosidad, resistencia al desgaste, etc., no es necesario insistir aquí, pues son bien conocidos; y, si bien pueden influir en el tipo estructural, lo hacen de modo indirecto, fácil de comprender y de tener en cuenta.

Respecto a la permeabilidad, conviene recordar que depende fundamentalmente del tipo de mortero empleado y del cuidado con se que haga el rejuntado; pero es difícil asegurar con estos materiales una absoluta impermeabilidad.

De intento ha quedado *el tapial* aparte, no sólo porque es, como el adobe, un material de resistencia demasiado escasa para usos estructurales, sino por su tipo especial de fabricación «in situ» dentro de encofrados que permiten moldearle con cierta libertad de formas; incluso, en algunos casos, llega a moldearse sin encofrado, como las arcillas de escultor.

El tapial es la antítesis de la piedra en cuanto a sus condiciones de permanencia, y necesita un asiduo cuidado para reponer sus erosiones; quizá, por eso mismo lo quieran, como algo más íntimo y humano, los viejos pueblos que, aferrados al terruño de sus campos arcillosos, lo defienden y encalan periódicamente con todo el afecto que sienten por sus tradicionales viviendas recoletas y acogedoras.

El tapial, como el hormigón, es un material «formáceo», aptos para fabricar «in situ» grandes monolitos a los que se da la forma que se desea dentro de ciertos límites y leyes. Sus posibilidades económicas en muros de edificación popular, sus magníficas condiciones térmicas, antisonoras e incluso estéticas no son despreciables para ciertos casos y usos; y su resistencia y durabilidad pueden ser sensiblemente mejoradas con ciertas técnicas iniciadas modernamente, como es la de su amasado con una pequeña cantidad de cemento portland, después de bien estudiada la granulometría, la composición petrográfica y el comportamiento reológico de sus tierras.

Todo nuevo material provoca, con su aparición, una fuerte oposición en los espíritus cuyo clasicismo da valores exclusivistas a la perfección de las formas ancestrales. *El hormigón* no se quedó atrás en la magnitud del revuelo que se armó cuando quiso hacer valer sus derechos en el campo de las estructuras. Aún viven los que aprendieron en las escuelas como era mórbida locura pretender sustituir la siempre noble piedra por un repulsivo mejunge químico, producto enfermizo y mecánico de artificiosa época deificadora de todos los substitutivos. Pero, los tiempos corren deprisa y ya nadie discute hoy la gran utilidad y la específica adaptación que el hormigón presenta para determinados tipos estructurales.

Por otra parte, si bien el hormigón es un material moderno en su desarrollo, puede considerarse viejo y clásico, por cuanto lo emplearon, aunque pobremente, muchos pueblos de la antigüedad y, en especial, los romanos en su variedad puzolánica.

Las pasta de cemento y agua, al fraguar primero y endurecer después, consolida las piedras y granos de arena del árido para constituir un verdadero conglomerado artificial análogo a ciertos tipos de rocas naturales. La libertad de formas sólo está limitada por las imposiciones económicas del encofrado; y los espesores, por el tamaño del árido, que no conviene reducir excesivamente.

Dejando para más adelante los problemas del hormigón armado, conviene considerar primero las posibilidades de empleo y las características del hormigón solo u hormigón en masa.

III-3. Viaducto de Quince Ojos, en Madrid. Arquitecto A. Aguirre. Ingeniero E. Torroja. Fotografía: S. v. Kaskel.



Desde el punto de vista constructivo, el hormigón se caracteriza por exigir un encofrado y una cimbra, como elemento sustentante de este encofrado, capaces de soportar el peso del hormigón fresco y los empujes laterales que da, análogamente a un líquido. Estos empujes laterales desaparecen en cuanto fragua; pero, en la mayor parte de los elementos estructurales se requiere mantener la cimbra durante varias, aunque pocas, semanas hasta que el hormigón ha alcanzado su debido endurecimiento; y esta característica ha influido fundamentalmente en la específica morfología de sus estructuras.

Desde el punto de vista estrictamente resistente, el hormigón, igual que los materiales pétreos comentados anteriormente, entra en el grupo general de los frangibles por cuanto resiste bien a compresión y mal a tracción. A compresión da roturas, sea por separación según planos paralelos a la dirección del esfuerzo, sea por deslizamiento según planos que tienden a orientarse hacia los 30° con dicha dirección por efecto de su gran rozamiento interno. A tracción sufre roturas normales al esfuerzo.

Para un constructor clásico, el hormigón es, pues, un material «formáceo» que ha de convertirse después en piedra. Pero, no en sillares independientes y rejuntados, sino en un enorme monolito cuyas propiedades líticas van definiéndose y perfeccionándose con

el tiempo; lentamente, con los cementos utilizados por los pueblos de la antigüedad y mucho más rápidamente con los actuales.

Sin embargo, hay algo que, poco a poco, ha ido descubriéndose y analizándose y que diferencia esencialmente el hormigón de las piedras naturales y, en especial, de las de origen ígneo. Decir que el hormigón no es ni siquiera un sólido ha de parecer un poco fuerte y hasta insultante para el que tenga la desgracia de tropezar con él; pero el que se haya adentrado un poco en el delicado estudio experimental de sus leyes de deformación, sabe bien que éstas corresponden mucho mejor a las características físicas de un pseudo-sólido que a las de un sólido, en el sentido estricto que hoy se da a esta palabra.

El estudio de los fenómenos químicos y físicos, que tienen lugar en la pasta de cemento, llena millares de páginas y están apenas desbrozados los problemas que contienen. Pero, para lo que ahora interesa, basta con un esquema que cualitativa y aparentemente sirva para encajar las ideas, de forma que puedan servir de orientación para las burdas consideraciones, a través de las cuales estos fenómenos pueden intervenir en la mente del proyectista, al ponderar la oportunidad de un determinado tipo estructural.

El hormigón, como pseudo-sólido, puede imaginarse formado por un árido inerte y una pasta en la que una parte, que pudiera llamarse sólida, está rodeada y hasta infiltrada por el agua cargada de sales, y el aire que llena los poros restantes. El equilibrio termodinámico con el ambiente requiere que, al variar el grado higroscópico de éste, el agua se evapore o se condense según leyes complejas dependientes de su tensión superficial, forma de los poros, etc.; y que, incluso en el interior de la pasta de cemento fraguado, se produzcan variaciones importantes de diferentes caracteres y, en especial, variaciones de volumen análogas a las de un gel. El fenómeno depende, no sólo del ambiente, sino de la continua actividad química que se prolonga meses y aun años, y durante los cuales continúan los fenómenos de disolución del primitivo cemento y la formación de nuevas sustancias amorfas o cristalinas.

Como consecuencia de todo ello, el hormigón presenta, además del coeficiente de dilatación térmico, un coeficiente de dilatación higroscópico muy sensible. Al humedecerse el hormigón, por inmersión o por el simple efecto de un chaparrón sobre elementos de poco espesor, entumece; y al desecarse contrae, tanto más cuanto más bajo es el grado higroscópico del ambiente. Afortunadamente, el efecto se amortigua con el espesor del macizo, a pesar de la ligera porosidad que presentan los hormigones corrientes.

Aparte de todo esto, el hormigón, durante el fraguado y los primeros meses de vida al aire en ambientes normales, acusa una fuerte retracción del orden de décimas de milímetro por metro, cuyos incrementos van amortiguándose con el tiempo y que, en general, aumenta con la riqueza en cemento del hormigón, y con la sequedad del ambiente. En gran parte, este fenómeno es debido a la absorción del agua por el proceso químico y, en parte, a su eliminación hacia la atmósfera. Varía, por consiguiente, con la porosidad y con espesor del macizo de que se trate. En grandes espesores, el efecto es menor o, al menos, mucho más lento y menos aparente que con espesores pequeños; es muy grande en estructuras de elementos delgados sometidos a la intemperie en climas secos; y es nulo o despreciable en sus cimientos enterrados.

Quizá los especialistas se escandalicen por la ligereza con que se trata aquí el tema; pero, tampoco interesa ahora más que esbozar la cuestión, por cuanto haya de tenerse en cuenta en el proyecto de la estructura.

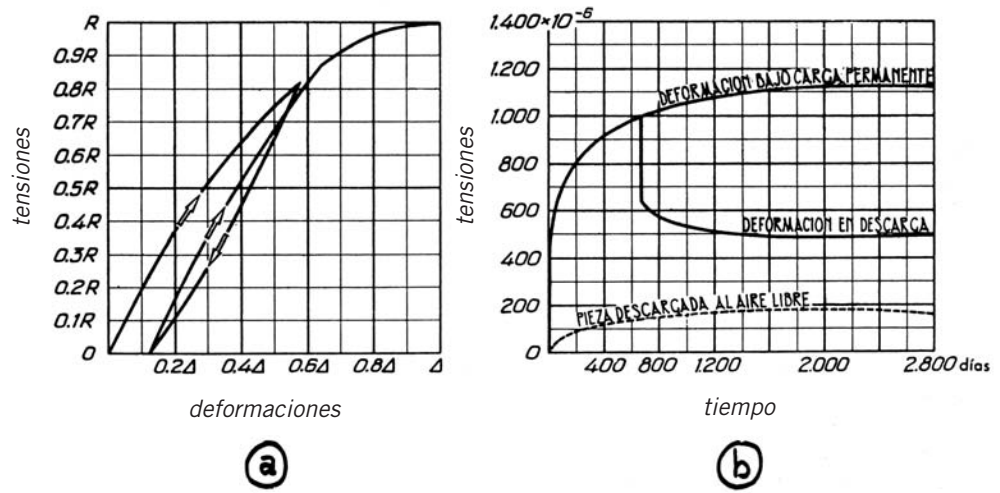
Bajo la acción de los estados tensionales a que se le somete, el hormigón acusa diferentes tipos de deformación, derivados, en parte, de los fenómenos anteriores.

En primera carga o sollicitación noval, el hormigón no acusa proporcionalidad entre la tensión y la deformación consiguiente, como no sea para tensiones muy bajas; y aun esto es discutible (fig. III. 4a).

Las deformaciones aumentan más rápidamente que las tensiones, especialmente al llegar a valores relativamente altos respecto a la resistencia del material; dejan una pequeña deformación remanente, tanto mayor cuanto más alta ha sido la tensión alcanzada. Bajo la acción de cargas sucesivas, no sobrepasando las que ha soportado anteriormente, puede admitirse que se cumple la ley de Hooke o de proporcionalidad entre tensiones y deformaciones.

Pero, en todo caso, si la sollicitación se mantiene a lo largo del tiempo —como sucede, por ejemplo, con los efectos del peso propio—, se observa que la deformación continúa aumentando según una ley amortiguada a lo largo del tiempo (fig. III. 4b). Aun cuando su parte más importante se realiza en los primeros meses, estas deformaciones lentas se han apreciado aun al cabo de varios años, y pueden llegar a alcanzar valores totales francamente superiores a los de la deformación inicial y hasta dos o tres veces superiores a éstos. La deformación lenta es menor cuanto más edad tiene el hormigón al establecer la carga; y viene indudablemente influenciada por las condiciones ecológicas. En fin, esta deformación aparece como parcialmente reversible o recuperable al descargar.

Todo esto, unido a la escasa resistencia del hormigón a tracción, presta a este material características y tipos de comportamiento dignos de tener en cuenta en los proyectos. Se produce automáticamente la rotura por tracción en cuanto la sustentación coarta excesivamente su retracción; y las mismas variaciones térmicas e higroscópicas producen, con frecuencia, el mismo efecto provocando agrietamientos espontáneos.



III-4. Diagramas de tensiones-deformaciones y tiempo-tensiones.

El hormigón es un material más groseramente heterogéneo que los otros; la retracción de la pasta alrededor del grueso árido que envuelve, somete esta pasta a tracciones, que sólo soporta gracias a su propia plasticidad y a ese conjunto de deformaciones, no elásticas, que se acaba de señalar. Especialmente la pasta joven —es decir, en sus primeros días después del fraguado— es más propicia y fácil para estos fenómenos de adaptación. Gracias a ello y a la continua recristalización y soldadura de sus fisuras, el hormigón mantiene su cohesión; pero, la resistencia en tracción, no sólo disminuye respecto a la que podría alcanzarse si no fuese por la retracción, sino que se hace, en cierto modo, más incierta y menos confiable.

Por otra parte, la rotura en el hormigón, lo mismo que en los materiales pétreos y cerámicos de que se ha tratado anteriormente, es de tipo frágil; y esto tiene mucha importancia, porque quiere decir que esta rotura se puede producir sin el aviso previo que representa una fuerte deformación anterior a la rotura; el cual podría dar tiempo a corregir el mal y evitar caracteres de catástrofe al agotamiento resistente del material.

Pudiera pensarse, después de toda esta exposición, que el hormigón es un pobre material deleznable, quebradizo e inestable; pero, por el contrario, este conjunto de comportamiento le presta posibilidades de adaptación, de regeneración y de restañadura de sus propias heridas, que le han hecho llegar hasta nuestros días, después de milenios de vida en compañía de la cantería, sin desmerecer de ésta en cuanto a durabilidad y permanente resistencia. Entre las ruinas romanas continúa apareciendo todavía firme tras los roídos sillares que lo ocultaban como algo indigno de su compañía.

El hormigón es tan adecuado como el ladrillo y la misma piedra natural para los tipos de construcción que la Antigüedad realizó con estos materiales; y les aventaja en las más grandes de estos días. Entre los agentes ecológicos normales, solamente la helada puede degradarle cuando su compacidad no es suficiente, o cuando los áridos no son resistentes a este efecto, igual que les sucede a determinadas piedras naturales poco recomendables —por eso mismo— para ser empleadas en ciertos elementos resistentes de las construcciones.

Entre las propiedades, de diferente orden, que suelen exigirse al hormigón, está su resistencia al desgaste, que interesa, aquí, sólo accidentalmente para el caso en que el propio material estructural sea, a su vez, el de superficie sometida al paso de peatones o de vehículos; frecuentemente se refuerza, al efecto, la zona superficial con adiciones o tratamientos especiales. Por todo ello, y por tratarse de ensayos de tipo tecnológico acomodados al género de desgaste que haya de sufrir el material, no interesa, ahora, más que su cita, ya que su olvido puede, en ciertos casos, conducir al fracaso.

El peso específico puede influir de modo determinante en la elección de los materiales que entran en el hormigón. Unas veces, como en las presas de gravedad, porque interese su mayor valor posible para asegurar la estabilidad del macizo frente a los empujes volcadores del agua; otras veces, por el contrario, porque interese el mínimo, dentro de unas buenas condiciones de resistencia, porque el peso propio produzca estados de tensión que interese reducir, como es el caso corriente de las vigas de puentes y de cubiertas de grandes luces. Pero hasta hoy no se ha logrado reducir sensiblemente el peso específico sin perjudicar bastante su resistencia.

Los hormigones muy ligeros, que se obtienen por adiciones especiales para lograr la incorporación, en fuerte proporción, de burbujas uniformemente distribuidas en su interior, suelen ofrecer resistencias demasiado bajas para su utilización como material estructural; sólo en elementos relativamente pequeños de edificación se va desarrollando su empleo incluso en piezas ligeramente armadas.

La permeabilidad y capilaridad –dependientes de la estructura, forma y tamaño de los poros en los materiales pétreos– son propiedades que casi siempre conviene disminuir en el hormigón; no sólo por razón de la propia finalidad de la construcción, sino también por su influencia en la durabilidad del material. El efecto perjudicial de la helada, sobre todo, se hace sentir, en general, tanto más cuanto más agua queda retenida y sin fácil salida al sobrevenir el aumento del volumen consiguiente a la congelación. El empleo de resinas especiales es, hoy, la solución que se ofrece como mejora contra ese peligro.

Por otra parte, la porosidad, en el caso de presas, tiene interés por cuanto introduce presiones internas sobre el esqueleto sólido, que se han de considerar, no sólo por los efectos tensionales directos sobre éste, sino, también, por la influencia que pueden tener en la estabilidad del macizo o en el régimen tensional que establezcan sobre tal o cual zona del conjunto.

Y para terminar esta enunciación de propiedades del material que pueden interesar al proyectista, bastará recordar cómo la durabilidad del material ha de considerarse, no solamente frente a las condiciones ecológicas normales, sino que hay muchos casos en que ha de estar sometido a elementos químicamente agresivos, como pueden ser las aguas de mar, las selenitosas de los terrenos, los humos y gases procedentes de ciertas industrias, etc. Frente a ellos, las piedras naturales y las cerámicas suelen –no siempre– resistir bien; los hormigones requieren una fuerte impermeabilidad y, en muchos casos, el empleo de cementos especiales específicamente resistentes a tal o cual agresivo.

Por último, no deben olvidarse otras técnicas más modernas y otras clases de hormigón, tales como los inyectados, en los que el árido grueso, vertido previamente en el encofrado, se rellena de mortero manteniendo la pasta en estado coloidal. Su utilidad en determinados casos de cimientos –revestimientos de túneles, recrecimiento de presas, etc.– amplía grandemente las posibilidades de empleo del hormigón y mejora sus condiciones, tanto por la economía que pueden representar, como por la disminución de retracción que logran. Otras técnicas como las del vacío, los tratamientos térmicos, la vibración, etc., facilitan un desencofrado inmediato, y muchas otras podrían citarse; pero el tema es demasiado extenso y suficientemente alejado del carácter que pretenden tener estos comentarios, para que corresponda otra cosa que su simple indicación.

En resumen: el hormigón presenta un comportamiento más complejo que la piedra o el ladrillo, con ventajas y desventajas respecto a éstos. Es su economía, especialmente en grandes volúmenes, y su fácil adaptación a formas variadas, su carácter de material «formáceo», lo que le da su valor específico y lo que lo hace insustituible en muchos casos, cada vez más numerosos por el continuo avance que experimentan sus diferentes técnicas, algunas de ellas modernísimas.

De todos modos, el costo del encofrado exige, para no elevarse demasiado, superficies planas, y esto es lo que induce al hormigón a ceñirse a formas poliédricas sencillas o a superficies regladas de ligera curvatura. Esto no quiere decir que no admita otras como, por ejemplo, las acupuladas; e, inclusive, molduraciones o vaciados ornamentales complicados. Lo que ocurre es que el costo de estas labores de encofrado, merma en gran parte sus ventajas económicas; pero, con ello y con todo, sigue, en general, resultado menos costoso que el mismo elemento labrado en piedra.

Puede interesar también obtener, en su superficie, calidades de textura, apariencia, coloración, etc., que, en cada caso, habrán de resolverse, bien con materiales superficiales al efecto, como enfoscados, etc., bien con la oportuna elección de la clase o tratamiento superficial del material, análogamente a lo que sucede, al fin y al cabo, con las piedras naturales.

Porque es el caso que el hormigón corriente resulta de un aspecto, puede decirse, poco expresivo; los artistas le colocan siempre en plan secundón respecto a la piedra; y aun algunos le niegan todo derecho a entrar en el cenáculo del Arte, alegando lo poco grato que les resultaba a las deidades romanas, que preferían la madera para los puentes de sus adoradores.

Pero, de una parte, sus derechos se van reconociendo; y, de otra, él ha ido encontrando modos de mejorar su presentación, cuidando los materiales y los tratamientos superficiales.

La dermis gris y anodina, que saca del encofrado y sobre la que sólo a veces la madera deja ligeramente marcada su impronta, es quizá la causa principal del horror que a muchos inspira. Y hay que reconocer que, con ese traje, su aspecto no es demasiado atractivo, ni ameno su lenguaje. La piedra o la madera enseñan su estructura íntima y fundamentan en ella su belleza. El hormigón, como el acero, adolece de esa falta de expresión de su estructura interna. Pero, no es imposible ni mucho menos acusar al exterior las piedras que lo forman. El picado superficial o la aplicación de determinadas pinturas sobre el encofrado, para evitar el fraguado del cemento próximo a la superficie, son métodos, no demasiado costosos, que permiten dar al hormigón aspectos agradables y variados.

En algunos casos se han empleado, como encofrado, placas delgadas de hormigón de cemento blanco hecho en taller; y en otros se utiliza un contraencofrado de chapa para separar, del hormigón barato del macizo interior, otra clase de hormigón que se vierte en el reducido espesor comprendido entre el paramento y esas chapas que se van retirando a medida que se hormigona. De ese modo la capa superficial puede hacerse con áridos y cementos especiales blancos o de las coloraciones que se desee, y el sobre-costos que resulta, en grandes paramentos, es suficientemente reducido para justificar la solución.

Por otra parte, no es sólo el color sino también la textura o calidad superficial lo que influye. Parece que el hormigón, menos duro que muchas piedras naturales, debiera resultar más agradable al tacto —real o imaginado—; pero, por el contrario, sus aristas y las mismas rebabas, que dejan las tablas del encofrado, le hacen más áspero y más hiriente; menos agradable de trato, en fin. El día que se logre dar a los cementos otra coloración más cálida y otra calidad más blanda a sus aristas y

rugosidades –lo que no parece imposible–, el hormigón podrá ganar mucho en manos del artista. Porque el otro defecto, que es la monotonía de sus grandes paramentos lisos, es mucho más fácil de corregir jugando con el encofrado. Basta cambiar de dirección las tablas de un tablero respecto al contiguo, o colocarlas solapadas, o rehundir las juntas con un simple listón triangular, o veinte mil otras combinaciones, para lograr, en la superficie, el deseado juego de calidades y la vibración que distraiga la vista.

El terreno ha de considerarse, hoy, como un material estructural; como un material tan esencial a toda estructura de construcción como lo es el agua para un buque o el aire para el avión.

El terreno puede ser un sólido, como en el caso de una roca; un pseudo-sólido, si se trata de arcillas, o un simple árido, cuando se cimienta sobre un lecho arenoso o sobre una gravera.

En este último caso, el terreno no ofrece ninguna cohesión y sólo queda el rozamiento para actuar como elemento estabilizante o resistente a la rotura.

En otros, la estratificación puede dar lugar a anisotropías, permeabilidades y resistencias diferentes en una dirección respecto a las otras. La facilidad de producirse deslizamientos, según ciertos planos, es uno de los peligros más graves, especialmente con capas de arcillas en las que el agua actúa de verdadero lubricante.

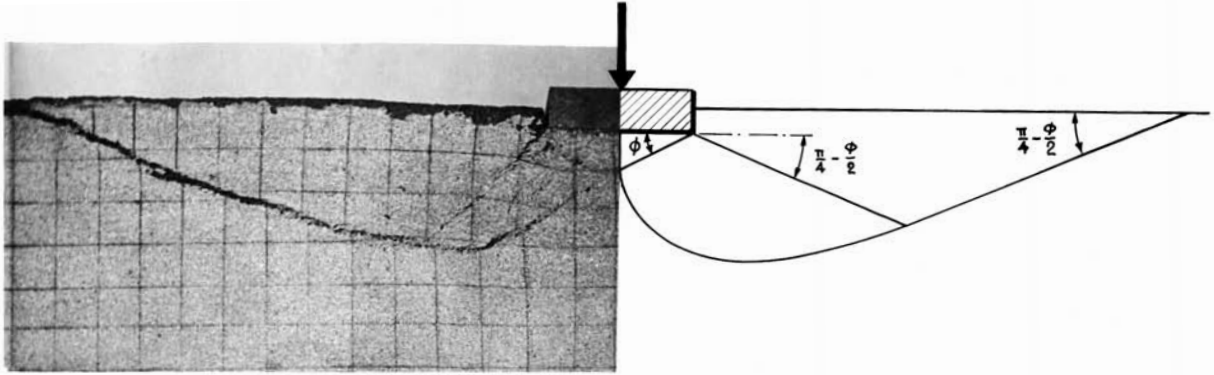
Independientemente de ello, en el caso de terrenos arcillosos, el problema es muy complejo porque interviene el agua intersticial o la intra-cristalina con todo un cortejo de fenómenos físico-químicos. En cuanto el cemento altera el estado tensional del terreno, aumentando, por ejemplo, su carga de compresión, comienza la expulsión lenta del agua y el asiento del cemento bajo leyes muy complejas.

De que las arcillas hayan estado más o menos consolidadas geológicamente, de que su espesor sea más o menos grande y de que las capas que lo rodean permitan, mejor o peor, la evacuación del agua, dependerá la magnitud del asiento y el plazo en que se prolongue hasta nueva estabilización; o la importancia de las contracciones y entumecimientos producidos por las variaciones de la humedad y del nivel freático.

Aun cuando en todas estas clases de terrenos la cohesión sea muy pequeña o nula, es raro que la rotura se produzca por separación, porque los cimientos establecen siempre cargas principalmente de compresión; por consiguiente, el peligro de rotura es por deslizamiento y el terreno no tiene, para oponerse a él, más que una cohesión, en general pequeña, y un coeficiente de rozamiento interno también pequeño en las arcillas. En ellas, además, una vez iniciado el deslizamiento, el valor del coeficiente de rozamiento baja bruscamente, lo que facilita el fallo a lo largo de superficies completas de mínima resistencia, permitiendo el movimiento de un determinado volumen de terreno que arrastra el cemento consigo (fig. III. 5).

Si el terreno es arena o grava suelta sin cohesión, solamente queda el rozamiento para actuar de elemento estabilizante o resistente a la rotura. Por eso se requiere ir a cimentar en profundidad, para que las posibles superficies de deslizamiento se agranden e interesen un peso de terreno estabilizante mucho mayor.

La determinación de las características que influyen en todos estos fenómenos –diagrama edométrico, etc., y en especial, la cohesión y el rozamiento interno– puede hacerse sacando probetas intactas del terreno con una buena técnica de sondeo y



extracción, no siempre fácil. Pero no hay que olvidar que, así como los demás materiales son artificiales —y, por tanto, es relativamente fácil cuidar su fabricación o su elección para obtener materiales de calidad uniforme—, en el terreno, salvo rarísimas excepciones, se carece de garantías respecto a esta uniformidad; y si bien los estudios geológicos ayudan mucho, no siempre alcanzan al carácter local de sus heterogeneidades.

IV

Madera y acero

La madera es cronológicamente el primer material capaz de resistir, por igual, a tracción y compresión, según la dirección de sus fibras. Es el único material vivo que se emplea, en grande, en la construcción, y, como todo lo que proporciona la vida, es algo más adaptable, menos rígido y esquemático que los otros. No hay dos piezas iguales en sus fibras y nudos, como no son nunca iguales las huellas de los dedos humanos; y el atractivo que tiene la madera procede, en gran parte, de esas cualidades vitales.

Por otra parte, respecto a los materiales que se han venido comentando anteriormente, se acusa también su menor durabilidad. Porque, si bien hay clases de madera que, en ambientes exteriores determinados, han resistido siglos de intemperie, en general, las alternancias de humedad y sequedad acaban rápidamente con ellas, bajo la intervención de bacterias, líquenes e insectos; que, bajo las leyes eternas de la naturaleza, la materia, que un día fue viva, no se resigna a pasar al mundo inorgánico sino a través de otras vidas llamadas inferiores.

Ciertamente la técnica actual ha ideado tratamientos que alargan enormemente la duración de las maderas; pero, con ello y con todo, la madera ha de mirar la piedra, el ladrillo y el mismo hormigón con igual envidia con que los hombres de hoy se acuerdan de Matusalén.

Aun después de muerta, es mucho más sensible que otros materiales a los agentes ecológicos. Puede decirse que la madera no acaba de morir nunca; las mermas y los movimientos que sufre después de cortada, durante el secado, se amortiguan sin acabar de extinguirse y, a cada cambio de tiempo y humedad, vuelve a mermar o a entumecer ligeramente, en especial en dirección transversal o perpendicular a sus fibras.

Es interesante observar que la naturaleza brinda ya la madera en piezas prismáticas rectas, de longitud mucho mayor que sus dimensiones transversales, y fácilmente trabajables. Sus escuadrías son limitadas, porque, aun cuando ciertas especies arbóreas alcancen grandes diámetros, su tendencia a ventearse y sus desiguales características, del centro al borde, obligan a reducir sus espesores útiles en las obras.

La madera es un material fuertemente anisótropo, formado de fibras longitudinales soldadas entre sí por resinas o por el parénquima menos resistente que las fibras leñosas. La fibra es algo consustancial de nuestras maderas de construcción; la fibra le da su belleza, su expresión resistente, su estructura vital.

Las resistencias a compresión, y más aún a tracción en sentido normal a las fibras, son mucho menores que sus resistencias en sentido longitudinal. Y la misma resistencia al deslizamiento es menor entre fibra y fibra que dentro o normalmente a ellas. Es decir, que la resistencia, tanto a tracción como al deslizamiento entre fibras, es muy poco confiable, porque el venteado acaba frecuentemente con este tipo de resistencia,

aun en maderas relativamente bien tratadas. Es difícil que el viento llegue a vencer la resistencia al esfuerzo cortante de un tronco vivo por corte transversal de sus fibras; es mucho más fácil que lo desgaje arrancando unas fibras de otras; y lo es, mucho más, que estos fallos se produzcan en las vigas de madera sacadas después de ese mismo tronco.

Longitudinalmente, su resistencia a tracción y a compresión pueden considerarse sensiblemente iguales en maderas buenas sin grandes nudos.

Otra característica de la madera es su gran deformabilidad tensional, con lo que las deformaciones en trabajo son mucho mayores que las de los otros materiales.

Las deformaciones tensionales de la madera no son sólo las elásticas o proporcionales a las cargas, sino que crecen más deprisa que éstas, especialmente al aproximarse a las de rotura; y, por otra parte, la madera acusa deformaciones remanentes, no reversibles, bajo la acción de cargas prolongadas o duraderas.

Tratándose de piezas prismáticas en compresión, estas deformaciones tienen sus peligros cuando la compresión puede dar lugar al pandeo de la pieza, ya que equivalen a disminuir el módulo con el tiempo y a facilitar el fallo.

La rotura por compresión, sobre todo bajo la acción de cargas permanentes o duraderas, se produce corrientemente por deformación y pandeo transversal localizado en las fibras o en los marcos que forman sus células (fig. IV. 1). Ello se produce con cierta lentitud, como en un fenómeno de tipo plástico, y puede dar lugar a que la pieza ceda después de meses de estar sometida a la misma compresión; cuestión que hay que tener en cuenta a los efectos de la seguridad.

La rotura por tracción, aunque puede ser brusca, no suele serlo tanto como en los materiales de tipo pétreo.

Cuestión muy importante, en la madera, es la de los enlaces para transmitir los esfuerzos de una pieza a otra.

La debilidad del enlace en las palazones clásicas se acusa mucho, sobre todo cuando quiere aprovecharse la resistencia a tracción del material. El enlace a tope, para

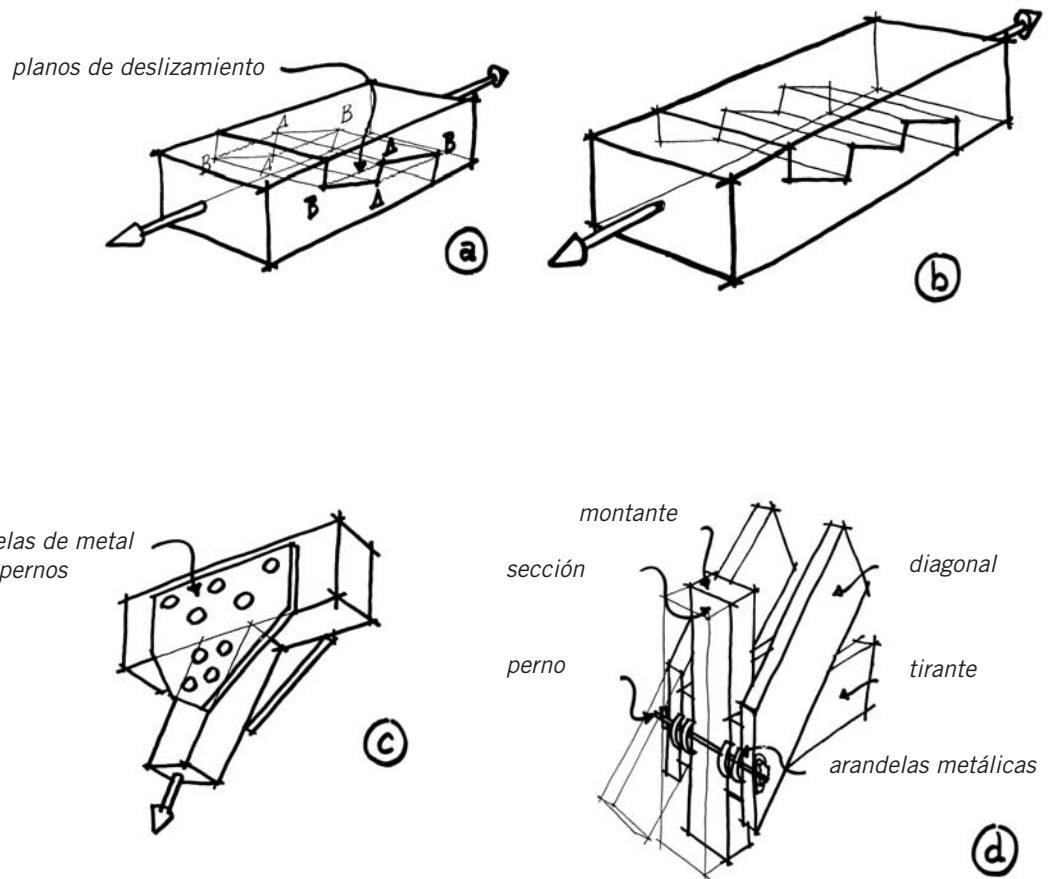


IV-1. Roturas de la madera, según el Prof. F. Stussi.

compresión, requiere un corte muy perfecto con objeto de asegurar el contacto en toda la superficie; de lo contrario, no sólo baja la resistencia, sino que, bajo compresiones fuertes, se produce un asiento muy apreciable del enlace. Hoy este defecto se corrige, cuando es necesario, rellenando la junta con mortero de cemento para asegurar el pleno contacto.

El enlace para tracción directa, en la construcción clásica, es imposible con la madera; es necesario convertir la tracción en esfuerzo cortante o en compresión, a través del enlace, mediante disposiciones especiales de éste. El ensamble llamado en rayo de Júpiter (fig. IV. 2a), transforma la tracción en compresión según el plano de asiento AA, requiriendo que las piezas resistan a esfuerzo cortante según los planos AB. Claramente se comprende que este enlace no puede resistir la totalidad del esfuerzo que admite la pieza, y constituye, por tanto, un punto débil. Si se quieren repetir los planos AA (fig. IV. 2b), la dificultad que se encuentra, para que todos estos planos trabajen a la vez, exige una perfección de mano de obra inalcanzable fuera de verdaderos trabajos de ebanistería.

El enlace con clavazón, bien por solape directo, bien con cubrejuntas, aprovecha parcialmente el rozamiento entre madera y madera por la presión que ejerce el clavo;



IV-2. Enlaces en madera.

pero, a la larga, las mermas y los movimientos de la madera hacen que, con el tiempo, se pierda total o parcialmente este tipo de resistencia. El clavo, por su parte, resiste difícilmente a esfuerzo cortante, puesto que la madera es mucho más blanda que él, y con facilidad se deforma por flexión, para, de ese modo, establecer un complejo estado de tensiones que permita la redistribución del esfuerzo entre los diferentes clavos del enlace; pero siempre lo hace con deslizamientos muy apreciables, entre una pieza y otra, en cuanto el esfuerzo adquiere cierta importancia. Por otra parte, se comprende claramente que un enlace de este tipo ha de trabajar en muy malas condiciones si el esfuerzo pasa sucesivamente de tracción a compresión y viceversa.

El enlace por clavazón, para ser totalmente eficaz, requiere disminuir el espesor de las piezas y la dimensión de las juntas, para prodigar éstas y aumentar las superficies de contacto en relación con las escuadrías. Grandes obras maestras de ingeniería, como la cimbra flotante del puente de Plougastel, han sido hechas con esta técnica. Aun cuando otros tipos de enlace, como el de aros o piezas metálicas análogas (fig. IV. 2c), ofrecen ventajas resistentes, el enlace por solape es siempre un punto



IV-3. Cimbra del viaducto de Longeray. De «Cent ans de béton armé».

débil, por la facilidad que ofrece de rotura por desgarro y deslizamiento de la madera paralelamente a sus fibras; y análogamente, los enlaces por chapas metálicas laterales y pasadores (fig. IV. 2d), aparte de resultar costosos, presentan debilidades parecidas por la concentración de tensiones que producen los pasadores sobre la madera en cuanto las mermas de ésta aflojan el rozamiento entre las chapas y las piezas ensambladas. Pudiera decirse que la madera, más próxima a lo humano que otros materiales, no se conforma con ser atada, y gusta cambiar de postura con cierta libertad.

La técnica actual busca otros derroteros y va logrando éxitos muy alentadores con las tablas encoladas mediante colas sintéticas y tratamientos especiales. Casi puede decirse que, al menos para los efectos estructurales que ahora interesan, se trata de un material diferente. La estructura, al hacerse monóxila, toma los caracteres propios de otros materiales, y su comportamiento, en conjunto, es totalmente diferente, así como lo es la técnica y el proceso constructivo. Las colas sintéticas y el secado por rayos infrarrojos o por diatermia han introducido una verdadera revolución en la técnica de la madera (fig. IV. 4).

El contrachapado fue su iniciación, dando lugar a un material isótropo en el plano; es decir, con análogas características mecánicas en las dos direcciones, longitudinal y transversal, pero sus aplicaciones han sido relativamente escasas en el campo de las estructuras. Las más importantes se han logrado gracias, por una parte, a los actuales tratamientos de la madera que aseguran su inalterabilidad frente a los agentes ecológicos, y a su mejor comportamiento elástico; y gracias a esas colas capaces de proporcionar al enlace resistencias análogas a las del propio material base, con buena



IV-4. Arco de maderos encolados.

estabilidad y durabilidad. Mucho queda, sin embargo, por hacer para poner esta técnica totalmente a punto y para lograr una aplicación económica de la misma; y, a su vez, la técnica estructural requiere adaptarse a las condiciones y ventajas que presenta el nuevo material.

Podría acabarse aquí la descripción de los materiales clásicos, pues apenas si se emplearon otros. La técnica estructural actual se desarrolló, lógicamente, al aparecer nuevos materiales y, particularmente, la fundición, el acero laminado y el hormigón armado.

Continuando el orden marcado por la historia de la técnica de la construcción se encuentra la fundición primero y el acero laminado después.

La *fundición* es un material de gran peso específico, de gran resistencia a compresión, y con una resistencia a tracción mucho mayor que la de los materiales pétreos y de la misma madera, pero mucho menor y menos confiable que su resistencia a compresión. Su comportamiento no es perfectamente elástico ni mucho menos; las deformaciones aumentan mucho más rápidamente que las compresiones que las producen; y las remanentes, al descargar por primera vez, son pequeñas, pero apreciables. Su coeficiente de dilatación térmica es elevado; el higroscópico, nulo; sus deformaciones espontáneas, apreciables en sus primeros meses de vida, carecen de importancia para nuestra técnica, aunque pueden tenerla para otras.

En fin, la *fundición* es previamente moldeable con la forma que se desee, dentro de unas determinadas reglas y limitaciones impuestas principalmente por su proceso de moldeo a alta temperatura con la consiguiente retracción por enfriamiento. Si ésta varía mucho de un punto a otro de la masa o si está coartada por el molde, produce tensiones parásitas importantes que pueden llegar a agotar su resistencia a tracción. Por todo ello, presenta limitaciones de espesor, tanto de tipo técnico de fabricación como de tipo económico. Es algo así como un hormigón mucho más homogéneo y resistente, pero que se diferencia esencialmente de él, por cuanto no es moldeable «in situ».

Aun cuando, en ciertas estructuras, se haya utilizado con formas de gran esbeltez respecto a los materiales pétreos, nunca puede alcanzar la de las estructuras de acero. Su utilización natural es en elementos mucho más robustos y pesados.

El enlace, por planos de junta atravesados por pasadores, es, igual que el material en sí, mucho más apto para soportar compresiones que tracciones. Las modernas y delicadas técnicas de soldadura de la fundición no han influido, hasta ahora, en sus limitaciones como material estructural.

Su empleo en arcos de puentes y en soportes de estructuras urbanas, en boga el siglo pasado, ha sido sustituido económicamente por el hormigón de un lado y por el acero laminado de otro, por lo que no interesa ocuparse ahora especialmente de él.

El *acero moldeado* y el forjado no pueden, en realidad, considerarse como materiales de construcción estructural, aun cuando se empleen, con ventaja respecto a la fundición, en ciertos elementos auxiliares o locales, como rótulas y rodillos de apoyo. Su elevada resistencia, tanto a tracción como a compresión, análoga o superior a la del acero laminado, no compensa los sobrecostos y dificultades inherentes a su proceso de fabricación, y el escaso uso que del acero forjado se hizo en la antigüedad, para llaves de atado en la cantería, ha caído totalmente en desuso.

El acero laminado es el material que, por unos decenios, amenazó con desbancar a todos los restantes y monopolizar las estructuras. Sin haberlo logrado, continúa siendo insustituible en la realización de las grandes alturas y de las mayores luces de la construcción.

El acero es un material mucho más técnico que los materiales clásicos; y su comentario ha de ser forzosamente de diferente estilo, porque, en él, lo tensional es fundamental.

Antes de entrar en ello conviene observar que el acero no ha logrado, al menos hasta hoy, expresar valores análogos a los de la piedra, la madera o el mismo ladrillo. Salvo en la gran obra de ingeniería, donde se defiende malamente con la pintura, en el resto de las construcciones se oculta vergonzosamente vistiéndose con galas ajenas. Y no es su color solamente lo que crea este complejo; es también lo obligado, duro e inflexible de sus formas laminada. No puede, como la madera, enseñar la variada verdad de sus fibras; y los tendones de sus alas y cabezas, en los perfiles, se le salen, dejando al desnudo, en las estructuras, ese carácter esencialmente tendinoso que pide tan frecuentemente envolverse con una piel de otros materiales.

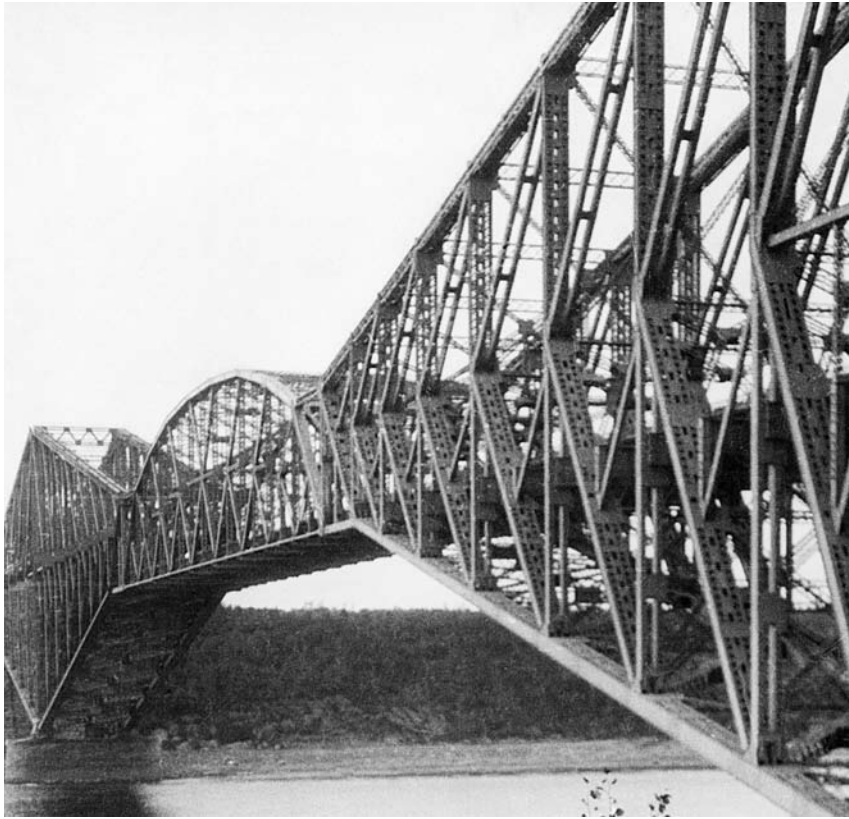
En él, es su tenaz resistencia lo que predomina, sus aristas las que nos hieren, su potente ligereza la que nos subyuga. Es en el conjunto estructural, donde puede buscarse su belleza; nunca en sus piezas ni en las calidades aparentes de su superficie. La morfología de sus elementos suena siempre, o a hueco en sus formas cerradas, o a algo extravertido en las abiertas, incapaces de encerrar sus elementos esenciales dentro de un perímetro armónicamente unitario.

Es todavía algo rudo, áspero, primitivo, como cactus inhóspito; pero ágil y fuerte y, en el fondo, mucho más dúctil y confiable de lo que aparenta. Poco a poco se ha ido aprendiendo a comprenderle, y algo ha ido amoldándose, él también, a las humanas exigencias estéticas; pero nunca presentará tan fácil adaptabilidad y tan variadas posibilidades de forma como otros materiales. El acero es el material de mayor coste volumétrico y de más elevada capacidad tensional, pero es, al mismo tiempo, el de más exigente determinismo morfológico, como consecuencia del proceso de laminación.

Los perfiles de chapa delgada, embutida o estirada en frío, que están actualmente en pleno desarrollo, representan una nueva técnica muy prometedora, no sólo en cuanto a ligereza, sino también por los nuevos caminos que abren a la evolución de las formas resistentes permitiendo liberarlas, en parte, de las limitaciones de la laminación, aun cuando sólo sea para elementos relativamente pequeños.

El acero laminado tiene, de semejante con la madera, su llegada a la obra en forma de piezas prismáticas rectas —las chapas podrían asimilarse a los contrachapados—, su resistencia sensiblemente igual a tracción que a compresión e, inclusive, sus problemas y técnicas de enlace. También presenta una cohesión menor en el sentido normal a las fibras que en el longitudinal; pero, la diferencia es mucho menor que en la madera.

En consecuencia, al ser la resistencia a esfuerzo cortante poco menor que las resistencias a tracción o compresión, el espesor del alma, en las piezas en flexión, puede disminuirse; y éstas adoptan la sección típica en I, o en [para formar perfiles compuestos, ya que las secciones cerradas o tubulares no se prestan bien a la fabricación por simple laminación.



IV-5. Puente del Quebec.
Fotografía: A. Torroja.

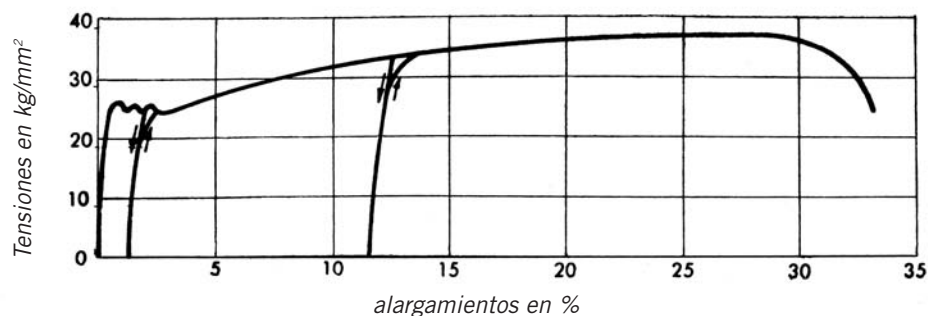
Como la resistencia del material es muy alta, las piezas pueden ser muy esbeltas; y, tanto para darles la mayor rigidez posible con el mínimo de masa, como para facilitar los enlaces, se adoptan también las formas en Γ , Z , etc., siempre dentro de un número limitado de tipos y tamaños, del que el proyectista no puede salirse.

Tratándose de piezas prismáticas, de escasa sección respecto a su longitud, interesa especialmente su comportamiento a tracción y compresión longitudinal y, en consecuencia, a flexión.

Refiriéndose, ahora, exclusivamente a los aceros semidulces normales en construcción, se observa que el material se mantiene sensiblemente elástico hasta un determinado límite elástico aparente. Cuando se trata de sobrepasarlo, el material sufre un relajamiento con grandes alargamientos, sin variar la tensión, o con variaciones muy pequeñas de ésta, determinando el llamado escalón de fluencia (fig. IV. 6). Por último, si se sigue aumentando la carga, se produce la estricción y, en fin, la rotura.

Si se ha sobrepasado el límite elástico aparente —con grandes deformaciones remanentes, naturalmente—, y se ha dejado descansar el material durante unos días a temperatura normal, el material funciona nuevamente en régimen elástico para las nuevas sollicitaciones que no alcancen el valor de la anterior; es el fenómeno de elevación del período o domino elástico del material por estirado en frío, que se ha utilizado especialmente para poder aumentar las tensiones de trabajo en las armaduras del hormigón; pero, éste es problema aparte.

IV-6. Diagrama alargamientos-tensiones del acero.



No es éste lugar de entrar en comentarios sobre las causas de estos comportamientos. Evidentemente, la naturaleza policristalina del material y la coexistencia de fases cristalinas y amorfas, con ordenaciones especiales en las superficies intercristalinas y posiblemente con migraciones de determinados átomos, por efecto de los deslizamientos tensionales, requiere estudios y comentarios que llevarían demasiado lejos del problema puramente técnico y de aplicación que aquí se trata.

El hecho fundamental es que, después de un período elástico, al llegar las tensiones a un determinado valor, el material es capaz de aceptar deformaciones irreversibles mucho mayores que las elásticas, manteniéndose la tensión sensiblemente constante; y, en fin, ofrece un amplio período suave de pre-rotura.

Por lo demás, el acero no presenta retracción ni deformaciones higroscópicas, ni diferidas, mientras las cargas de trabajo y las temperaturas sean las normales. El coeficiente de dilatación térmica, por el contrario, es bien apreciable y más elevado que en la mayoría de los materiales pétreos.

Los propios esfuerzos inherentes al proceso de laminación y a la desigual contracción térmica, de un punto a otro del perfil, cuando el enfriamiento no se ha producido uniformemente, dan lugar al establecimiento permanente de tensiones parásitas que, en algunos casos de grandes perfiles, han llegado a producir, por sí solas, la rotura brusca y espontánea de la pieza (fig. IV. 7). Sin llegar a estos extremos, verdaderamente excepcionales, la cuestión tiene importancia cuando se trata de estructuras soldadas.

Las causas de la rotura frágil —llamada también por decohesión, y que se caracteriza por la ausencia del período previo de deformación plástica o dulce— han sido muy estudiadas recientemente, por haber intervenido en accidentes tan graves y espectaculares como las roturas de ciertos barcos y puentes soldados e, incluso, de algunos roblonados.

Uno de los factores que influye es la temperatura. La de transición, para la cual el material pierde ductilidad, varía de unos aceros a otros, pero anda por los límites prácticos inferiores a los que interesan en estos climas, al menos para los aceros y técnicas normales de construcción.

Probablemente, en la rotura frágil del acero, influyen muchos factores, tales como: composición metalográfica, temperatura, rapidez de la puesta en tensión, superposición de tensiones parásitas, etc.; pero tiene, en ella, importancia especial y decisiva el

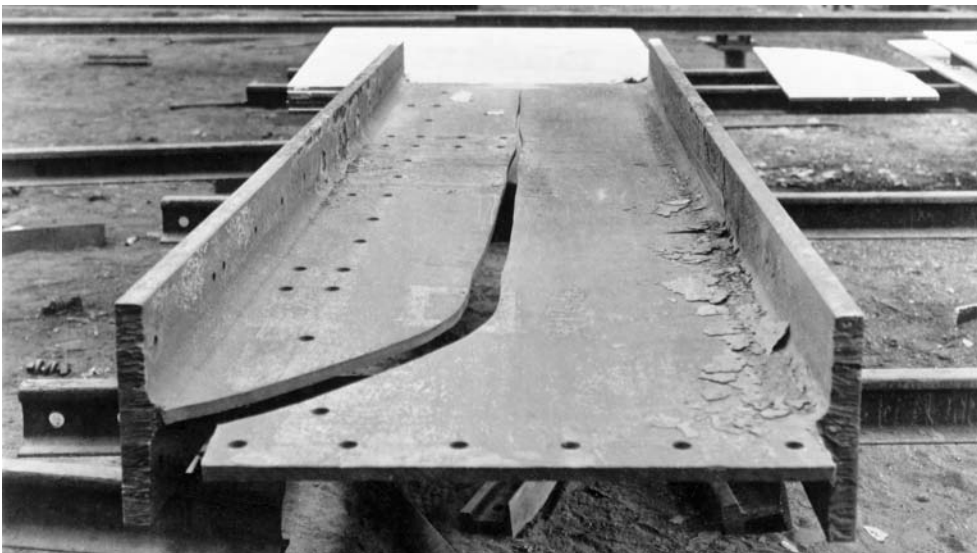
tipo de sollicitación tensional. Los estados de equitración o de tracción triaxil producen siempre una marcada tendencia a la rotura por separación, en lugar de la de deslizamiento. Hasta qué punto la bitración, en el plano de las chapas con fuerte espesor, pueda dar lugar al mismo fenómeno, con la colaboración de la anisotropía producida por el laminado, así como la técnica de ensayo más apta para detectar el fenómeno, son cuestiones sobre el tapete, cuyo comentario no cabe en estas páginas.

Pero lo que no tiene duda y presenta enorme importancia para el técnico constructor, es que todo estado de tracción triaxil, como los producidos en ciertos casos por entalladuras, oclusiones, ángulos entrantes, etc., son estados peligrosos y favorables a roturas de este tipo frágil; es decir, roturas en las que falta el aviso previo que proporcionan las grandes deformaciones de pre-rotura en un material normalmente dúctil —como es el acero que se emplea corrientemente—, y cuya ductilidad es precisamente la base de la eficacia y seguridad de la mayor parte de las disposiciones y tipos de enlace utilizados.

Fuera de estas condiciones especiales y anormales que conviene evitar, el agotamiento resistente del acero normal se produce siempre dúctilmente, por su entrada en el escalón de relajamiento o fluencia. Solamente cuando las cargas obligan a sobrepasarlo, y después de alcanzarse deformaciones muy grandes, aparece la estricción y, por fin, la rotura.

Igual que en la madera —con la cual, como se va viendo, tiene el acero más semejanza de lo que a primera vista pudiera creerse—, el problema del enlace en las estructuras metálicas es importante y delicado.

Hasta hace poco, no se conocía más solución de este problema que el roblón, traducción metálica del clavo de la madera. El roblón establece, mejor que el clavo, la fricción entre las superficies que cose; y su propia resistencia al deslizamiento es también mayor, por cuanto los materiales son, aquí, de análogas características resistentes. Sin embargo, el estado de tensión, en y alrededor del roblón, es muy complejo;



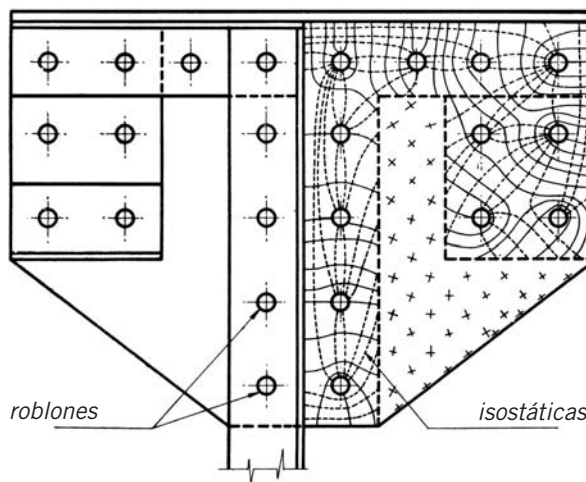
IV-7. Rotura espontánea por tenseinos parásitarias de laminación. Fotografía: Prof. F. Campus.

y, si se trata de varios roblones, la complejidad es todavía mayor (fig. IV. 8). Alrededor del roblón, como alrededor de todo orificio, se producen puntas de tensión muy elevadas; la red de isostáticas se altera, por efecto, tanto de los agujeros como de las fuerzas concentradas que establecen los roblones. El reparto de fuerzas, entre ellos, viene influenciado por las deformaciones tensionales de las chapas a través de las cuales se transmite el esfuerzo. En general, junto al enlace, una buena parte de la sección de la pieza queda sin trabajar, concentrándose las tensiones hacia las inmediaciones de los roblones; y, en fin, si el enlace resulta eficaz, es gracias a que el material, antes de romperse, acepta deformaciones importantes de tipo plástico localizadas en las zonas más cargas, produciendo una distensión y una regularización del régimen tensional.

Esta es —y frecuentemente habrá de volverse sobre ella—, la ventaja principal del acero semidulce en construcción: su ductilidad y su tenacidad, que le permiten amoldarse, aceptando sin romperse los deslizamientos necesarios para rebajar las puntas locales de tensión.

Puede asegurarse que el acero ideal para las construcciones no es el hidalgo de las espadas toledanas, cuyo duro temple, si le permitía curvarse con elegante cortesía, le obligaba a quebrarse antes de aceptar una doblez. Es, por el contrario, el que, sin merma de su fortaleza, acepta el trabajo de la lima, del punzón o de la taladradora; y el que, ante un exagerado esfuerzo, sabe ceder con prudencia, y amoldarse a una forma que le permita redistribuir sus tensiones para mejor soportar la carga, manteniendo firme su tenacidad aun en el momento extremo de obligarle a rendirse.

Si el material fuera perfectamente elástico hasta rotura, nada de esto sería posible, y el enlace roblonado perdería la mayor parte de su eficacia. Por eso, los aceros duros y templados no se prestan bien a este tipo de enlace; y, aun en los semidulces, hay que cuidar de evitar toda grieta o entalladura normal a la tracción (como las que se presentan alrededor de taladros simplemente punzonados, sin el escarificado posterior). El material, alrededor de estas grietas, ha sufrido una fuerte deformación en frío que, como se indicó anteriormente, ha podido absorber una gran parte de la aptitud de deformación plástica del material; y con el material agrio, la punta de tensión,



IV-8. Líneas isostáticas en junta roblonada. De «L'Elasticité», del Profesor M. Baes.

provocada por la entalladura, es capaz de producir, por sí sola, la rotura brusca, como ha sucedido en alguna ocasión.

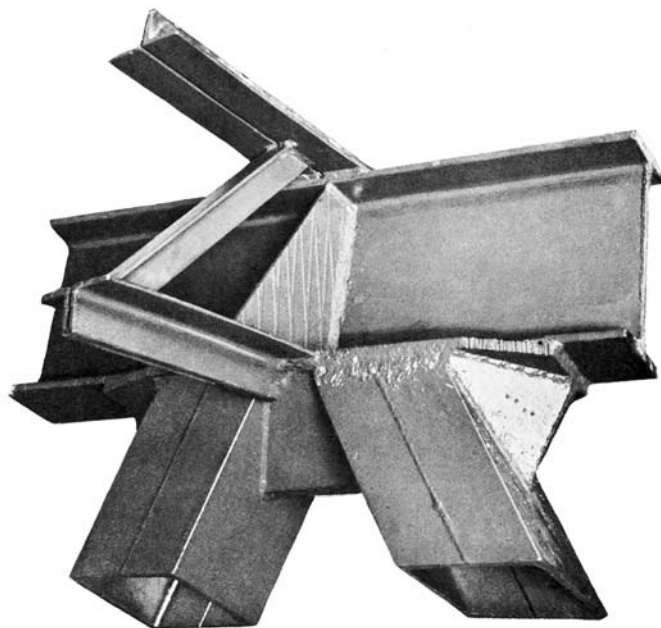
Todo esto no quiere decir que la roblonadura sea un mal sistema de enlace; no, su eficacia está avalada por un siglo de éxitos crecientes. Lo único que quiere decir es que estos éxitos son solamente posibles gracias a las especiales características mecánico-resistentes del material; y que no es una solución ideal teóricamente perfecta, como se comprende por la simple observación de la red de isostáticas (fig. IV. 8), y de las concentraciones de tensión que se producen en su seno.

Por consiguiente, aun cumpliéndose todas las reglas y reglillas que se dan en los libros de texto para las disposiciones de los roblonados, tamaños, separaciones, etc., es siempre conveniente reducir, en lo posible, la importancia y repetición de éstos, cuidar de que en ellos las curvaturas de las isostáticas sean mínimas, y evitar las concentraciones de tensión, las discontinuidades o cambios bruscos de sección y todo lo que pueda dar lugar a estados de bi o tritracción acusados.

En los últimos decenios se ha desarrollado mucho el enlace por soldadura, principalmente la soldadura eléctrica con electrodo revestido y técnicas análogas. La soldadura presenta, a su vez, ventajas e inconvenientes dignos de estudio.

La soldadura permite el enlace directo a tope, imposible con el roblonado; permite, también, la soldadura por solape con cordones transversales o longitudinales respecto a la dirección del esfuerzo; y da una libertad de enlace, incluso en planos oblicuos, que no permite el roblonado (fig. IV. 9)

Indudablemente la soldadura a tope presenta ventajas sobre las otras. Las tensiones se pueden transmitir, a través de ella, podría decirse, con naturalidad; es decir, sin alteraciones de la red de isostáticas, igual que en un enlace monolítico, como si la



IV-9. Enlace en el puente de Tordera.

discontinuidad del enlace no existiese. El aprovechamiento del material, en estas condiciones, es mucho mejor y permite, por tanto, una sensible economía de acero en el conjunto de la estructura.

Sin embargo, ni siempre es esto posible, por dificultades constructivas, ni deja de producir estados de tensión anormales, por efecto, principalmente, de las deformaciones térmicas consiguientes al propio proceso de la soldadura. Al ir depositando el material de aportación a la temperatura de fusión, en cordones sucesivos sobre el material base, que se mantiene a temperatura normal fuera de la zona inmediata a la soldadura, las dilataciones y contracciones térmicas –desiguales en cada momento, de un punto a otro, tanto durante la operación de soldar como una vez terminada ésta durante el enfriamiento– provocan estados de tensión de gran complejidad que, en gran parte, desaparecen por distensión gracias a la ductilidad del material a alta temperatura; pero que, en parte, quedan, por así decir, congeladas por efecto del enfriamiento y vuelta del conjunto a la temperatura normal.

Mucho se ha discutido sobre la importancia apreciable o despreciable de estas tensiones residuales en la resistencia final de la soldadura o en la de la pieza en las zonas próximas a quélla. Al efecto, conviene distinguir dos tipos de tensión: uno es el que se produce en el conjunto de la pieza, por efecto de la contracción de la soldadura, cuando la libertad de acortamiento de la pieza está más o menos coartada por sus enlaces con el resto de la estructura; otro es el de las tensiones residuales locales que se producen aún cuando los otros extremos de las piezas estuviesen totalmente libres. Las del primer grupo son tensiones residuales con resultante exterior a la soldadura; y las del segundo, sin resultante exterior. Las primeras son tensiones secundarias, que en la estructura introduce la soldadura; las segundas son tensiones parásitas –como las de laminación antes citadas–, que mantienen la pieza secretamente dentro de sí, sin comunicárselas al resto de la estructura en la que se engarza la pieza.

Ambas son de tipo hiperestático; pero, así como las secundarias son introducibles en el cálculo de la estructura en cuanto se conozca el valor de la contracción, las parásitas quedan al margen de este tipo de cálculo y requieren, para su determinación, estudios muy complejos y delicados que, los especialistas, hoy por hoy, no pueden todavía vanagloriarse de haber terminado.

Se dice que este género de tensiones residuales no tiene importancia, porque, al superponerse al esfuerzo producido por las cargas exteriores, lo único que puede ocurrir es que, allí donde las tensiones sobrepasen el límite elástico, se produzca una distensión por deformación plástica con la consiguiente uniformación del régimen de tensiones, que anulará o disminuirá, en definitiva, las tensiones inicialmente existentes. Sin embargo, esto no es tan general como pudiera parecer a primera vista. Basta hacer una abertura circular en una chapa y soldar otra, dentro de ella, con objeto de restablecer la continuidad de la chapa, para que la soldadura salte o el conjunto se alabee y retuerza como comprueba el ensayo que el Profesor Campus ha hecho ya clásico. Es, pues, necesario cuidar que la estructura no ofrezca una rigidez excesiva frente a la inevitable contracción de la soldadura; y que ésta no dé lugar a tritricciones, o bitricciones en el plano de la chapa, demasiado fuertes e isótropas.

Todo esto enseña que hay casos en los que las tensiones parásitas, lo mismo que las secundarias de la soldadura, pueden tener importancia; y que, o se utilizan conscientemente para compensar parte de los esfuerzos a que va a someterse posteriormente la estructura o conviene disminuirlas, en lo posible, mediante un acertado orden de ejecución de las soldaduras y de sus cordones sucesivos.

El forjado en frío de la soldadura con la oportuna introducción de deformaciones plásticas, que regularicen y disminuyan las tensiones parásitas, o el normalizado posterior de las piezas, mediante un calentamiento y enfriamiento oportunamente regulados, son procesos que se van introduciendo en la técnica de soldar y que se consideran incluso imprescindibles en ciertas construcciones muy rígidas, como tuberías de presión, etc.

Ciertamente, en las estructuras lineales o entramados, manejados con buena técnica, con aceros semidulces de buena calidad, con buenos electrodos y buenos soldadores, los efectos de los parásitos de soldadura, no han producido accidentes mientras los espesores no fueron demasiado fuertes, mientras las piezas y sus enlaces no dieron lugar a bi o tritricaciones peligrosas y, en fin, mientras la excesiva rigidez estructural no se prestase a ello. Pero, no hay que olvidar que basta, por ejemplo, soldar, a un perfil en tracción, una chapa transversal (fig. IV. 10) para que la red de isostáticas se incurva dando lugar a tracciones en la dirección normal al esfuerzo principal. No es que se trate de una disposición prohibitiva ni mucho menos, pero sí de un punto que no hay que despreciar si se pretenden apurar las tensiones de trabajo a límites algo atrevidos.

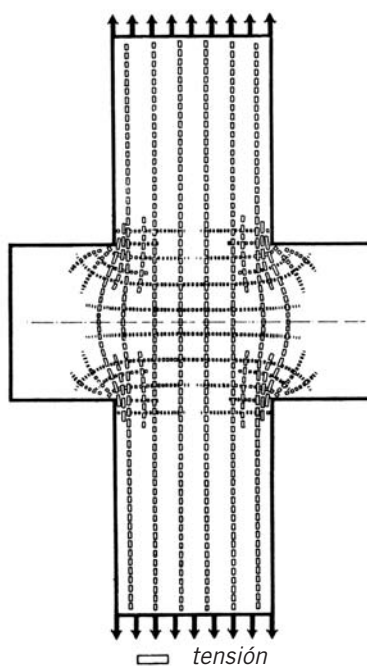
Todo esto, unido a la conveniencia de que el operario pueda realizar las soldaduras en horizontal o con poca inclinación, hace que las estructuras soldadas requieran un tratamiento y un técnica especiales que el proyectista y el constructor han de conocer a fondo para no exponerse a fracasos como los habidos en varios casos. La cuestión, por otra parte, va unida a la de la soldabilidad del material base y del de aportación, así como al proceso mismo de soldadura, en continua evolución. Pero, afortunadamente, se ha llegado a un perfeccionamiento tal que la soldadura con buena técnica permite estructuras tan confiables como las roblonadas y que permiten un aprovechamiento mucho mejor de los aceros normales que el clásico roblonado.

El acero, por su elevado módulo y por su alta birresistencia —a tracción y a compresión—, es un material insustituible, hoy por hoy, en un amplio campo de construcciones; pero, presenta el grave inconveniente de su fácil oxidación, aun en ambientes relativamente secos. Ciertamente existen aceros inoxidable; pero su elevado coste y sus dificultades de enlace, mayores que las del acero normal, hacen que no puedan considerarse todavía como materiales utilizables normalmente en la construcción, donde los volúmenes son siempre grandes respecto a otros usos. Otros aceros, sin ser totalmente inoxidables, resisten mucho mejor que el acero corriente. Sin embargo, siempre es necesario recurrir a pinturas o revestimientos especiales para defenderlos de la oxidación; y bajo la acción continuada del viento, la lluvia, el sol, etc., se requiere repetir periódicamente esta pintura. Ello representa un sobrecosto, una servidumbre en la utilización de la estructura y, en definitiva, una mengua de su durabilidad respecto a los materiales pétreos, cerámicos, hormigones, etc.

La técnica actual tiende a utilizar la tenacidad del material, introduciéndola en el cálculo de diferentes formas. Por ejemplo, para suprimir las puntas del diagrama de momentos flectores y de tensiones longitudinales que se producen sobre los apoyos de vigas continuas.

La cuestión lleva de la mano a hablar de fatiga, o sea, de la baja de resistencia que experimentan los materiales al someterlos a un gran número de ciclos repetidos de carga y descarga o, más aún, a ciclos alternativos en los que la tensión cambie de signo, pasando de compresión a tracción y viceversa.

Si se pasa el límite elástico, la rotura suele venir con muy pocas repeticiones; por eso, el aprovechamiento de estados postelásticos del acero semidulce, no es posible más que para la acción de pesos muertos y no para las sobrecargas frecuentemente repetidas. Pero aun sin llegar al límite elástico, es frecuente que la resistencia del material baje a la mitad, al cabo de un gran número de repeticiones (por encima del millón), y que la rotura se produzca entonces bruscamente. Como el peligro y la baja resistencia es tanto menor cuanto menos es la relación entre la tensión máxima y la mínima en los ciclos antedichos, la cuestión no suele tener tanta importancia en estructuras de construcción como en otros elementos mecánicos. Pero hay casos, como cimentaciones de máquinas oscilantes o puentes de ferrocarril, sometidos a las oscilaciones de las locomotoras y a los choques repetidos que originan las juntas de carril, etc., en los que el número de repeticiones, durante la vida de la obra, puede ser suficientemente grande para dar lugar a caídas de resistencia más o menos pronunciadas; y todo ha de tenerse en cuenta al elegir el material y el tipo de estructura de la construcción.



IV-10. Plexo tensional en un alma con rigidizadores.

Por eso, los técnicos de estructuras metálicas, especialmente las soldadas, se ocupan, cada vez más, de la resiliencia, corrientemente medida por el trabajo absorbido en la rotura de un determinado tipo de probeta fuertemente entallada y sometida a flexión por una carga brusca. Todo esto y mucho más, en lo que ahora no puede entrarse, interesa especialmente cuando se trata de utilizar aceros especiales para permitir una mayor ligereza y economía de la estructura; porque no hay que olvidar que la elección del material y del tipo de ensamble es fundamental. No puede empezarse a proyectar sin haber meditado antes sobre esa elección muy cuidadosamente, puesto que, en general, cuanto más alto es el límite elástico y la resistencia del acero, menos dúctil resulta y más expuesto a roturas bruscas, especialmente si la estructura es muy rígida.

El hormigón armado, el pretensado y la prefabricación

El hormigón armado constituye un nuevo material con características totalmente diferentes del hormigón y del acero, aun cuando, dentro de él, estos elementos mantengan, de por sí, sus propias cualidades; o precisamente por ello.

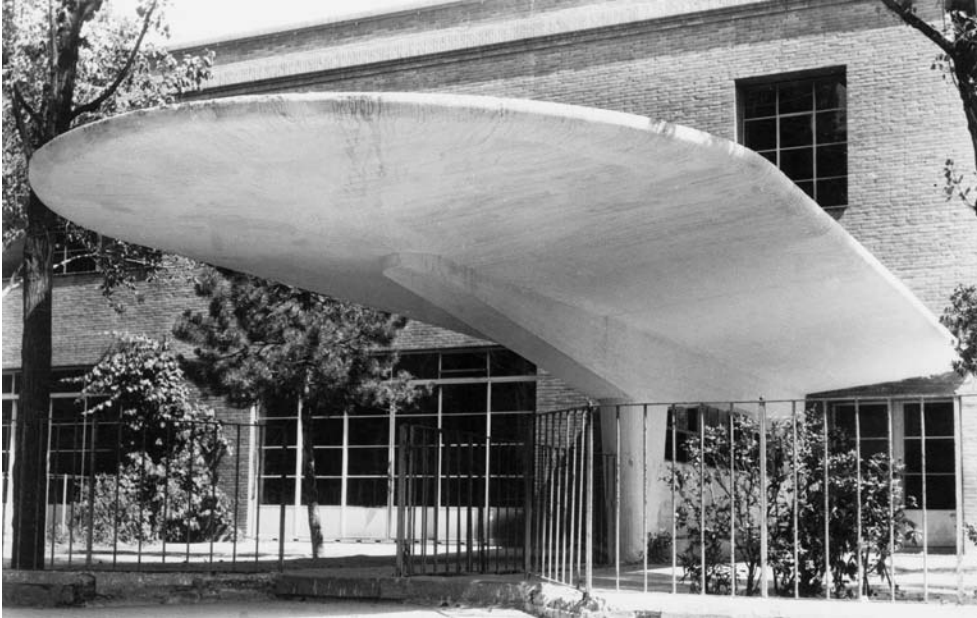
Con acierto se ha dicho que, en el hormigón armado, el acero da fibra a la piedra, mientras el hormigón da masa al acero. El hormigón armado es una piedra orgánicamente constituida, dentro de cuya masa el complejo tendinoso de la armadura se distribuye óptimamente, se dosifica para prestar al hormigón la resistencia a la tracción que necesita en cada punto, y se orienta y se refuerza según las exigencias del plexo tensional previsto. Es, por eso, el material más técnico de todos y el único al que verdaderamente puede aplicarse el título de material «adecuado-resistente».

Esta antítesis frente al comportamiento frangente del hormigón en masa, cuya apariencia externa mantiene el nuevo material, ha requerido muchos años para ser asimilada por los artistas y por los mismo técnicos encargados de cultivar el desarrollo de sus formas naturales, cuya evolución aún no se ha completado del todo, pero que va culminando ya en originalísimas concepciones. Porque el hormigón armado es el único material cuyo comportamiento estructural no puede enjuiciarse por los solos valores somáticos aparentes, puesto que el alma resistente, que es la armadura, se oculta en su interior, y hay que imaginarla dando a la piedra clásica un nuevo vigor y una tenacidad desconocidos en los engendros de la naturaleza inorgánica.

En el hormigón, salvo casos especiales, las armaduras no van enlazadas entre sí, con roblones, soldaduras ni elementos análogos. El trabajo conjunto va confiado a la adherencia –incluida en ella el rozamiento entre el hormigón y el acero– y, tanto por esto, como por razones de economía, las armaduras están formadas normalmente de barras redondas con diámetros que rara vez superan los 35 milímetros y que presentan modernamente pezones o nervaduras en la superficie para impedir su deslizamiento dentro del hormigón.

En estas condiciones, y con buenos recubrimientos, queda suficientemente asegurada la transmisión de los esfuerzos de las armaduras al hormigón que las rodea y viceversa. Al mismo tiempo, la relativa impermeabilidad del hormigón y la alcalinidad del ambiente, en su interior, aseguran, prácticamente, la inoxidabilidad del acero, dando al conjunto unas buenas condiciones de durabilidad, siempre que, como antes de ha dicho, los recubrimientos y la calidad del hormigón estén a tono con las condiciones ecológicas a que haya de estar sometido.

El hormigón armado no fue, inicialmente, ningún producto de la Ciencia ni de la Técnica. Es difícil que hubiera podido idearse y confiarse en su eficacia si la realidad no hubiera venido a probársela a sus propios inventores, inconscientes del valor y posibilidades de lo que inventaban; porque es, todavía hoy, difícil de justificar el



V-1. Voladizo en el Instituto Ramiro de Maeztu, Madrid. Arquitectos M. Domínguez y C. Arniches. Ingeniero E. Torroja. Fotografía: M. García Moya.

comportamiento conjunto del hormigón y del acero en esta extraña coyunda. Cuando Monier empezó a hacer sus tiestos de mortero armado con alambres, mal podía imaginar que estaba creando un material con el que, pocos lustros después, se había de llegar a construir puentes y estructuras que dominaron en dimensiones todas las que él conocía.

Teniendo el hormigón y el acero coeficientes de dilatación sensiblemente diferentes, poseyendo el hormigón unas deformaciones higroscópicas y una retracción inicial que no tiene en absoluto el acero, y siendo diferentes sus comportamientos tensionales, como se ha visto, es necesario recurrir a otros fenómenos de adaptabilidad y a explicaciones, que tanto tienen de sutiles como de obtusas, para demostrar que el acero va a mantenerse dentro del hormigón sin roturas ni deslizamientos relativos. El hecho es que, el hormigón y el acero se mantienen unidos como un sólido único, gracias a ese conjunto de características no elásticas, a esas condiciones de adaptabilidad, de capacidad de distensiones locales y hasta de microfisuraciones y recristalizaciones en la pasta, sin rotura propiamente dicha, etc.

Ciertamente, la retracción del hormigón tiende –y lo logra en parte– a poner las armaduras en compresión, quedando él en tracción; pero, la deformación lenta amortigua el efecto perjudicial y no se llega a roturas peligrosas mientras las cuantías, los anclajes, los recubrimientos y tantos otros detalles se mantengan dentro de los límites que la práctica y la experimentación han ido estableciendo para formar la técnica específica del hormigón armado.

Por eso, el técnico ha de ser muy estricto en mantenerse dentro de esas reglas, o ha de preocuparse por conocer muy a fondo todos estos comportamientos, sus causas, concausas y mutuos efectos –con cuyo estudio es fácil llenar obras mucho más extensas que ésta–, antes de atreverse a contravenir esas reglas o a extrapolarlas con nuevas ideas y disposiciones.

Bastará que aumente la cuantía de las armaduras y su diámetro para que el hormigón se rompa, por retracción, cortando la continuidad resistente de la pieza; o que, en una placa, se separen excesivamente las barras para que se agriete entre barra y barra. Y ejemplos como éstos pueden citarse a montones.

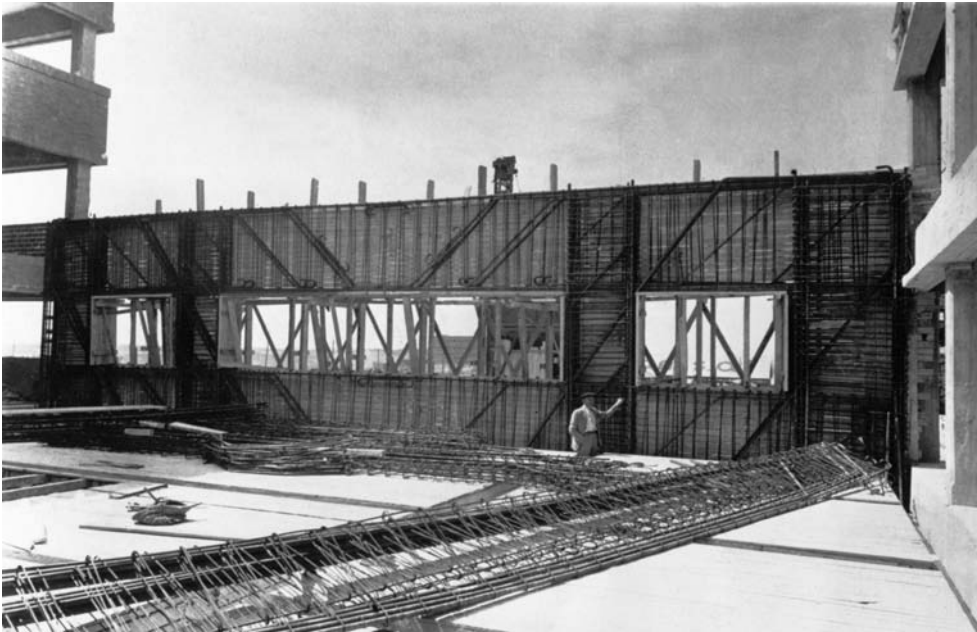
Esto no quiere decir que, en el hormigón armado, todo esté tan definido y ordenado que le reste libertad de movimientos al proyectista. Todo lo contrario; el hormigón armado se caracteriza, a los efectos del proyecto, precisamente por dejar en manos del proyectista muchas más teclas que tocar. El hormigón no viene, como el acero, en perfiles de catálogo; su forma y dimensiones quedan por elegir. La armadura puede aumentarse o disminuirse, repartirse o concentrarse en determinada cara por una parte y pasarse a la opuesta en otra zona, como se hace corrientemente en las vigas continuas; cada barra puede ir variando de dirección según lo pidan los cambios de dirección de las tracciones; y si el acero, en sus perfiles compuestos, puede variar la resistencia con el suplemento de nuevos palastros en cabezas, el hormigón permite ir variando todas las dimensiones de cabezas y de alma y todas las cuantías para aprovechar al máximo ambos materiales en cualquier sección.

Es precisamente esta libertad la que hace las estructuras de hormigón armado más prolijas de proyectar; porque, en ellas, hay más cosas que se han de elegir y detallar; elección que, por otra parte, ha de hacerse siempre pensando en las posibilidades y facilidades de ejecución, tanto en cuanto al encofrado, como a las armaduras y al propio vertido y apisonado del hormigón.

La idea matriz del hormigón armado es lograr un material en el que las tracciones sean resistidas por las armaduras, y las compresiones por el hormigón, que resulta más económico para este tipo de esfuerzos. Sin embargo, dentro del hormigón, las armaduras principales –bien enlazadas con otras transversales para evitar que aquéllas pandeen rompiendo el recubrimiento de hormigón– son no sólo capaces de soportar compresiones, sino necesarias para aprovechar al máximo la propia resistencia a compresión del hormigón.

Ciertamente el acero tiene un coeficiente económico-resistente en compresión desfavorable respecto al hormigón; llamando «coeficiente económico-resistente» al coste del material necesario para soportar la carga unidad en la unidad de longitud. Haciendo trabajar en compresión al hormigón a 50 kg/cm² y el acero a 1.200, es fácil comprobar que, mientras el precio del kilogramo de armadura no sea inferior a las tres milésimas del precio del m³ de hormigón terminado, no será económico el empleo de armaduras en compresión. Pero esto ni tiene un carácter general, ni quiere decir que no interese, incluso desde un punto de vista puramente económico, emplear armaduras de compresión en ciertas zonas o elementos de la estructura. El hormigón armado permite, en piezas comprimidas, realizaciones prácticamente inseparables con el hormigón en masa.

Pero la ventaja del hormigón armado es mucho más acusada en elementos sometidos a tracción o a flexión; porque, aun cuando la resistencia del hormigón a tracción fuese confiable, el escaso valor de la tensión admisible, que es del orden de un décimo del de la compresión, hace que la proporción de coeficientes económico-resistentes se invierta, dando la ventaja al acero.



V-2. Viga Vierendeel, en la Ciudad Universitaria, Madrid. Fotografía: Férriz.

No hay que olvidar, sin embargo, que la acción de las armaduras en tracción, no se encuentra limitada solamente por la tensión admisible en el acero, sino también por el peligro de fisuración en el hormigón circundante.

Como antes se comentó, es difícil justificar teóricamente la ausencia de fisuras en el hormigón armado; y es aún más difícil de prever la importancia de estas fisuras. Tanto o más que la cuantía, influye favorablemente la multiplicación y buen reparto de las armaduras y la disminución de sus diámetros. Con ello, y con una buena disposición de los enlaces, puede llegarse a casi garantizar la no aparición de fisuras apreciables; y en todo caso se acepta, para la mayoría de las estructuras, que las fisuras menores de un tercio de milímetro no tienen importancia, puesto que no se había contado con la resistencia a tracción; y puesto que, con esas aberturas, el peligro de oxidación de las armaduras sigue suficientemente alejado en ambientes normales.

Con el acero usual, trabajando normalmente, y con los límites de cuantía establecidos al efecto por las normas correspondientes, la fisuración, si aparece, no sobrepasa esos límites. Pero siempre es un defecto que conviene evitar, aun cuando sólo sea por el mal efecto que produce a la vista.

Todo esto hace que el empleo de aceros de más alta calidad, cuyo empleo tiene franco interés económico, se vea limitado por la fisuración del hormigón. No variando sensiblemente el módulo del acero, al aumentar su tensión de trabajo, aumenta su alargamiento, y aumenta la fisuración del hormigón colindante. Solamente gracias al empleo de armaduras corrugadas, de tipos especiales de laminación con pezones u otras formas y con diámetros pequeños, con buenas separaciones, recubrimientos, etc., se logra sacar todo el partido que ofrecen estos aceros.

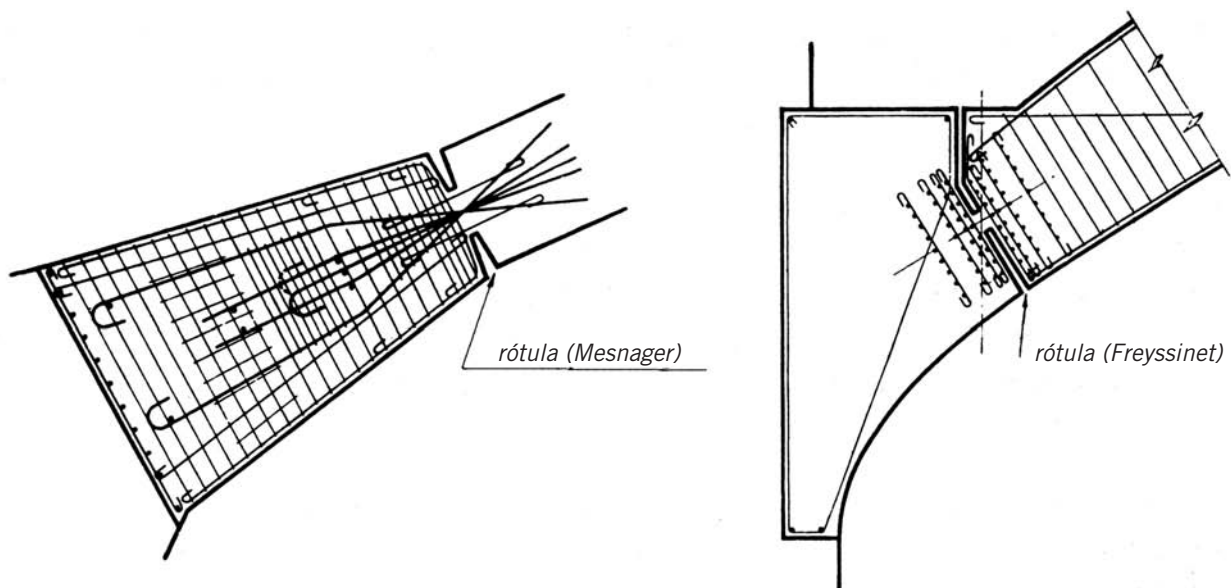
El problema del enlace, del que se trató con ocasión de la madera y del acero en las estructuras metálicas, desaparece prácticamente en el hormigón armado. La soldadura

o el simple recubrimiento resuelven fácilmente los empalmes de las armaduras; y la fabricación «in situ» del hormigón hace fácil el monolitismo en toda la estructura, cuando así se desea.

Por el contrario, las rótulas, rodillos de dilatación, etc., requieren, frecuentemente, elementos metálicos; sin embargo, como, en general, los ángulos de giro previsibles son pequeños, la rótula tipo Mesnager o la plástica de mortero, ideada por Freyssinet (fig. V. 3), dan resultados satisfactorios, sin casi aumento de coste ni de complicación de ejecución, especialmente ésta última.

En estos últimos años se viene extendiendo el uso del hormigón armado en elementos prefabricados para disminuir el coste de encofrados y cimbras, lo que le da un carácter y le plantea unos problemas totalmente diferentes. Como este tipo de construcción va más frecuentemente unido a la nueva técnica del hormigón pretensado, será mejor ocuparse, más adelante, de ambas cosas a la vez.

Antes de pasar a ello, es interesante citar, en realidad como un material diferente, la combinación del hormigón con la loseta de vidrio para formar lucernarios auto-resistentes. Contra lo que pudo pensarse en un principio, el elemento resistente es, en este caso, el propio vidrio más que el hormigón, porque la retracción y la deformación lenta de éste terminan por traspasar la mayor parte de las compresiones al vidrio, quedando el hormigón como simple elemento de enlace entre aquél y la armadura. El cálculo se hace como si se tratase de un vidrio armado, contando con los módulos de elasticidad respectivos del vidrio y del acero; y teniendo en cuenta las especiales condiciones de resistencia del vidrio que puede llegar a romper a largo plazo con cargas menores que las que se alcanzan en un ensayo breve. Todo esto, unido a las propias necesidades del lucernario, y a los diferentes coeficientes térmicos de vidrio y hormigón hace aconsejable, en general, reducir las secciones de hormigón, entre



V-3. Tipos de rótulas Mesnager y Freyssinet.

losetas de vidrio, al mínimo necesario para envolver las armaduras y los bordes de aquéllas evitando su contacto directo.

El hormigón pretensado, en el que las armaduras se tesan antes de verter y fraguar el hormigón, debe distinguirse del *hormigón postensado*, en el que aquéllas se tesan después de endurecido éste y quedan, bien al exterior —y, por así decir, independientes del hormigón durante toda la vida de la obra—, bien adheridas a él por la adición de nuevas masas de hormigón o de mortero. Sin embargo, el nombre de pretensado se ha generalizado para ambas técnicas.

Entre los materiales de construcción comentados, el hormigón pretensado es, a la vez, el más fino y el más complicado invento de nuestros días. Con él, la Construcción se separa ya netamente de ese carácter más bien burdo que la distinguía de otras técnicas. La primera vez que el autor enseñó los planos y explicó un proyecto de puente pretensado a un contratista clásico que deseaba construirlo, éste le dijo: «Supongo que todo eso lo habrá usted calculado para que, al pasar por el puente, suene la música; porque, de lo contrario, no veo para qué diablos quiere usted que nos compliquemos tanto la vida». Y, efectivamente, el arpa de un puente colgante no es nada frente a la menuda y repetida complicación que representa el ir atirantando tanto alambre, dentro de su alvéolo, hasta dar, a cada uno, su oportuna tensión.

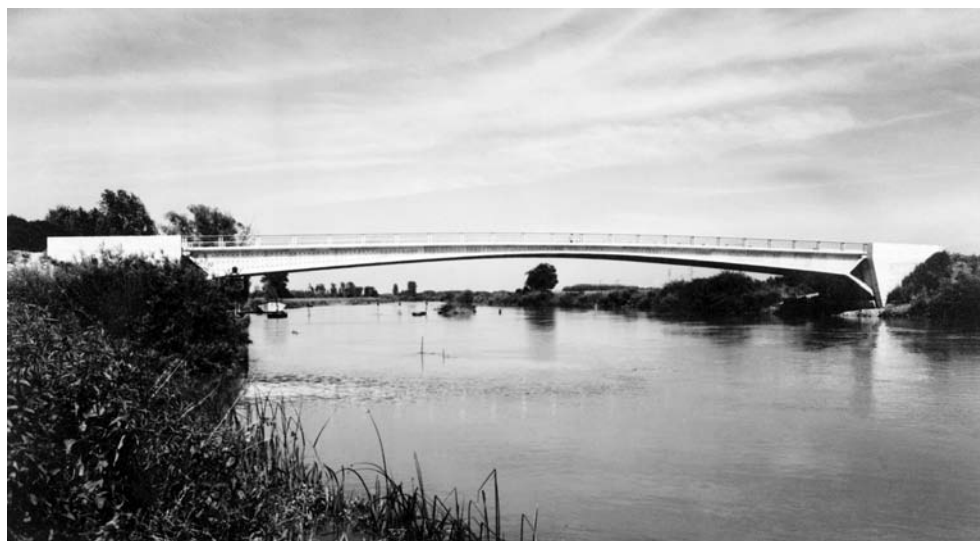
Los que se avienen mal con las incomodidades de un nuevo aprendizaje alegan siempre que el coste de la mano de obra ha de dar al traste con todas las hipotéticas economías de material que el proyectista imagina, desde su mesa de trabajo, lejos del tajo. Sin embargo, las desventajas económicas que, al principio, acusaban las obras pretensadas van desapareciendo; y hoy esta técnica gana terreno, haciendo esperar que vaya perfeccionando e industrializando, más y más, sus operaciones hasta alcanzar todos los beneficios que lógicamente debe prometer.

Una de las ventajas principales del pretensado deriva del mayor coeficiente económico-resistente de los alambres de acero especial que emplea y que alcanzan enormes resistencias gracias, en parte, al trefilado en pequeños diámetros.

El pretensado propiamente dicho se emplea casi exclusivamente para la fabricación de piezas en taller. Requiere el empleo de armaduras de muy alto límite elástico para que su alargamiento tensional sea grande; de ese modo, al sobrevenir la retracción y la deformación lenta del hormigón por efecto de la compresión que las armaduras tesas le imponen, lo que pierden éstas de tensión, al contraer con el hormigón, no es más que una parte alícuota pequeña de la tensión inicial a que fueron sometidas. Porque el principal enemigo del pretensado es su posible anulación, total o parcial, por efecto de la retracción y de la deformación lenta del hormigón en compresión. Esto hace que, en los cálculos del hormigón pretensado, haya de introducirse el tiempo como una nueva variable que, si no se tomasen las debidas precauciones, podría llegar a modificar totalmente el estado de tensión en el hormigón por efecto de las propiedades visco-plásticas de éste, ya citadas.

En realidad, hay que tener en cuenta, no solamente las deformaciones antedichas del hormigón, sino también las propias de estos tipos especiales de acero en alambre. El efecto del trefilado produce unas deformaciones de los microcristales del acero mucho mayores que la simple laminación; y su tendencia a orientarse, según el eje

V-4. Puente de l'Esby.
Ingeniero E. Freyssinet.
Fotografía: H. Baranger.



del alambre, en las capas superficiales del mismo, puede explicar el que, a tensiones inferiores a las del límite elástico, el alambre pueda acusar deformaciones lentas importantes, o producir distensiones relativamente grandes cuando se le mantiene tesado a deformación fija. El lograr calidades de acero y tipos de tratamiento, en los que estos efectos se reduzcan al mínimo, es un problema que los especialistas van resolviendo activamente.

En el hormigón pretensado, la tracción del acero y la compresión del hormigón –como fenómenos parásitos propios del material, independientes de los estados de sollicitación exterior a que se le someta después– se mantienen en buena parte, gracias a la adherencia entre la armadura y el hormigón. Se requiere, por tanto, el empleo de armaduras delgadas para aumentar la superficie específica, cuyo poder adherente se incrementa, aún más, dando a los alambres formas especiales de laminación. Pero, de no emplearse alambres exageradamente delgados, la adherencia no es suficiente para evitar el deslizamiento; y, en la práctica actual, se recurre siempre a sujetar las armaduras con pequeños anclajes especiales.

Con todo esto, se aleja el peligro de fisuración y, en cierto modo, se hace el hormigón apto para resistir tracciones; puesto que, al superponerse éstas a las compresiones debidas al pretensado se convierten en simples decompresiones.

Por otra parte, el hormigón se hace más dúctil al ir acompañado, en sus deformaciones, por estas armaduras polímitas, finas y muy repartidas, de acero en régimen elástico. Este fenómeno, que ya se nota en el hormigón correctamente armado, es mucho más apreciable aquí.

Otra ventaja del hormigón pretensado es que, aun cuando se le lleve a fisuración por efecto de una tracción algo excesiva, pero manteniendo la armadura en régimen todavía elástico, al descargar la pieza, se cierra automáticamente la fisura sin que sea posible después reconocerla a simple vista.

Por otro lado, el proyectista ha de tener en cuenta dos limitaciones específicas de ciertas estructuras pre o postesadas. Una es que los alambres no pueden curvarse, en



V-5. Gatos de tesado y elementos de anclaje.

el interior de sus envueltas tubulares dentro del hormigón, con la misma libertad que en el hormigón armado normal, porque el rozamiento del alambre, con el tubo curvado, amortigua el efecto del tesado de forma irregular y difícil de prever.

La otra es que no basta pensar en el estado de tensión final, sino que hay que considerar también el que se produce inicialmente por efecto del propio tesado de la armadura sobre sus anclajes, cuando aún no actúa la carga exterior. En muchas vigas, este estado inicial provoca momentos flectores de signo contrario a los de la sobrecarga, por estar la armadura excéntrica. Es, pues, necesario variar la forma de la pieza, llegándose, en ciertas vigas en T, a invertir la posición de la cabeza para que envuelva la armadura y sea capaz de soportar esa compresión excéntrica que los alambres tesos producen sobre la pieza, descargada de las cargas que luego ha de soportar.

El hormigón pretensado, hecho en taller con materiales bien tratados, se presta, pues, a realizar piezas esbeltas, de gran flexibilidad y alta resistencia, dando la sensación de ser un material diferente, perfectamente elástico e impermeable, por haberse alejado, en él, las posibilidades de fisuración. La pretracción de las armaduras aleja, también de éstas, el peligro de pandeo, mientras su compresión unitaria de trabajo no supere la tracción inicial. Permite, en fin, la utilización completa, y sin fisuración en el hormigón, de aceros de alta resistencia con un coeficiente económico-resistente mejor, si las condiciones industriales y comerciales del país son normales; esto es lo que constituye, quizá, su mayor ventaja.

A estos efectos, hay que tener en cuenta que la tensión admisible puede elevarse, a igualdad de tensión de rotura; porque, habiéndose tesado en fabricación a mayor

tensión que la que ha de quedar después de producirse la retracción y la deformación lenta, el material ha sufrido ya una prueba contundente.

El hormigón pretensado suele fabricarse con las armaduras tesas en una sola dirección; pero, puede igualmente hacerse con armaduras tesas en tres direcciones perpendiculares entre sí. De este modo, se llega a elevar fuertemente la resistencia del hormigón y obtener un material más dúctil en rotura, ya que ésta tenderá a producirse por deslizamiento, alejándose las posibilidades de rotura frágil por separación.

Las ventajas que pueden obtenerse en taller, en cuanto a la mejor dosificación, fabricación y curado del hormigón con tratamientos especiales (curado con vapor, etc.), no sólo permiten las economías industriales y comerciales consiguientes a un rápido endurecimiento, sino también la obtención de hormigones mucho más resistentes y más uniformes con mejores coeficientes económicos y, en consecuencia, con menor peso a igualdad de esfuerzo resistente.

Esto ha hecho que la prefabricación y el pretensado se hayan empujado mutuamente en su desarrollo, dando lugar a problemas de enlace que antes, al hormigonar «in situ», no existían, pero que con el postesado se resuelven fácilmente.

En el hormigón armado con piezas prefabricadas, el enlace vuelve a constituir un punto débil, como en otros materiales, porque la adherencia en las juntas, entre el hormigón endurecido y el fresco que se añade para hacer la unión, es siempre mucho menor que la cohesión y el rozamiento en el seno del hormigón; y la deficiencia suele aumentar con el tiempo, por defecto de la desigual retracción y demás deformaciones diferentes en uno y otro hormigón.

Para evitar estas deficiencias se recurre a dejar, en la dirección del esfuerzo que haya de soportar la junta, las barras salientes con sus ganchos para que, por solape dentro del hormigón fresco de rejuntado, establezcan la continuidad resistente a tracción; o bien se dejan, en ambas piezas de hormigón, los oportunos taladros para introducir barras pasantes con aprieto de rosca, lo que constituye, en cierto modo, un postesado.

En el hormigón postesado, estas dificultades o deficiencias desaparecen totalmente. La junta plana y a tope de dos bloques contiguos, simplemente recibida con mortero y mantenida después indefinidamente en compresión por la acción de las armaduras postesas que la atraviesan, queda totalmente asegurada incluso contra los esfuerzos cortantes; pues basta el rozamiento normal de la junta para impedir su deslizamiento, mientras la compresión normal a su plano sea suficientemente elevada. Gracias a estas ideas y disposiciones, ha empezado a desenvolverse la técnica de la construcción de grandes vigas enteras de puente, por el ensamblaje de trozos simplemente yuxtapuestos y postesados (fig. V. 4); y son ya muchas las estructuras de edificación formadas totalmente por grandes elementos fabricados en taller y ensamblados después en obra gracias a las armaduras postesas que aseguran la transmisión de esfuerzos a través de sus juntas igual y a veces mejor que en una estructura monolítica.

Porque, aun cuando el pretensado pueda hacerse directamente «in situ», las dificultades y costes de los dispositivos, necesarios para ello, hacen que, hoy, se desarrolle más en el taller de prefabricación sobre piezas relativamente pequeñas, hormigonadas en moldes muy rígidos y costosos, cuya amortización sólo se logra gracias al gran

número de reutilizaciones que les puede dar en una fabricación en serie. Y, por el contrario, es en la gran obra de ingeniería donde el postensado busca su «hábitat» propicio.

Pudiera parecer que no procede hablar aquí del hormigón postensado, pues más que de un material, en el concepto en que se viene usando la palabra, se trata simplemente de una estructura mixta de elementos metálicos y de hormigón u hormigón armado. Sin embargo, en ella, la parte metálica no adopta las disposiciones y materiales propios de la estructura metálica, como en otras que se han de citar más adelante; aquí, los elementos metálicos son barras redondas como en el hormigón armado, conjuntos de alambres de alta resistencia, cables trenzados de hilos u otras formas especiales de armaduras, siempre muy compactas y, al mismo tiempo, flexibles, para facilitar su puesta en obra.

Lo más corriente, actualmente, es que, al hormigonar, se dejen, en el interior del macizo, huecos tubulares por donde hilvanar, después, los alambres con diámetros hasta de 7 milímetros para tesarlos, una vez endurecido el hormigón y anclarlos en los extremos mediante dispositivos especiales (fig. V. 5). Estos dispositivos, en relación con el sistema y herramental de tesado, han constituido una de las mayores dificultades y uno de los mejores perfeccionamientos del postensado.

Generalmente se termina la operación con la inyección de lechada o mortero de cemento en los alvéolos tubulares que alojan los cables, para evitar la oxidación de éstos y para crear la adherencia que ha de permitir, después, el trabajo conjunto de ambos materiales, como en el hormigón armado.

El empleo de cables trenzados, utilizados con buen éxito en España, se ha extendido menos; pero, permite también grandes realizaciones con buenas facilidades de puesta en obra de las armaduras, como habrá ocasión de ver más adelante.

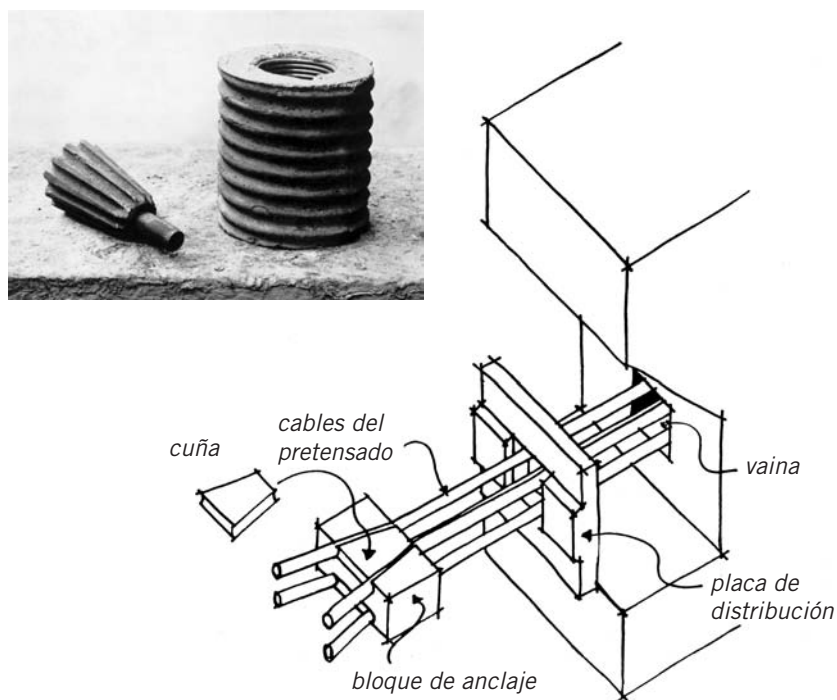
Las barras macizas, de diámetro relativamente grande, han sido empleadas, principalmente en Alemania, anclándolas al hormigón y dejándolas libres dentro de sus alvéolos, con la ventaja de poder corregir su tensión cuando convenga. En ese caso, ya, se trata de un elemento exterior a la estructura de hormigón armado propiamente dicha; y, por tanto, las deformaciones y tensiones de esas barras, sin hormigón circundante adherido a ellas, es, en cierto modo, independiente de las deformaciones locales del hormigón.

Por último, conviene señalar que el establecimiento de compresiones iniciales sobre el hormigón se hace, en ciertos casos, sin necesidad de armaduras, mediante gatos y otros dispositivos e ingeniosas maniobras. La de apertura de los arcos con gatos hidráulicos es, en el fondo, un postensado del arco, por cuanto le introduce tensiones iniciales a voluntad, aun cuando no se aplique a esos casos la acepción de hormigón pre o postensado que se reserva corrientemente para los hormigones cuyas tensiones se producen por las propias armaduras sin provocar resultante exterior.

La prefabricación, aun cuando indica un particular proceso de fabricación, da lugar a algo muy distinto que bien merece considerarse como un material específico diferente.

La estructura no puede hacerse en taller y colocarse como se coloca un mueble en una casa; sin embargo, siempre tiene algo de prefabricación y esto tiende a desarrollarse cada día más, y seguramente llegará a constituir la forma de fabricación de gran parte de las obras. En estructuras de acero, las piezas se preparan en taller y hasta se

V-5. Gatos de tesado y elementos de anclaje, tipos Freyssinet y Magnel.



prevé su montaje para numerar y transportar después la estructura desmontada, análogamente a como se hace en carpintería y cantería sobre monte.

En hormigón se ha venido haciendo todo «in situ»; pero, ya se nota una franca tendencia a la prefabricación, que se ha unido a la técnica del pretensado, por la mayor complicación de ejecución de estas piezas, por su menor peso y por la posibilidad que ofrecen de suprimir, en la obra, costosos encofrados y cimbras.

Muchos y muy alentadores, en este sentido, son los ejemplos que se pueden presentar de naves industriales formadas de elementos pretensados prefabricados.

Igualmente se han hecho vigas de puente, empalmando, en obra, trozos hechos en taller (fig. XVI. 2). Así, se sacrifica total o parcialmente el monolitismo en aras de la prefabricación, que, si bien se piensa, no es cosa nueva, pues puede presentar, como blasón de su antigüedad y garantía de su acierto, el haber sido la elegida por Salomón para la construcción del Templo de Jerusalén, hace cerca de 3.000 años.

La prefabricación se ha desarrollado no sólo con hormigón; las piezas de cerámica, enlazadas por sus juntas con hormigón o mortero armado o pretensado, ofrecen gran porvenir. Y en construcción metálica la prefabricación de grandes conjuntos en taller, para transportarlos y ensamblarlos, se ha desarrollado especialmente en construcción naval a medida que los medios mecánicos de transporte y elevación han ido siendo más potentes.

Prefabricados, eran y son los ladrillos; y, sin embargo, no se les aplica esa denominación porque la palabra ha nacido al trasladar al taller parte de las operaciones que se hacían en obra, fabricando en él elementos que, colocados y ensamblados después, acaban por formar la estructura.

Su desarrollo principal, en el hormigón o mortero, empezó al permitir este nuevo material sustituir los sillares de piedra natural. Su fácil ejecución sobre moldes de escayola permitió evitar la pesada labra de la piedra y obtener una gran economía cuando se trataba de elementos ornamentales con complicados dibujos geométricos, vegetales o zoomórficos, a los que tan aficionados eran los artistas y constructores de principios de siglo.

Pero fue la fabricación en serie de bloques más o menos aligerados la que, con su industrialización y mecanización, inició el gran desarrollo de esta técnica para elementos ya estructurales, aunque al principio se trataba casi exclusivamente de elementos de relleno o secundarios desde el punto de vista estructural.

Su verdadera entrada en este campo es mucho más tardía, y se debe en gran parte al postensado, que permite establecer compresiones en las juntas entre bloques haciéndolas así resistentes tanto a compresión como a tracción y esfuerzo cortante.

La fabricación en taller ofrece muchas ventajas tanto técnicas como económicas. El empleo de áridos perfectamente uniformes, y controlados, y la facilidad de utilizar áridos diferentes en la superficie para mejorar su aspecto, ofrece indudables ventajas estéticas.

La vibración para la compactación y el empleo de la moderna técnica del vacío combinada con el empleo de moldes porosos, la fabricación a cubierto y en naves que pueden acondicionarse térmica e higroscópicamente y, en fin, la posibilidad de emplear económicamente el curado al vapor, incluso en autoclave, asegura la mejor calidad resistente, absorbiendo la retracción antes del empleo de las piezas.

Los encofrados, corrientemente de hormigón pulido, aseguran una precisión, en las dimensiones, mucho mayor que la que puede obtenerse en la obra o sobre la cimbra. Y aún puede afinarse más con el rectificado de sus superficies en pulidoras especiales.

Las piezas pueden hacerse con espesores muy reducidos, imposibles de ejecutar en obra. El moldeo permite dejar orificios como los que se requieren para el paso de las armaduras de postesado, sin necesidad de dejar entubación perdida; y del mismo modo se pueden dejar anclajes, nudillos u otros elementos embebidos en su masa.

Las restricciones, que la economía impone a las formas del encofrado en las estructuras de hormigón, desaparecen aquí, siempre que una prolongada reutilización del molde permita su económica amortización.

Pero, a su vez, esta condición, unida a la necesidad de amortización de la instalación y del herramental de taller, obliga a un gran volumen de fabricación y, sobre todo, a una repetición del mismo tipo, forma y dimensiones del elemento.

Sin embargo, las ventajas técnicas y económicas que ofrece el trabajo en taller y el ahorro de encofrado, cimbras y andamios, que produce en la obra, hacen que se vaya desarrollando cada día más el empleo de grandes elementos fabricados en taller, para trasladarlos después, montarlos y ensamblarlos en obra, análogamente a lo que venía haciéndose en estructuras de madera o hierro. Una vez son soportes, vigas o arcos enteros; otras, son elementos superficiales como forjados o conjuntos laminares; otras, grandes partes de muros, que, a la par que son elementos resistentes de la edificación, llevan ya consigo otros elementos funcionales, marcos de puertas o ventanas, instalaciones, etc.

Las dimensiones de estos elementos vienen limitadas por los medios mecánicos, de transporte, elevación y puesta en obra de que se disponga.

Otra ventaja nada despreciable del empleo de la prefabricación es la mayor rapidez que puede alcanzarse en la construcción, al dividir y simultanear las operaciones de fabricación con las de montaje.

Todo ello hace que este tipo de construcción encuentre su “hábitat” natural y de rápido y fructífero desarrollo, en países o zonas de fuerte desarrollo industrial y técnico, con grandes volúmenes de construcción, y con personal facultativo y obrero bien capacitado que, gracias a todo ello, puede obtener salarios más elevados sin pérdida, sino con ventaja, para la economía del conjunto.

La unión de unas piezas con otras es tema fundamental de la prefabricación en el campo de las grandes estructuras resistentes. El simple asiento de unas contra otras por intermedio de una delgada capa de mortero es la solución corrientemente utilizada. El cruce de barras con la técnica propia del hormigón armado puede asegurar la junta, contra los esfuerzos de tracción. En ese caso, esa junta sigue siendo, hoy por hoy, un mayor peligro de fisuración; pero, aún así, ofrece la ventaja de quedar perfectamente trazada sin los peligros y el afeamiento que produce la clásica grieta que serpentea en la masa monolítica del hormigón armado clásico.

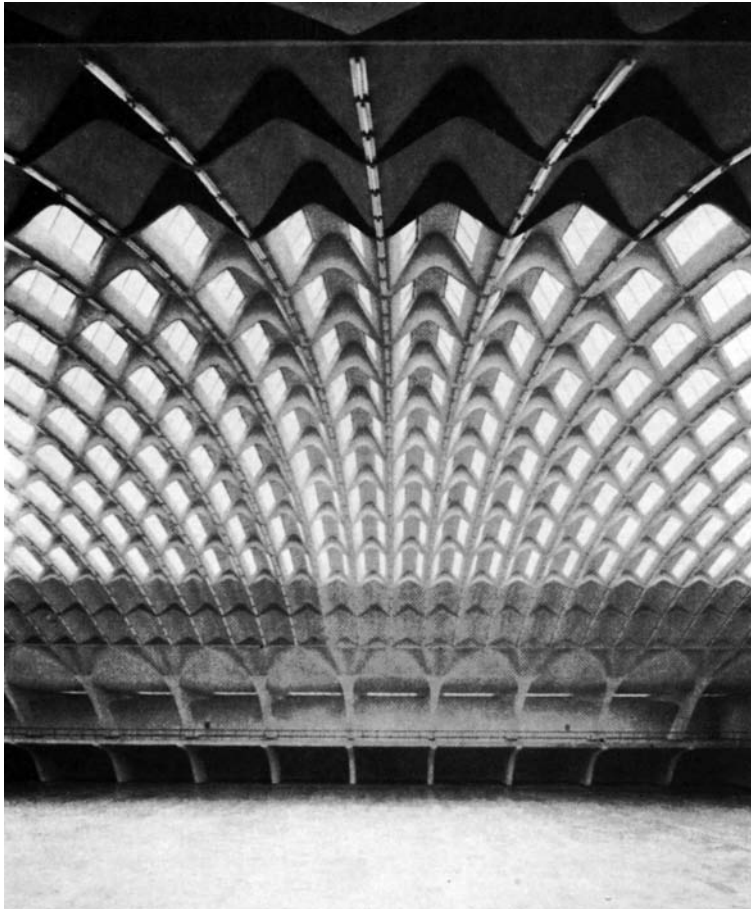
Las armaduras postesadas alejan ya ese último peligro y proporcionan, no sólo la necesaria resistencia a tracción, convirtiendo ese esfuerzo en comprensión sobre la junta de hormigón, sino también una perfecta resistencia contra el deslizamiento según el plano de junta, gracias al elevado coeficiente de rozamiento que puede lograrse entre sus caras.

Fácilmente se comprende, con todo esto, que no se trata simplemente de un diferente proceso de construcción, sino que toda la estructura ha de venir pensada y proyectada especialmente, para estar constituida por elementos prefabricados y posteriormente enlazados entre sí.

Surge un conjunto de problemas, pequeños en apariencia, pero de gran importancia, que no existían en las estructuras monolíticas de hormigón armado o pretensado. Asegurar la correspondencia y frontalidad de las entubaciones para el paso de las armaduras; evitar la entrada del mortero en ellas causando su obturación prematura; establecer los alvéolos para los anclajes; asegurar el espacio para poder colocar los gatos de postesado, y para hacer la inyección posterior de forma que pueda evacuar el aire y controlarse su eficacia, etc.; todos son detalles no secundarios, sino absolutamente necesarios. Y todos imponen formas y métodos de montaje que influyen, desde el principio, en el diseño del conjunto de la estructura.

La cubierta de la sala de exposición (fig. V. 6) de Turín, proyectada y construida por P. L. Nervi, y totalmente formada por complicadas, pero todas iguales, piezas prefabricadas, es prueba de lo que este material puede dar de sí en manos de un hombre que sabe salirse de lo clásico y tradicional con su genial inventiva para crear una técnica original. Otras veces, como en Roma (fig. VIII. 12), las piezas prefabricadas con sólo 2,5 cm de espesor forman el encofrado de los nervios de hormigón armado y coadyuvan, al mismo tiempo, al trabajo de éstos, como elemento resistente.

En resumen, un gran porvenir puede augurarse a esta técnica, y a este nuevo material, que probable, sino seguramente, no ha alcanzado todavía sus formas y sus tipos estructurales óptimos. Ofrece indudables ventajas de economía y de rapidez constructiva; pero, a su vez, impone otras restricciones que hasta ahora no sufría el hormigón;



V-6. Sala de exposición de Turín. Ingeniero Pier Luigi Nervi. Fotografía: Moisis.

y entre ellas, especialmente la necesidad de repetir gran número de veces una misma forma elemental para amortizar los moldes y obtener así toda su ventaja económica. La tipificación y con ella la modulación, que permita obtener la mayor libertad de formas con el mínimo de piezas diferentes, es un problema con el que la técnica de la construcción se enfrenta y cuyo difícil estudio sólo está hoy en período de embrión.

Esta somerísima enunciación, de los fenómenos y comportamientos que caracterizan los diferentes materiales, está hecha solamente a título de recordatorio de lo que ha de tener en la memoria el proyectista. Su estudio, aun sin profundizar mucho, ocupa volúmenes enteros; y cuanto más familiarizado con ello esté aquél, mejor sabrá manejarlos y enjuiciar las ventajas que aportan y los peligros que envuelven para ponderar lo que al cálculo se le escapa, y para idear, en cada caso, la solución más apropiada; e inclusive habrán de servirle para prever, con mayor amplitud de criterio y agudeza crítica, las posibilidades y formas óptimas de aplicación de los nuevos materiales de construcción que los fabricantes vayan ofreciéndole; pues el aluminio está triunfando ya en grandes realizaciones gracias a su ligereza; y otros muchos materiales esperan tan sólo reducir sus costes de fabricación para entrar en la lid con buenas probabilidades de triunfo en el campo específico de las estructuras resistentes de construcción.

VI

El soporte y el muro

La estructura está, en general, formada por uno o por la combinación de varios elementos típicos; y será interesante, por consiguiente, empezar por comentar las características de éstos o, por lo menos, de los tipos principales.

El soporte es, en la construcción de todos los tiempos, uno de los elementos más fundamentales. De entre ellos, el más genuino y logrado es la columna; ¡cuánto ha trabajado y sentido la Humanidad sobre ella! En sus tallas se siente el paso deleitoso de los mayores artistas. Si ella no fuera, de por sí, un monumento, la Humanidad debiera habérselo erigido.

Su misión es soportar algo sobre su capitel; pero, aun sin ello, exenta y solitaria o en ringla de compañeras, la columna es bella por cuanto se yergue sobre el suelo en su anhelo de superación. Su erecta verticalidad es reflejo de la figura humana mirando al cielo. Levanta su cabeza sobre lo que le rodea y proclama con orgullo su inmóvil permanencia como razón de su ideal y de su ser. Tiene el prístino y misterioso encanto del primer éxito, la paternidad de los éxitos constructivos de todos los tiempos. Cuando Jacob tuvo la visión de aquella escala indefinidamente ascendente que conducía al Ser por esencia, levantó una piedra como columna y la dejó marcada con la señal indeleble de su óleo para recordar el camino a todas las generaciones futuras.

Y cuando se unen las columnas con el yugo del dintel, su gracia no se pierde sino que se avalora con la aceptación del servicio para el que fue creada. Columna y dintel formarían el emblema de toda la construcción clásica hasta la consagración máxima que le prestó el arte heleno.

Su misión es la síntesis de toda la finalidad constructiva: Soportar. Palabra que, en nuestra lengua, tiene algo de conformidad y de humilde renuncia a vanos derechos que, cuando se acepta voluntariamente y en razón o ideal de servicio, alcanza los límites sublimes de las mejores virtudes. Soportar es, aquí, resistir; y, por eso, la columna es emblema de fortaleza.

La primera columna seguramente fue de madera; quizá lo fue sin dejar de ser árbol, al cobijar en su cabaña a nuestros primeros padres. La segunda fue de piedra; es el material más indicado para ello porque su trabajo es principalmente de comprensión. La forma circular tronco-cónica, ensanchando hacia abajo, es la lógica, pues la carga, que actúa sobre el capitel, se incrementa por el peso de la propia columna.

La base es obligada para repartir y transmitir mejor los esfuerzos al suelo, más blanco que ella.

La justificación del capitel es menos clara; ciertamente, con la madera se hace notar que su resistencia es mucho menor en el sentido normal a las fibras que paralelamente a ellas. Por consiguiente, si el fuste acometiese directamente contra la viga del dintel, tendería a clavarse en éste, machacando transversalmente sus fibras; y el único



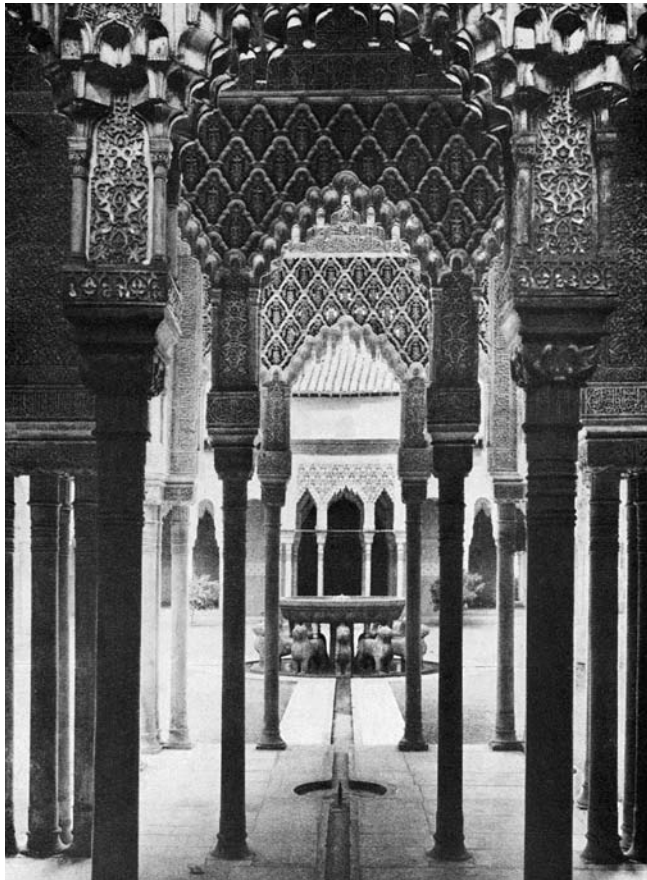
VI-1. Columnas romanas, en Mérida. Fotografía: M. García Moya.

modo de aprovechar las resistencias del material, en ambos elementos, es interponer una zapata de madera más dura o de otro material. Es posible que su traducción a la piedra le haya perpetuado después, pero no es cuestión que interese discutir aquí, después de lo mucho que se ha opinado y escrito sobre la cuestión.

Cuando aparece el arco en Roma, la columna se apoya en su parástade; y la forma de pilastra, más estable, permite soportar la posible desigualdad de empujes de dos arcos contiguos.

En el arte románico, la función del capitel es más clara, pues sirve para ensanchar el fuste de la columna hasta dejar el ancho imprescindible de los dos arcos que apoyan sobre ella. Lo mismo sucede en el arte árabe, donde la columna se aligera ya, más de lo que mecánicamente fuera de esperar; y quizá su esbeltez culmina en el gótico mediterráneo. Pero cuando la columna se aligera tanto, el elemento sustentado trata de aparecer muy ligero —como en las construcciones árabes, en las que el muro se llena de atauriques hasta el mismo borde del arrabá—; o bien se descarga, fuera de la columna, sobre las jambas del hueco, con otro fenómeno tensional, como se ve en muchas ventanas ajimezadas; el muro, por encima del hueco, descarga sobre las zonas laterales; y hasta se acusa en muchos casos, más o menos claramente, un arco de descarga. Aun así, la ligereza de la columnilla del ajimezado, en relación con el macizo

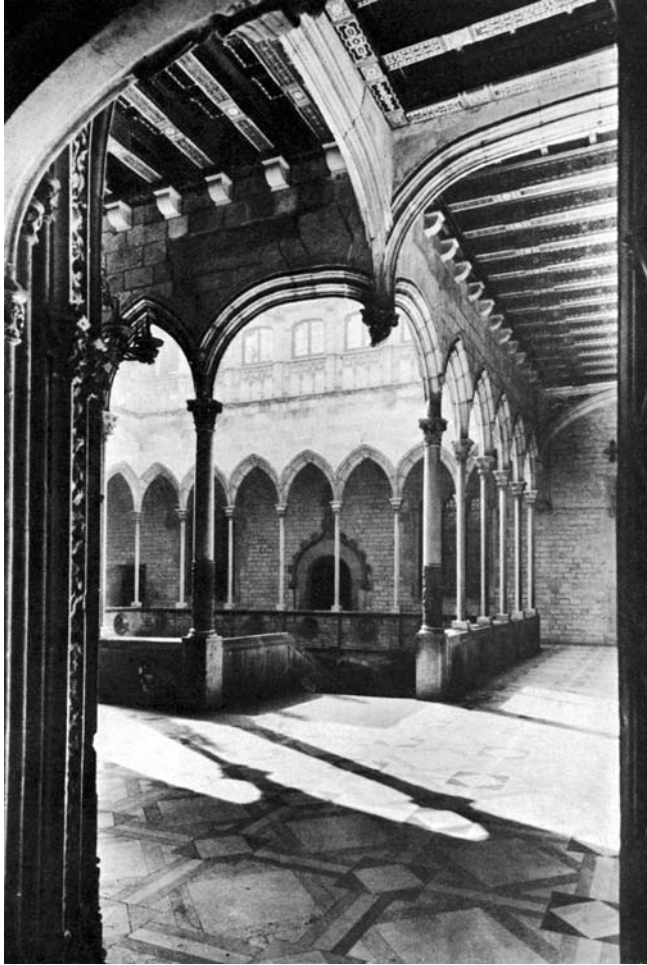
VI-2. Columnas hispano-árabes de la Alhambra, Granada. De «Ars Hisp.», L. Torres Balbás.



del muro, se destaca por contraste, y la piedra llega realmente a un aprovechamiento impropio de ese material.

En técnicas más modernas, la columna de piedra se sustituye por la de fundición, adoptando inicialmente las mismas formas básicas de la columna de piedra. La fundición puede ser, y es normalmente, hueca, lo que permite un buen aligeramiento sin perjuicio para su resistencia al pandeo, ya que las comprensiones unitarias aceptables sobre la fundición son frecuentemente mayores que con la piedra. Por lo demás, su analogía de características mecánicas con la piedra la hace apta para este tipo de elemento.

En los soportes de madera, cuando la esquadra de una pieza no es suficiente, se recurre a acoplar varias adosadas: y como, dada la esbeltez de estas piezas, el fallo se produce normalmente por pandeo, es necesario embridarlas para obligarlas a trabajar conjuntamente a los efectos de la flexión, aumentando el momento de inercia total de la sección compuesta. Es el mismo efecto que se buscaba, en ciertas construcciones de la antigüedad, atando varios troncos, o los posibles trozos de uno solo producidos por el venteado de la madera. Justamente este atado o zunchado de cuerda se repite luego, ya como puro tema ornamental, en los fustes de piedra de algunos pueblos que todavía recordaban sus construcciones de madera.



VI-3. Palacio de la Audiencia, Barcelona. De «Summa Artis», J. Pijoán. Espasa Calpe, S. A.

El acero presenta, desde un punto de vista teórico, la forma tubular como la más económica y racional; pero su menor espesor posible de chapa facilita el pandeo típico de la pared cilíndrica, por lo que no puede aprovecharse al máximo su resistencia a la compresión. Por otra parte, su tipo de fabricación hace obligada la constancia de la sección a lo largo del elemento. La mayor baratura de los perfiles laminados, por una parte, y su gran esbeltez, por otra, imponen los perfiles compuestos para evitar el pandeo. Las mermas de sección de roblonado no perjudican grandemente en compresión, pero imponen una complejidad de formas poco agradable a la vista. La necesidad de dar entrada al brazo de la roblonadora exige las secciones abiertas o con las alas hacia fuera, en contra de las exigencias tensionales; por eso, cuando aparece la soldadura, se vuelve a los perfiles cerrados (fig. VI. 4e), más compactos y agradables a la vista y en los que el material se puede aprovechar mejor.

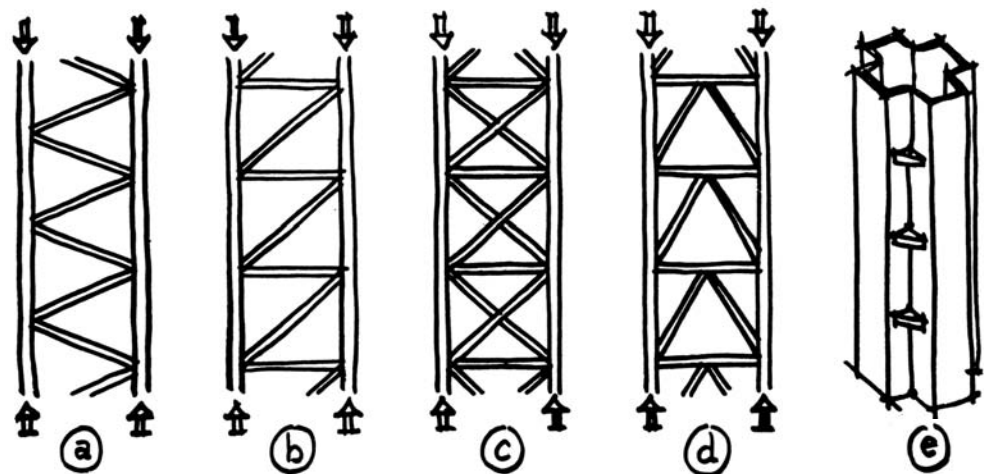
Sin embargo, la elevada resistencia, características del acero, hace más próximo el peligro de pandeo que el de rotura; y el perfil compuesto se mantiene por la necesidad de aumentar el radio de giro de la sección. Como se requiere evitar igualmente el pandeo parcial de los perfiles, surge el soporte formado por varios elementos

longitudinales unidos por una malla en celosía triangulada o por llaves horizontales con una separación impuesta por la necesidad de evitar el pandeo de cada perfil entre punto y punto de arriostramiento; y, aún así, hay que cuidar de que no se produzca el pandeo de las alas de los perfiles o de las chapas que entran en la composición del conjunto.

El soporte de acero presenta otras ventajas. Como es capaz de resistir tracciones, no solamente sirve para el trabajo de compresión centrada, sino para resistir también compresiones excéntricas, flexiones y esfuerzos cortante. En la función simple o fundamental del soporte, parece que esto no interesa; sin embargo, la posibilidad de aceptación de este tipo de esfuerzos y la de transmitirlos, por el enlace, a los elementos contiguos, ha dado lugar, más tarde, a incorporar el soporte al trabajo de flexión de la viga que soporta formando pórtico con ella; pero de este elemento habrá de tratarse más adelante.

En los soportes de celosía se utilizan frecuentemente tipos de triangulación como los indicados en la figura VI. 4. En su elección, aparte del mejor o peor efecto estético, es fácil tener en cuenta el distinto tipo de deformación que ha de presentar uno u otro, si el esfuerzo de compresión axial es el predominante. En las triangulaciones indicadas en la figura VI. 4.a) y d), la deformación es simétrica; la elección, entre una y otra, depende de la relación entre el ancho del conjunto y la separación entre puntos verticales del arriostramiento que se necesite.

En b) aparece una ligera tendencia a inclinarse el conjunto por el mayor acortamiento de las piezas verticales respecto a las diagonales. En c) sucede lo mismo. Este tipo de triangulación tiene la ventaja aparente de permitir aligerar las diagonales, pensando que no necesitan trabajar a compresión porque, en cuanto se presenta tendencia a flexión hacia un lado, los montantes horizontales y unas ciertas diagonales, trabajando en tracción, bastan para rigidizar la estructura; pero, el acortamiento vertical de los marcos tiende a aflojar todas las diagonales y el conjunto



VI-4. Soportes en celosía

puede tener movimientos de iniciación de pandeo con los que no se había contado, y oscilaciones desagradables bajo la acción de cargas transversales variables como las de viento.

El hormigón armado vuelve hacia las proporciones de la piedra, si bien lo hace, en general, con mayor esbeltez que ésta, por la mayor resistencia y rigidez que le da su armadura. Lo más frecuente es emplear la sección rectangular, por comodidad y por economía de encofrado. Las armaduras longitudinales ayudan a la resistencia del hormigón y disminuyen los peligros derivados de sus posibles coqueas y otros defectos. Mediante las armaduras transversales, se aleja también el peligro de rotura del hormigón, tanto por separación según planos paralelos al eje del soporte como por deslizamiento según planos oblicuos. Colocando las armaduras longitudinales próximas a las caras se da al soporte mayor momento de inercia y mayor resistencia bajo una excentricidad cualquiera de las cargas; y se aleja, también mucho, el peligro de pandeo que viene, en el hormigón, facilitado por sus deformaciones lentas.

El hormigón admite difícilmente las secciones huecas, por razones de ejecución y de economía. Está en buenas condiciones, gracias a su armaduras, para soportar esfuerzos importantes de flexión y cortantes; y su facilidad de enlace monolítico lo hace apto, también, para porticar.

Los estribos se hacen necesarios, no sólo para asegurar algo más la resistencia contra rotura del hormigón, como se ha dicho, sino para evitar el pandeo propio de las barras longitudinales, rompiendo su recubrimiento de hormigón, fenómeno que suele aparecer como fase preliminar de la rotura.

Cuando la sección posible del soporte es insuficiente normalmente para la carga que ha de soportar, éste se zuncha, resultando más económica teóricamente la armadura en forma de zuncho que el refuerzo de la armadura longitudinal que se requeriría sin zunchar. Sin embargo, hay que tener en cuenta los peligros de pandeo lento del hormigón, que son mayores en los pilares zunchados, dada la mayor importancia de la comprensión a que se les somete por unidad de sección.

Normalmente, el soporte es empotrado en la base, por ser éste el sistema más simple de darle estabilidad; pero, puede también ser articulado, en forma de estípite, si el dintel lo sujeta por cabeza (fig. VI. 5); y, en fin, articulado arriba y abajo, como una biela, cuando la estructura que sustenta está fija en otros soportes y requiere, sobre éste, una cierta libertad de dilatación.

La palma de la esbeltez, en soportes o piezas en compresión, se la lleva el acero, y la de la economía, el hormigón; pues el coeficiente económico resistente de éste, como se ha dicho, es mayor que el del acero, siempre que se trate de esfuerzos de compresión.

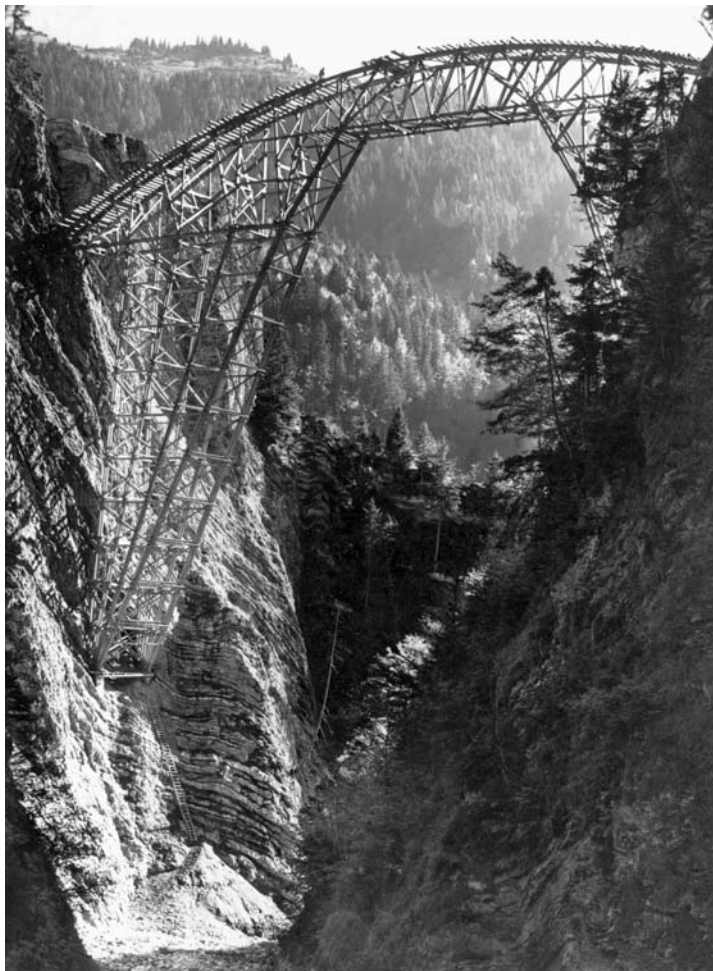
Poco puede decirse del ladrillo porque su escala de utilización es más reducida que la de la piedra, a causa de su mayor resistencia. En general, el ladrillo es más apto para pilastras que para columnas. Las de ladrillo que existen, incluso salomónicas, son, en realidad, obras de preciosismo; sin embargo, para soportes apilastrados es de gran utilidad y en muchas regiones resulta muy económico. No hay que olvidar, de todos modos, su incapacidad para resistir flexiones, como no sea colocándole armadura; pero ello resulta, en general, más complicado y menos económico que en el hormigón, sobre todo con secciones pequeñas.

VI-5. Soportes en el Hipódromo de Madrid. Fotografía: S. v. Kaskel.



Cuando se habla de un soporte, se piensa siempre en una pieza vertical; sin embargo, el soporte inclinado, como jabalcón, es en muchos casos el más indicado. Sus posibilidades en piedra vienen menguadas por el efecto del peso propio que produce flexiones y, por consiguiente, tracciones en cuanto la longitud es un poco grande o en cuanto la carga de compresión, que ha de soportar, baje lo suficiente para no compensar esas tracciones peligrosas. En este caso, si la carga axial no ha de variar mucho —como sucede cuando el peso muerto es grande frente a la sobrecarga viva—, el soporte inclinado se curva para seguir la línea de compresiones, dando lugar al arbotante en forma de arco por tranquil.

La madera ha utilizado, mucho más que otros materiales, el jabalcón (fig. VI. 6); pero más bien como elemento auxiliar para reducir la flexión en las vigas que acodala; y, únicamente en muy recientes construcciones, se nota una mayor libertad en el empleo del soporte inclinado de hormigón armado o de acero, cuyas posibilidades, tanto resistentes como estéticas, pueden ser muy grandes. En general, no se necesita curvarlo, porque su flexión, por peso propio, es pequeña frente a la carga que ha de soportar de punta. Naturalmente la presencia de flexiones dominantes en el plano vertical de la pieza, piden pasar, de la sección cuadrada, a la rectangular, o de la circular a la elíptica.



VI-6. Cimbra para el puente de Salgina-Tobel. Ingeniero R. Coray. Del «Bericht 99 E. M. P. A.».

El muro no es tampoco un elemento moderno precisamente; pues hay que pensar que, detenidos frente a la barrera infranqueable de los bloques ciclópeos de sus murallas, empezaron los pueblos a hacer la historia sin saberlo; y, más de una vez, utilizaron sus paños para ensayar sus escrituras y grabar en ellos el pregón más duradero de sus glorias. De sus tres funciones principales, que son cerrar, soportar y contener, las tres vienen de la más remota antigüedad.

El muro es normalmente de piedra, ladrillo u hormigón. Desde el muro ciclópeo sin mortero, hasta los más ligeros de rasilla, hay toda una gama de fábricas: mampostería, concertada o no; aparejos diferentes de ladrillo, macizo o hueco; los de tapial, etc. Todos ellos, con distintas resistencias y durabilidad, son, en el fondo, una misma cosa. Sin embargo, hay que distinguir los más delgados, como tabiques, por cuanto requieren una cierta resistencia a tracción, aunque pequeña, tanto para resistir cualquier empuje horizontal como para no pandear bajo la acción de cargas verticales, que rara vez se les confían con tan menguado espesor.

Fuera de éstos, el muro clásico es un elemento continuo superficialmente y de cierto espesor y masa, resistiendo en compresión simple o compuesta sin tracción,

por lo que es muy apto para construirse con materiales pétreos, hormigones en masa, etc.; y la potente apariencia del muro encuentra su expresión de máxima nobleza con la cantería. Resistentemente, lo primero que requieren estos muros de piedra –sin mortero o con morteros que prácticamente no ofrecen resistencia a la tracción– es una buena traba entre los sillares o mampuestos, para evitar planos inclinados de posible rotura y para que la masa interior no pueda producir empujes sobre los elementos del paramento. De otro modo, en lugar de constituir un elemento estabilizantes, se convertirían en uno perjudicial como se observa frecuentemente en muros antiguos de sillería en paramentos y con relleno de mampostería suelta o de tierra en el interior.

Debiendo el muro mantener su equilibrio por efecto de su peso propio, es difícil que pueda alcanzar proporciones sobre las que el peligro de pandeo llegue a tener influencia. Pero, en muchos casos, ha de soportar empujes horizontales, sean de tierras que contiene, de bóvedas que apoyan sobre él o, en fin, los mismos del viento si la altura llega a ser importante. Siendo así, y no teniendo elementos de arriostramiento o contrarresto en su altura, es fácil que el espesor que requieran llegue a ser demasiado fuerte con materiales no resistentes a la tracción. El peligro está en que la compresión compuesta, producida por la combinación del empuje y del peso propio, se convierta en flexión, y el muro rompa por tracción; o que, sin rotura real, se abra por una junta y vuelque. Contra ello, la condición de estabilidad exige simplemente que, alrededor de cualquier posible arista de giro, el momento volcador, producido por el empuje, sea menor que el estabilizante debido al peso.

Se requiere, pues, peso y espesor; interesan materiales de gran peso específico; y el muro pide ancho creciente hacia abajo, puesto que es allí donde el momento volcador es mayor. Esto conduce al perfil trapecial con talud en el paramento, al que tan noble aspecto supieron dar los arquitectos egipcios. Puede, también, conducir al desplome por el trasdós como en los incaicos; pero con éste se pierde la estabilidad si el empuje activo puede desaparecer, como sucede, por ejemplo, en las presas al quedar el embalse vacío.

La defensa, contra el peligro de vuelco por falta de peso, se ha resuelto, con materiales no resistentes a la tracción, mediante el establecimiento de contrafuertes colocados de modo que el peso del muro resulte más estabilizante gracias al aumento del par que produce contra el vuelco.

La combinación del paramento ataluzado o retranqueado con el contrafuerte sosteniendo un dintel o una bóveda (fig. III. 2), para llevar el perfil de coronación a la vertical del borde inferior del contrafuerte, permite lograr, a la vez, un cierto aligeramiento de la masa del muro y un juego de formas, en su paramento, tan atractivo para los constructores del alto medioevo y de sus inspiradores del Oriente Medio, que su esquema se extendió, incluso con razón puramente ornamental, a todo el período románico, con reverdecimientos en los renacentistas y neoclásicos.

Con el hormigón armado, el muro puede tomar la función resistente de una ménsula empotrada en una ancha base o zapata de cimentación; y puede desarrollarse en losas o placas trabajando en flexión, entre ménsulas y vigas de más canto, formando estructuras complejas que se separan del concepto inicial de muro clásico y que habrán de ser comentadas más adelante.

En este sentido, ni la madera ni el hierro son verdaderamente los apropiados para formar muros. La madera lo traduce en la palizada tras la que guarecen todavía sus poblados los indígenas de la selva; mientras el acero crea la tablestaca con sus perfiles y ensambles originales y específicos, y cuya utilización se reduce casi exclusivamente a la contención provisional de tierras alrededor de las excavaciones, o a cerrar el paso de las aguas subálveas.

Hoy el muro de simple cerramiento tiende a aligerarse formando delgados tabiques o paneles de relleno entre los elementos resistentes de un entramado vertical, y a descomponerse en diferentes capas encargadas, cada una de ellas, de una función específica diferente, sea impermeabilidad, defensa térmica, antisonora, etc.; pero estos elementos son, ya, algo fundamentalmente diferente de la estructura y de la función resistente de que se viene tratando ahora. No constituyen un muro, sino simplemente una «pantalla», llamando así la «*courtain wall*» sajón.

*El cimient*o es el complemento obligado del soporte y del muro. Su forma clásica es la simple zapata para reparto de las presiones sobre el suelo; zapata cuyas formas repite el hormigón armado permitiéndose mayores vuelos a igualdad de volumen de material.

Que el cimient o sea mayor o menor y más o menos profundo puede hacer que su ejecución se complique y que requiera incluso una estructura propia auxiliar, como en el caso de los cajones de aire comprimido o de los muchos más antiguos cajones indios; pero, en definitiva, siguen siendo simples macizos encargados de repartir las cargas sobre una buena superficie de terreno a la profundidad que las condiciones particulares de éste vengan a exigir; y carecen aquí de interés específico como tal cimentación.

El problema cambia, sin embargo, cuando la superficie de reparto de cargas, que el terreno exige a cada cimient o, es tan grande, respecto a la distancias entre unos apoyos y otros, que se hace preferible unir los cimient os y sustituir las zapatas independientes por vigas de un cimient o a otro o por placas continuas. El problema es, entonces, el mismo de la estructura de un piso dada la vuelta. Así como en éste los pesos actúan hacia abajo y las reacciones de los soportes hacia arriba, en las cimentaciones son las reacciones del terreno las que se equilibran con las cargas del muro o del soporte. Por consiguiente, su comentario puede dejarse para cuando se hable de las estructuras de piso.

El único tipo sustancialmente diferente es el pilotaje: esos clavos que, hincados en el suelo por bajo de la zapata que los encepa y prolongados hacia arriba para formar la misma palizada, fueron ya utilizados por los constructores palafíticos y han seguido empleándose ininterrumpidamente, hasta estos días, por los habitantes de zonas arcillosas blancas y fangosas. Sus longitudes han aumentado mucho con el acero y el hormigón armado; los procedimientos y herramientas de hinca se han perfeccionado, pero el principio y el tipo estructural del elemento sigue siendo el mismo.

En definitiva, no es el cimient o en sí lo que puede interesar fundamentalmente en la constitución de las estructuras, sino la influencia que el tipo y las características del terreno puedan tener en la cimentación y en su coste, y, a través de ello, en la estructura toda. Pero esto es tema que se sale del marco de este capítulo y habrá de ser tratado en otros donde se analicen esos conjuntos estructurales.

VII

El arco

Si tras la columna y el muro parece recabar su puesto el dintel, puede, sin embargo, ser preferible estudiar primero el arco; pues éste es, al fin y al cabo, lo más parecido tensionalmente a la columna, por cuanto su trabajo principal es de compresión. El arco es el mayor invento tensional del arte clásico. Él sigue impresionando al vulgo, y la Humanidad ha tardado mucho en acostumbrarse a su fenómeno resistente; prueba de ello es la frecuencia con que la leyenda achaca al diablo su construcción.

Si la columna es arquitectura pura, el arco es ingeniería; o mejor dicho –para alejar toda interpretación profesional–, si la columna es arte, el arco es técnica; sin que esto quiera decir, ni que a la columna le falte técnica, ni que el arco sea incapaz de vivísima expresión estética.

Después de la columna, las predilecciones del Arte han sido para el arco; ese arco que nunca duerme, según reza el proverbio árabe. Tampoco la columna, en pie, parece hacerlo; pero no cabe duda que ese arco, que en su encorvamiento vuela sobre el vano, da la sensación de algo más dramáticamente tensional que la columna. El arco de piedra, como el de ballesta, va siempre unido a la idea de esfuerzo por resistir, de salto por dominar la distancia. Por eso el arco, que también es monumento, es el elegido para proclamar los honores de la victoria.

Construir un arco no es tan sencillo como poner una columna de pie. Para esto último basta tener fuerza o medios suficientes de subir un sillar y ponerlo encima del anterior. Para construir el arco hace falta sostener todas y cada una de sus dovelas hasta colocar la clave. Sólo entonces entra el arco en acción y se realiza el equilibrio.

La primera idea que se ocurre, es la de ir avanzando en voladizo, por hiladas horizontales, engarzando, en todo caso, los sillares con los del muro contiguo, si lo hay. Pero, ni esto es fácil de idear, ni siempre está el muro para ayudar; y el artífice tiende, involuntariamente, a ir subiendo las hiladas más que avanzado en voladizo, y termina por hacer un arco trapezoidal u ojival (fig. VII. 1).

Hay que tener en cuenta la diferencia esencial que existe entre el verdadero y el falso arco. Para el técnico, el arco, es, o pretende ser, antifunicular de las cargas; una pieza curva que, resistiendo sólo o principalmente a compresión, transmita los pesos propios, y los que sobre él insisten, a dos apoyos distanciados entre sí; y nada tiene que ver, por consiguiente, con el falso arco formado por ménsulas en voladizo, complementado, en todo caso, con un sillar o dintel central apoyando sobre los extremos de esas ménsulas.

Conviene distinguir también dos clases de arco, que pueden llamarse arco enjutado y arco exento (fig. VII. 2 y 3), por la presencia o la falta de enjutas o de tímpanos macizos. En el primero, la flexión del propio arco está impedida por el muro acompañante, y aquél puede tomar simplemente el valor de una archivolta. De este



VII-1. Falsa bóveda de Uxmal.
De «Summa Artis», J. Pijoán. Espasa-Calpe, S. A.

modo, puede no ser sólo el arco el que trabaje, sino entrar también a ayudarlo una buena zona de muro –tímpano y manguardias–, dentro de la cual, la red de isotáticas presenta una familia, en compresión, que desvía las cargas hacia los estribos (fig. VII. 4). Los arcos del arte clásico y medieval eran arcos de este tipo.

Por el contrario, el arco exento –del que son un bellissimo ejemplo inicial los arcos intermedios de la Mezquita de Córdoba (fig. XVII. 3)– debe considerarse como puro arco, desde un punto de vista tensional. Si la ley de reparto de cargas sobre él es fija, la directriz puede amoldarse al funicular de esas cargas, con objeto de que la pieza trabaje sólo a compresión. Pero si la sobrecarga es variable y puede cargar más intensamente en una zona del arco, esa parte tiende a hundirse, levantándose el arco por otro lado y apareciendo flexiones de distintos signos como las que indican las deformaciones de la figura VII. 5a. Pero, aun cuando la directriz inicial siga exactamente el funicular de cargas, si la luz es grande y las tensiones elevadas, el acortamiento de la directriz, por efecto de la compresión, obliga al arco a cambiar de forma y, por consiguiente, a trabajar en flexión. Y no vale corregir el defecto en sentido contrario; al

sobrevenir la deformación longitudinal, viene necesariamente la flexión. La única forma práctica de corregirlo, cuando vale la pena de hacerlo, es producir un nuevo alargamiento de la directriz que compense el acortamiento elástico. Es la idea puesta en práctica por Freyssinet, abriendo la clave con gatos hidráulicos para introducir una nueva dovela; operación, hoy día, corriente en puentes de hormigón de alguna importancia, en los cuales hay que corregir, no sólo el acortamiento elástico, sino también el correspondiente a la retracción.

Por otra parte, en la mayoría de los casos –por ejemplo, en los puentes–, las cargas móviles varían de posición y el funicular se altera mucho como resultado de ello. Por consiguiente, el arco se separa bastante del funicular, y ha de disponer de una resistencia importante a la flexión.

Además, el arco exento sufre los peligros del pandeo, como toda pieza comprimida, si bien en este caso (fig. VII. 5a), al estar fijos los arranques, el arco tiende a tomar una forma de pandeo más resistente que en el caso de un soporte, cuyos extremos pueden aproximarse al producirse el pandeo. En consecuencia, la esbeltez admisible del arco puede ser mayor que la del soporte.

Si el arco es estrecho, hay también peligro de pandeo saliéndose de su plano, por torsión (fig. VII. 5b), e inclusive de flexión transversal por efecto de viento; todo ello habrá de considerarse, pero no resta valor al tipo estructural ni a la importancia de su trabajo normal en el plano.

Siendo el trabajo de compresión el fundamental del arco, los materiales pétreos se prestan bien a su construcción, especialmente si se trata de arcos enjutados. El arco exento, más expuesto a flexiones, prefiere el hormigón armado e incluso el acero para

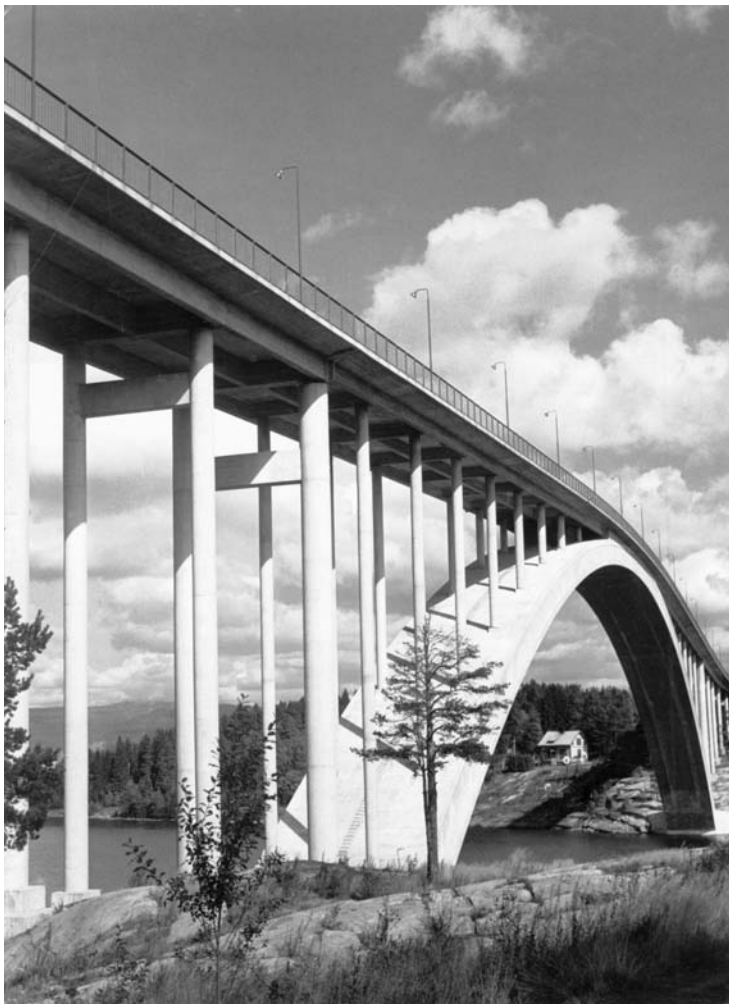


VII-2. Puente de San Martín, en Toledo. De «España», J. Ortiz Echagüe.

desenvolver sus grandes luces aprovechando las altas resistencias de estos materiales, tanto a la tracción como a la compresión.

Pero no son sólo las mayores resistencias específicas del acero o del hormigón armado las que conducen, en muchos casos, al arco exento; las deformaciones térmica e higroscópicas, pequeñas o despreciables en obras de piedra o ladrillo, hacen, por el contrario, que, con el hormigón, la gran rigidez del arco acompañado provoque fácilmente agrietamientos inadmisibles. Ello obliga a buscar tipos estructurales más fácilmente deformables, y, entre ellos, el arco exento —con tímpanos muy aligerados en el caso de puentes, por ejemplo— es uno de los más eficaces como elemento sustentante fundamental para salvar un gran vano. Con acero, la disposición estructural es la misma, si bien la esbeltez de los elementos resultantes es mayor que con hormigón.

El arco exento de piedra, ladrillo o incluso de hormigón sin armar, requiere mayores espesores para evitar las tracciones por flexión bajo la acción de sobrecargas móviles. En las luces corrientes, el peso de la piedra puede ser suficiente para amortiguar



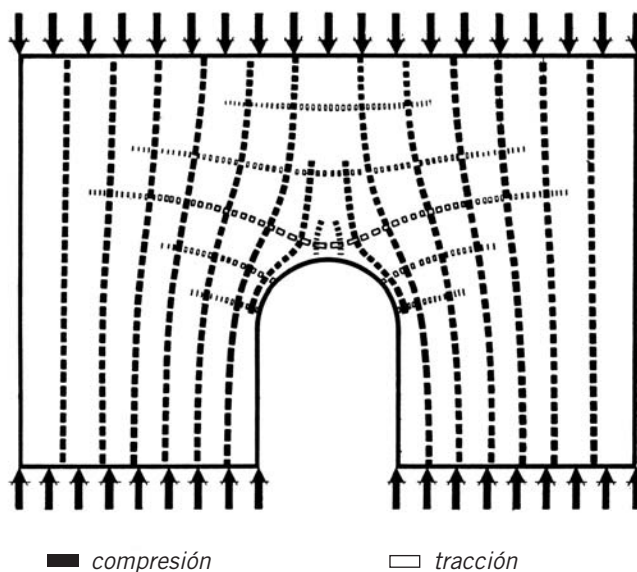
VII-3. Puente de Sandö.
Fotografía: K. W. Gullers.

estos efectos de la sobrecarga; pero, en las grandes luces, los espesores se hacen demasiado fuertes, con lo que el coste, habida cuenta además de la labra, resulta prácticamente prohibitivo.

Por otra parte, los grandes arcos de piedra requieren, como consecuencia de lo dicho, cimentaciones más fuertes que los de hormigón armado y los de acero. El sobrecoste de la cantería se puede disminuir mucho emboquillando en cantería y haciendo el resto de la bóveda y de los muros de mampostería o ladrillo. Pueden, entonces, tener importancia las diferencias de retracción entre un material y otro; sobre todo, cuando la boquilla es de cantería y la bóveda de hormigón, o aun de ladrillo. En estos casos, es corriente ver estas fábricas despegadas, por este efecto, de la boquilla de cantería con la consiguiente pérdida de estabilidad del conjunto.

El hormigón aventaja fácilmente, en economía, a los materiales clásicos en cuanto las luces no son muy pequeñas; pero, con él, como se ha dicho, se empieza a tropezar más y más con las consecuencias de ese complejo de características reológicas propias del hormigón, aun cuando el arco sea exento y relativamente flexible. Su retracción se suma al efecto de las deformaciones lentas, bajo la compresión permanente a que está sometido el arco, y el acortamiento consiguiente provoca flexiones secundarias mucho mayores que en la cantería.

Los efectos de la retracción, en el arco, pueden compensarse mediante la oportuna apertura de clave; los de deformación lenta podrían, todavía, resolverse igualmente con varias operaciones consecutivas durante los primeros meses de vida de la obra; y hasta existen algunos puentes, como los de l'Esbly, con gatos debidamente dispuestos y preparados continuamente para este género de operación. Sin embargo, no pasan de ser casos aislados y de unas obras de tal novedad estructural que su estudio experimental continúa siendo una de las razones principales de su existencia.



VII-4. Red de isostáticas de un arco.

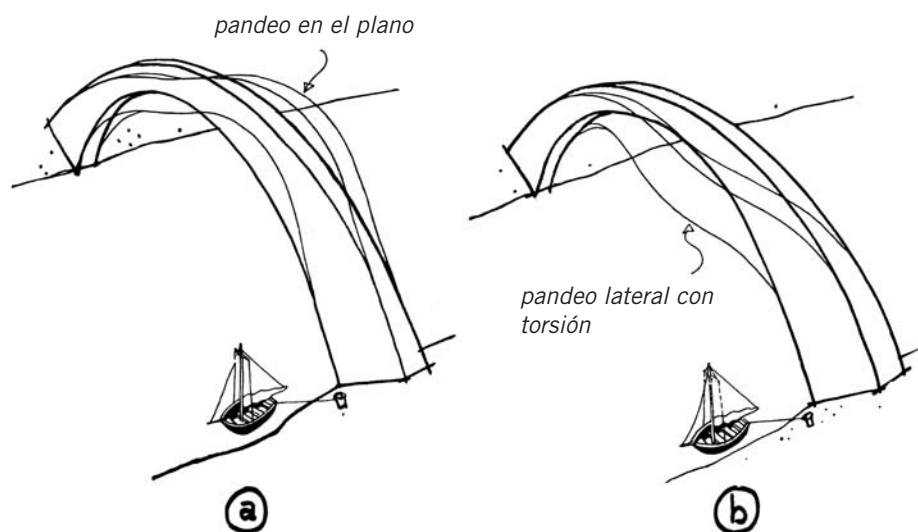
En el acero no hay que contar con las deformaciones lentas, ni con la retracción; sin embargo, las tensiones térmicas son muy importantes, pues siguen con facilidad las variaciones de temperatura ambiente y aun las superan cuando actúa la radiación solar directamente sobre el metal.

Por otra parte, si bien es cierto que su menor coeficiente económico-resistente en compresión lo hace, al parecer, menos apto que el hormigón para el trabajo fundamental como arco; en cambio, el acero es capaz de soportar las flexiones más eficazmente. Y, sobre todo, su peso es mucho menor a igualdad de resistencia y, por consiguiente, su utilización llega a ser ventajosa cuando la luz alcanza límites para los cuales el hormigón armado requeriría secciones y pesos demasiado fuertes.

Este punto es fundamental y ha de tenerse siempre presente; las grandes luces producen grandes esfuerzos; el material más resistente o más apto las resiste con menos peso, y como el peso tiene, en estos casos de grandes luces, mucha importancia frente a la sobrecarga, resulta que la economía del material más resistente está, en cierto modo, doblada. Así resulta que, con arcos de hormigón armado, sólo se ha llegado a 264 metros de luz en el puente de Sandö (fig. VII. 3). En cambio, con arcos de acero se han sobrepasado los 500 metros (fig. XIV. 13). Todo ellos independientemente de las razones económicas que reducen, aún más, las luces del hormigón frente a las de acero por cuestiones constructivas; pues el hormigón requiere cimbras costosas, mientras que el acero ofrece métodos de montaje relativamente fáciles sin cimbra.

Por último, el mayor peso del hormigón da empujes mayores y requiere cimientos y terrenos más fuertes que las soluciones metálicas.

La madera se emplea poco en arcos definitivos, por los defectos indicados al hablar de este material y porque se presta mal a adoptar las formas curvas del arco si éste no es de gran radio de curvatura. Existen algunos ejemplos, raros e interesantes, de arcos de madera con gruesos maderos; pero, en general, se tiende más a la forma de falso



VII-5. Pandeos de un arco.

arco o vigas con jabalcones múltiples, donde los elementos fundamentales quedan arriostrados con facilidad y eficacia.

Freyssinet desarrolló la técnica de maderas delgadas, claveteadas con puntas pequeñas y múltiples y rejuntando los ensambles a compresión con mortero de cemento. Así construyó, con todo éxito, la cimbra en arco, de 176 metros (fig. VII. 6) de luz, para el puente de Plougastel y, aun cuando la nueva técnica fracasara por otras razones en el puente de Sandö, no cabe duda que es una solución interesante y un tipo estructural de grandes posibilidades.

Más modernamente se han llegado a hacer arcos de 60 metros de luz, con maderas encoladas; como, al mismo tiempo, va resolviéndose el problema de hacerlos económicos, incombustibles e imputrescibles, cabe prever un gran desarrollo para esta nueva técnica.

Es típico del arco el dar empujes horizontales sobre los apoyos. Si la directriz siguiese exactamente el funicular de las cargas, la resultante, sobre el arranque del arco, seguiría la tangente a la directriz; por tanto, en el arranque resulta tanto más tendida y, al mismo tiempo, tanto mayor cuanto más rebajado es el arco. El empuje horizontal es del orden de la carga vertical total de arco por el octavo del rebajamiento, o cociente de la luz por la sagita del arco. En el empotrado, los empujes son algo menores, por cuanto la flexión ayuda al trabajo resistente; pero, ni la diferencia es muy grande, ni interesa disminuirla aumentando la rigidez, ya que, en general, el trabajo de flexión resulta más caro que el de compresión.

Consiguientemente, el arco requiere siempre una buena cimentación o unos buenos contrarrestos para soportar estos empujes. Ciertamente, puede lograrse el mismo



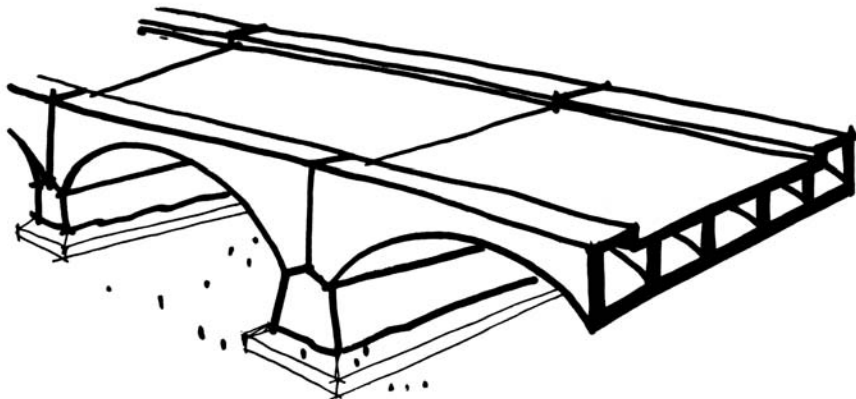
VII-6. Cimbra flotante para el puente de Plougastel. Ingeniero E. Freyssinet. Fotografía: J. Moalic.

efecto atirantando el arco; pero, con ello se pierde la ventaja principal, consistente precisamente en que el arco sustituye el tirante, como elemento estructural, por el terreno; es decir, por otro elemento exterior a la estructura. Si este elemento ya existe, como sucede con el terreno, la economía es evidente; y, como la tracción en el tirante viene a ser del mismo orden que la compresión en el arco, la economía puede valorarse, en cierto modo, en un 50 por 100. Si el material, resistente a la tracción, del tirante es más caro, por tonelada de esfuerzo, que el resistente a la compresión del arco, la economía puede ser aún mayor teóricamente.

Puede, pues, decirse que el arco juega con truco; escamotea parte de las funciones estructurales, pasándolas a otro elemento externo a la estructura propiamente dicha y existente con anterioridad, cual es el terreno. Bastaría que los apoyos permitiesen el deslizamiento horizontal del arco, para que dejase de empujar horizontalmente sobre el terreno y se convirtiese en una simple viga curva trabajando en flexión igual que si fuese recta.

El arco puede ser empotrado o articulado, con una, dos o tres articulaciones. El más sencillo, en teoría, es el triarticulado, porque es isostático; y, en consecuencia, presenta la ventaja de no producir esfuerzos, ni por variaciones térmicas o higroscópicas, ni por deformación lenta. Sin embargo, las rótulas constituyen, en general, un motivo de encarecimiento y debilidad en el conjunto. En cambio, los esfuerzos de flexión disminuyen en las proximidades de las articulaciones para concentrarse en las zonas intermedias entre ellas. La ventaja del arco triarticulado en el caso de asientos es evidente, y hasta puede su empleo llegar a ser obligado por esta causa. Como, en general, los giros son pequeños, se puede emplear la rótula plástica (fig. V. 3), que resulta muy económica y eficaz siempre que el esfuerzo de compresión no sea demasiado grande.

Tanto el arco biarticulado como el monoarticulado, son tipos intermedios que presentan parcialmente las mismas ventajas e inconvenientes antedichos. Son más deformables que el empotrado; y, a igualdad de tensiones admisibles, pueden servir para rebajar las térmicas y similares dentro de los límites aceptables. Pero no tratán-



VII-7. Arcos enjutados.

dose de arcos atirantados, no tienen realmente ventaja definida y son menos empleados. En cambio, en los casos de arco atirantado o de arco sobre cimientos que no admitan excentricidades fuertes, puede decirse que el arco articulado es obligado.

El arco triarticulado se presta a ser rigidizado por los tímpanos que apoyan sobre él, siempre que no haya muros de acompañamiento o que se establezcan las oportunas juntas entre las manguardías y las enjutas que mueven con el arco (fig. VII. 7). La libre deformación, que permiten las rótulas, hace que desaparezcan los inconvenientes de la rigidez del tímpano con el resto del muro de acompañamiento y de estribo. Por eso, con el acero, la solución de arco triarticulado, con los tímpanos triangulados, es muy racional y económica para puentes de tablero superior al arco rebajado.

La sección clásica de los arcos de fábrica es la rectangular y no hay, realmente, por qué separarse de ella mientras razones específicas del caso no lo pidan. El ancho viene frecuentemente impuesto por el peligro de pandeo. En general, se mantiene constante el ancho; y, si se varía el canto, es aumentándolo hacia los empotramientos. Efectivamente, en arcos escarzanos, si las cargas son verticales, el empuje aumenta, más o menos, en proporción inversa del coseno del ángulo que la directriz forma con la horizontal; y una ley de espesores, tal como esa, produce una sensación satisfactoria. Desde el punto de vista de la resistencia, lo que determina principalmente los cantos son las flexiones que normalmente se concentran hacia los arranques. La cuestión va ligada con la del trazado de la directriz.

En el arco articulado, la forma lógica lleva a disminuir los cantos hacia las rótulas donde las flexiones son nulas. Y es curioso observar que, si otra razón, funcional o estética, no obligase a mantener el plano vertical del paramento, lo lógico, tensionalmente, sería mantener la variación de cantos antedicha, aumentando al mismo tiempo los anchos hacia las rótulas para repartir el empuje sobre ellas en mayor longitud, tendiendo a que la sección resistente a la compresión se mantuviese constante, puesto que la compresión no se reduce, en aquéllas, como la flexión.

Tampoco las posibilidades y ventajas de un arco bi o triarticulado, sobre fuertes ménsulas de arranques, han sido suficientemente consideradas. La técnica actual huye, en general, de las rótulas por la complicación y encarecimiento que producen; pero hay que tener en cuenta que estas razones no existen prácticamente con la rótula plástica, de hormigón armado, para luces relativamente pequeñas o medianas; y que, mientras las cargas no sean muy fuertes, su utilización puede ser de gran ventaja.

La sección rectangular no es, sin embargo, la única ni la mejor en todos los casos. En arcos de acero, se requiere casi siempre ir a secciones compuestas para aumentar la rigidez al pandeo sin exagerar inútilmente el peso de material utilizado. Las secciones formadas de cuatro cabezas, enlazadas por triangulaciones, son las que más se han utilizado con este material; pero las secciones en cajón, formadas fundamentalmente de dos palastros de cabeza, roblonados con angulares o directamente soldados a otros dos o más que formen las almas, no sólo permiten soluciones económicas en muchos casos, sino que producen un efecto muy limpio y satisfactorio a la vista.

Con el hormigón armado es necesario recurrir también a secciones en cajón rectangular, o análogas, cuando las luces son excepcionalmente importantes. Ciertamente esto

resulta costoso y engorroso de hacer por la dificultad de desmontar y extraer los moldes interiores; tanto que, en algunos casos, se ha preferido dejarlos perdidos.

Mucho se ha escrito sobre la elección de la directriz conveniente del arco; y, efectivamente, interesa su afinamiento cuando se trata de grandes luces y fuertes cargas muertas. Aparte del rebajamiento que suele venir impuesto por otras condiciones, no de tipo resistente, la forma de la directriz no viene influida sensiblemente por los esfuerzos térmicos o de retracción, sino más bien por las cargas muertas y por el tipo de sobrecarga viva que haya de soportar el arco.

Para pesos propios del arco solamente y con espesor constante, el funicular es la catenaria. Para carga uniformemente repartida a lo largo de la cuerda, la directriz teórica es la parábola de segundo grado. En la práctica de puentes, con el peso del tablero, tímpanos más o menos aligerados y arcos de espesor variable, van bien las parábolas de cuarto o mejor de sexto grado. Cuando la sobrecarga móvil es fuerte respecto al peso propio, la forma de la directriz pierde importancia; y lo que se puede hacer es tantear los funiculares y leyes de tensiones máximas para elegir una directriz apropiada.



VII-8. Dintel de puerta, en la Torre de los Lujanes, Madrid. Fotografía: M. García Moya.

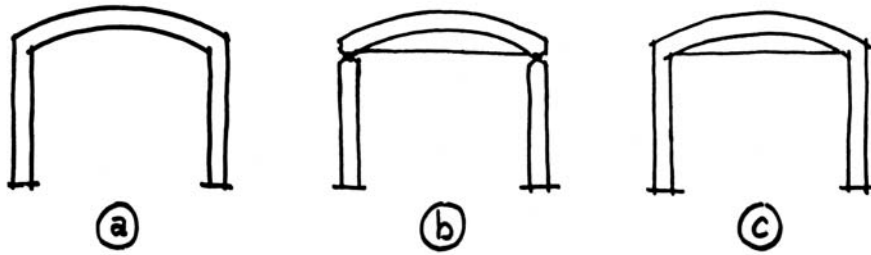
Frecuentemente, el rebajamiento del arco es libre dentro de ciertos límites; cuanto mayor es el rebajamiento, mayor es la compresión en el arco y el empuje sobre el estribo. Por el contrario, al disminuir el rebajamiento sin reducir la luz del arco, aumenta la flexión transversal por empujes laterales de viento y, en cambio, disminuyen los esfuerzos de retracción, etc. Si no hay razones funcionales, constructivas o de otro tipo, para la elección del rebajamiento, el problema llega a ser embarazoso. Hay que resolverlo por tanteos; pero, normalmente, se eligen rebajamientos entre $\frac{1}{5}$ y $\frac{1}{7}$. Al llegarse al décimo, los efectos tensionales de retracción y términos aumentan mucho, sobre todo en arcos empotrados y relativamente rígidos. Claro es que, por el efecto de la compresión consiguiente al rebajamiento mayor, las excentricidades del funicular son menores, ya que la compresión aumenta.

En fin, el rebajamiento no puede aumentarse excesivamente, no sólo por el excesivo aumento de estos empujes horizontales, sino porque se llegaría a un fenómeno de flexión excesiva, e incluso de pandeo ayudado por el acortamiento de la directriz, fenómeno que puede agravarse en los puentes de hormigón, por efecto de la deformación lenta. Fueron precisamente los movimientos de este género en un arco muy rebajado, los que condujeron a Freyssinet a inventar su maniobra de apertura de clave.

Por el contrario, al disminuir el rebajamiento más allá del cuarto, el empuje va disminuyendo más lentamente que aquél y pierde interés el peraltado frente a los inconvenientes que lleva consigo, de pandeo lateral, etc. Por ello, no se adoptan normalmente estos peraltes sin otras razones que induzcan a ello: forma del valle, aspecto estético, etc.

Todo esto tiene importancia fundamental en arcos de puentes con dimensiones extraordinarias, donde las razones económicas, de disminución de material y de peso, pasan a primerísimo plano. Lo contrario ocurre en arcos pequeños acompañados por tímpanos macizos. En ellos la rigidez, que estos elementos prestan al arco, permite una gran libertad en su trazado. El intradós del arco, y aun su trasdós, se independizan de la línea de empujes del conjunto; y casi puede decirse que ésta pierde totalmente su personalidad. El régimen tensional deja de corresponder al de una pieza prismática o arco, tensionalmente hablando. Hay que mirarlo más como un problema de elasticidad plana, en el que la red de isostáticas, antes comentada, es la única representación real del fenómeno tensional; y aun ella puede venir, en el caso de la cantería, muy alterada por el despiezo que se haya elegido para el arco y para la zona de tímpano colindante. Solamente en hormigón armado tendrá sentido y aplicación su estudio para disponer las armaduras según las máximas tracciones, y para comprobar que las compresiones, en el macizo, son resistibles por el hormigón (fig. VII. 4). Pero, ya se ve que el tipo de armaduras que resulta, nada tiene que ver con el clásico de un arco exento.

El arco, o, mejor dicho, la archivolta, en este caso, se reduce casi a un elemento ornamental, no superfluo o arbitrario, sino de origen y de valor representativo mecánico evidente; pero cuya vivencia es esencialmente una simbiosis con el muro, cuyo borde acusa y realza. El arte clásico consagró el medio punto como valor de plenitud de este arco; porque, no existiendo otras razones, la forma más simple y uniforme es la preferida. En realidad, el arco elíptico peraltado rebaja los máximos de tensión, y



es extraño que no haya sido más utilizado arquitectónicamente. El dispositivo de las puertas rectangulares, de dos hojas abisagradas, induce al hueco rectangular; y, para aproximarse a él, se han utilizado más frecuentemente el arco carpanel o el escarzano sobre mochetas verticales; y, en último extremo, el dintel recto y dovelado (fig. VII. 8) no es más que un arco enmascarado por las líneas rectas de intradós y trasdós, cuya oblicuidad respecto al dovelado acusa claramente la falta de justificación tensional.

En fin, el proceso de construcción ha de venir a plantear también sus exigencias; pero como esto sólo tiene importancia en el caso de grandes arcos, cuya utilización está prácticamente reservada a los grandes puentes, será mejor dejar su comentario para más adelante, cuando de ellos y del proceso constructivo se trate.

El pórtico es un arco de directriz poligonal o mixta (fig. VII. 9). Es un arco mal trazado, cuya directriz se separa mucho, en general, del funicular de las cargas. Como consecuencia de ello, el trabajo de compresión es pequeño respecto al de flexión; pero viene en ayuda de éste y presenta, sobre el sistema de viga y soportes, la ventaja de que aquélla transmite a éstos parte de su flexión.

El pórtico más elemental es el que forma la viga con sus dos soportes, cuando las tres piezas están monolíticamente unidas entre sí. La viga se empotra sobre los soportes; éstos flexan, y las flexiones que sufren alivian las de la viga. En pórticos peraltados, siendo pequeño el trabajo de compresión, puede pensarse que el área de momentos flectores, o integral de éstos a lo largo de las tres piezas, sea mínimo para lograr un buen ahorro de material. Pero, por lo general, son otras razones funcionales las que determinan cuál de las dos soluciones, la de pórtico o la de viga apoyada sobre soportes, es la más económica. Ello depende de dónde se pueda dar, a la pieza, mayor canto o momento resistente. Así, por ejemplo, si interesa disminuir el canto de la viga en el centro para mejorar las condiciones de gálibo, será mejor el pórtico; si, por el contrario, hay poco ancho para los soportes, puede ser mejor articular éstos en sus cabezas para suprimir las flexiones en ellos, y disminuir su espesor.

Siempre es preferible que, dentro de las exigencias funcionales, los pórticos se aproximen lo más posible al funicular para evitar las flexiones que suelen ser las costosas de resistir; los efectos térmicos influyen poco, en general, por tratarse normalmente de pórticos peraltados y flexibles.

El pórtico, como el arco, puede ser empotrado o articulado, con una, dos o tres articulaciones, y puede llevar uno o varios tirantes para cortar las flexiones y acercar

el funicular a la directriz; si bien, en este caso, ya no puede hablarse de un pórtico simple, sino que se trata de una estructura más compleja.

El pórtico sin tirante de la figura VII. 9a, que sufriría fuertes flexiones, se convierte en un tranquilo arco atirantado sobre soportes (b), gracias a las articulaciones; y en un pórtico atirantado, sin ellas (c), lo que proporciona una solución intermedia entre las dos anteriores. Según el material, las dimensiones, las proporciones y los tipos de carga, podrá convenir mejor una u otra solución.

El pórtico, como todos los elementos en flexión, requiere materiales resistentes a la tracción y a la compresión. La madera no se presta demasiado bien para transmitir tracciones ni flexiones a través de sus ensambles; y quedan, como materiales apropiados, el acero y el hormigón armado. Como estos pórticos no suelen ser de luces demasiado grandes, el mayor peso del hormigón puede influir poco y permitirle competir bien con el acero. La sección en T, propia del hormigón, puede amoldarse a los cambios de signo de los momentos flectores que parecen en el pórtico, pasando la cabeza de la T del trasdós al intradós, según convenga.

El pórtico suele ir arriostrado transversalmente; de no ser así, presenta el peligro de pandeo fuera de su plano, por flexión transversal o por flexión combinada con torsión, igual que el arco. En su plano, el pandeo es más difícil que en el arco, porque el pórtico suele ir dispuesto con mayores momentos de inercia que aquél, ya que sus excentricidades y las flexiones consiguientes son también mayores; y esto es, quizá, lo que más diferencia el pórtico del arco, desde un punto de vista puramente mecánico.

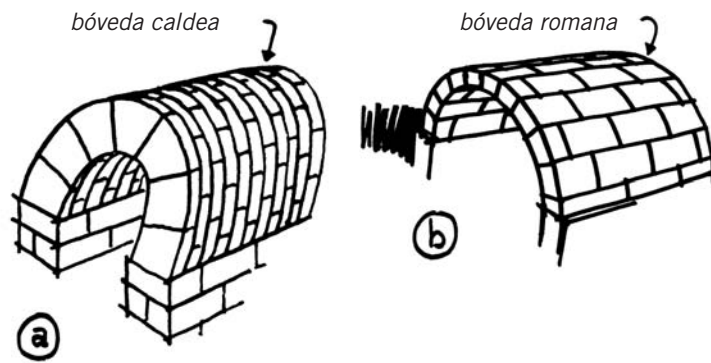
VIII

La bóveda y la cúpula

La bóveda es uno de los elementos de más historia en la técnica de la construcción; y, de entre ellas, es a la bóveda en cañón a quien corresponde la primacía. Parece ser que los griegos concedían a Demócrito los honores del invento, pero debía ser sólo una patente de introducción porque los egipcios la utilizaban ya, hace bastante más de 4.000 años.

La bóveda continua, sobre muros corridos, podría considerarse como una sucesión de arcos independientes colocados uno al lado del otro. Sin embargo, tiene algo que supera este concepto simplista; y ese algo es su continuidad a lo largo de las generatrices, que le permite trabajar con flexión según esa dirección. Cada arco puede, de esta forma, ayudarse de los contiguos, repartiendo el exceso de carga que puede concentrarse sobre él.

Este concepto ha ido desarrollándose poco a poco, confusamente primero, y con toda claridad y consecuencia en las modernas estructuras laminares, en las que la función primaria de arco llega a desaparecer. En las primitivas bóvedas, el dovelado respondía a la simple idea de arcos contiguos con junta completa entre uno y otro. Muy curioso e instructivo es el tipo de bóveda (fig. VIII. 1a) desarrollado por los antiguos constructores de Oriente Medio utilizando el ladrillo; la inclinación, dada al plano de los arcos y el poco espesor, normal a él, de las dovelas, hacía fácil su colocación en obra sin necesidad de cimbras ni apeos. Es un caso típico de la influencia que las conveniencias del proceso de construcción y del propio material pueden ejercer sobre el tipo estructural; pero de esto se hablará más extensamente en otro capítulo. En el arte romano, ya, el engarce, entre un arco y el contiguo, es el corriente hoy día; con él se evita la separación y desnivelación posible entre un arco y otro (fig. VIII. 1b). Las juntas seguidas, en lugar de ir entre arco y arco, van entre dovela y dovela, correspondiéndose a todo lo largo de la generatriz, como si se tratase de un arco único de ancho igual a la longitud de la bóveda.



VIII-1. Bóvedas caldea y romana.

Las ventajas de este tipo de aparejo se acusan especialmente al emplear los arcos perpiaños como refuerzos de la bóveda. Estos arcos no son solamente elementos ornamentales, que cortando la monótona continuidad del cañón mejoran su aspecto, recintando el espacio; son verdaderos elementos de refuerzo, cuyo efecto se extiende a toda la bóveda, a lo largo de las generatrices, gracias a la rigidez de la misma en esta dirección. En la bóveda de cantería, el efecto no puede extenderse tanto como en otros materiales más resistentes y deformables por flexión; y, por eso, los arcos perpiaños requieren repetirse con frecuencia para ejercer su beneficioso efecto.

Las bóvedas, en general, cualquiera que sea su directriz, dan empujes inclinados sobre sus estribos; y, si éstos van sobre muros verticales, requieren un gran espesor, para lograr que su propio peso centre la resultante sobre la base de sustentación. Al mismo tiempo producen esfuerzos cortantes tendentes a hacer deslizar los sillares de arranques sobre sus juntas horizontales, o los del muro que sostiene la bóveda, peligro que no debe olvidarse en este tipo de estructura.

La bóveda, con arcos perpiaños, tiende a concentrar sus empujes sobre estos anillos más rígidos, y se presta, por tanto, a transmitirlos a los contrafuertes de que atinadamente se provee el muro, a plomo de aquéllos.

Las bóvedas en cañón se prestan muy bien a cubrir un espacio rectangular mediante la yuxtaposición de varias bóvedas paralelas, contrarrestando, mutuamente, sus empujes. Las resultantes, sobre los muros intermedios, son, entonces, verticales, y éstos pueden ser más ligeros y apoyar sobre columnas sin necesidad de contrarresto. Sin embargo, hay que tener en cuenta que el equilibrio resulta inestable mientras no se cuente con la resistencia a la flexión de la columna o de las propias bóvedas. Bastaría una pequeña diferencia de cargas, de una bóveda a otra, para que se produjese el hundimiento. En estos casos, la estabilidad procede más bien de la rigidez contra movimientos horizontales de la propia bóveda, como se verá con más detalle al estudiar las láminas cilíndricas de hormigón armado. Si las bóvedas empotran por sus directrices extremas, en otro muro transversal de cierre, es la rigidez de éste, transmitida a través de la propia rigidez de la bóveda, la que da realmente estabilidad al conjunto.

El enlace de dos bóvedas puede realizarse, no solamente a lo largo de una generatriz común, sino en otra multitud de formas; y la combinación de varias bóvedas cilíndricas ha dado, así, lugar a realizaciones tan interesantes, desde todos los puntos de vista, como son, por ejemplo, las bóvedas por arista y en rincón de claustro.

Si esta última parece ser la que más naturalmente se adapta a cubrir un polígono limitado por muros macizos, la bóveda por artista (fig. VIII. 2), en cambio, es la consecuencia obligada del deseo de llevar los empujes a puntos aislados. Si se trata de un elemento solo, dará empujes inclinados que requerirán contrafuertes en los soportes. Si son varios contiguos, los empujes pueden equilibrarse y dar resultante vertical sobre las columnas intermedias, con todas las elegantes posibilidades que utilizó el medioevo. El valor de la bóveda por arista nervada alcanza, en fin, su completo desarrollo estructural cuando las generatrices de la plementería, a su vez, se curvan para formar cúpulas rebajadas entre nervios, en el estilo Plantagenet.

VIII-2. Bóvedas por arista de una estación subterránea de Madrid. Ingeniero E. Torroja. Fotografía: Cartagena.



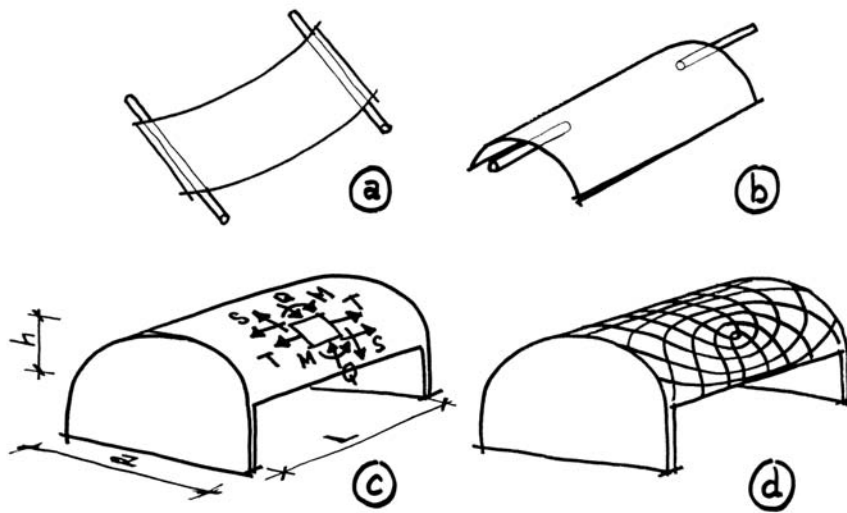
Es difícil averiguar cuál es el verdadero reparto de tensiones que se produce en una bóveda por arista; y, si es de piedra, ello depende mucho del tipo de aparejo y líneas de junta que se establezcan. Aun en la bóveda hecha con un material continuo, el cálculo no ha llegado a deducir la red de isostáticas que tendrá lugar; pero puede asegurarse que no se trata de simples bóvedas o series de fajas abovedadas cargando sobre los arcos que pudiesen formar las aristas.

Estas, en realidad, no son más que líneas de intersección de dos bóvedas; y el nervio no es imprescindible, en ellas, como elemento resistente.

No cabe aquí analizar todo el fascinante bosque de soluciones a que da lugar el encuentro de bóvedas diversas, torales, lunetos, etc. Las obras de cantería de este género están hoy desplazadas por los nuevos materiales y las nuevas técnicas; si bien, en su comportamiento y meditación, continúa encontrando hoy el técnico, como en todas las épocas, lecciones y goces de valor inapreciable.

La lámina cilíndrica es una estructura totalmente diferente de la bóveda en cañón. Ésta se mantiene dentro de los conceptos esenciales expuestos, con cualquier material frangible, sea piedra o ladrillo; pero al aparecer el hormigón armado, se presenta y se utiliza su resistencia a la tracción para alcanzar soluciones más ligeras y de fenómeno tensional más complejo. Con él se crea un tipo estructural totalmente nuevo: la lámina cilíndrica sobre arcos rígidos o muros transversales distanciados y colocados según las directrices, es decir, sin necesidad de apoyo de la misma sobre las generatrices de arranque.

Si se coge una hoja de papel y se la quiere sostener horizontalmente sobre dos de sus bordes paralelos (fig. VIII. 3a), se observa que se dobla y se cae por falta de resistencia a la flexión. Pero, si se la sostiene de los centros de esos lados, dejándola que



se curve (b) por su peso a uno y otro lado de la recta que une los puntos de apoyo, se sostiene perfectamente gracias a la forma curvada que ha tomado. La superficie cilíndrica, así formada, trabaja como una viga cuya sección transversal viene determinada por la directriz del cilindro.

Este simple experimento enseña, por sí solo, cuál es la ventaja fundamental de este tipo estructural.

La lámina, aunque tenga la forma de una bóveda, es tensionalmente otra cosa completamente distinta; mucho mejor que a una bóveda podría asimilarse a una viga.

Si en lugar de sostener el papel por dos puntos solamente, se le apoya sobre dos paredes o vigas de rigidez (fig. VII. 3c) que se fijan el contorno por las directrices extremas, las condiciones de resistencia y de rigidez se mejorarán mucho. Es fácil apreciar que, si las directrices no terminan en tangentes verticales, las zonas próximas a las generatrices de borde y estas mismas generatrices se curvan ligeramente, venciendo la escasa resistencia del papel a doblarse. ¿Cuál es, en realidad, el fenómeno tensional de este elemento estructural; cómo se sostiene y cómo trabaja?

Para comprenderlo conviene considerar las tensiones y los esfuerzos agrupados en dos conjuntos diferentes. Podrían llamarse primarias las tensiones longitudinales T (fig. VIII. 3c), que más o menos se reparten como en una viga, y las tensiones cortantes S que actúan en el plano tangente a la lámina. Pero, además, deben incluirse, en este grupo, las tensiones Q (tracciones o compresiones) según la directriz.

Aparte de éstas, se presentan otras debidas a la deformación que toman las directrices —sobre todo las centrales—, y que dan lugar a ese hundimiento o flecha de los bordes, antes citado. Estos momentos flectores M y los esfuerzos cortantes consiguientes N varían tanto a lo largo de la directriz como de la generatriz. Su importancia no es, ni con mucho despreciable, y puede ser causa de la rotura y hundimiento de la lámina, por razón del pequeño espesor de ésta. La ley de reparto de estos esfuerzos,

a lo largo de la directriz, depende mucho de la forma de ésta y de que las generatrices de borde estén libres o ensambladas en una u otra forma a otros elementos contiguos. En su determinación estriba la mayor dificultad de cálculo.

Respecto a los tres primeros esfuerzos $-T$, S y $Q-$, ha de señalarse que, estando los tres en el plano tangente, dan lugar, lo mismo que en elasticidad bidimensional, a dos tensiones principales y a dos familias de isostática parecidas, en cada faldón de lóbulo, a las de una viga plana. Dibujadas sobre el cilindro, dan lugar a figuras como la representada en la figura VIII. 3d.

La importancia de las tensiones longitudinales T es tanto mayor cuanto más pequeña es la altura total o sagita en relación con la luz; y las cortantes aumentan igualmente al disminuir la pendiente media de la directriz en cada faldón. Ambas razones condicionan, pues, las proporciones de la lámina, estableciendo unos límites de esbeltez y rebajamiento, por bajo de los cuales es peligroso pasar.

Lo mismo sucede con el espesor necesario para soportar las flexiones transversales. Pero, aun así, este límite permite frecuentemente alcanzar relaciones de espesor a luz, del orden del $1/500$. Esto demuestra la ligereza que el hormigón armado puede obtener en estructuras superficiales, gracias a la cual se han podido construir elementos de este tipo de 55 metros (fig. VIII. 4) de luz sin agotar, ni con mucho, las posibilidades.

En todo caso, la rigidez transversal puede aumentarse mucho, con pequeño incremento del peso, estableciendo anillos de rigidización según directrices oportunamente espaciadas a modo de perpiñones, para constituir la llamada lámina heterogénea.



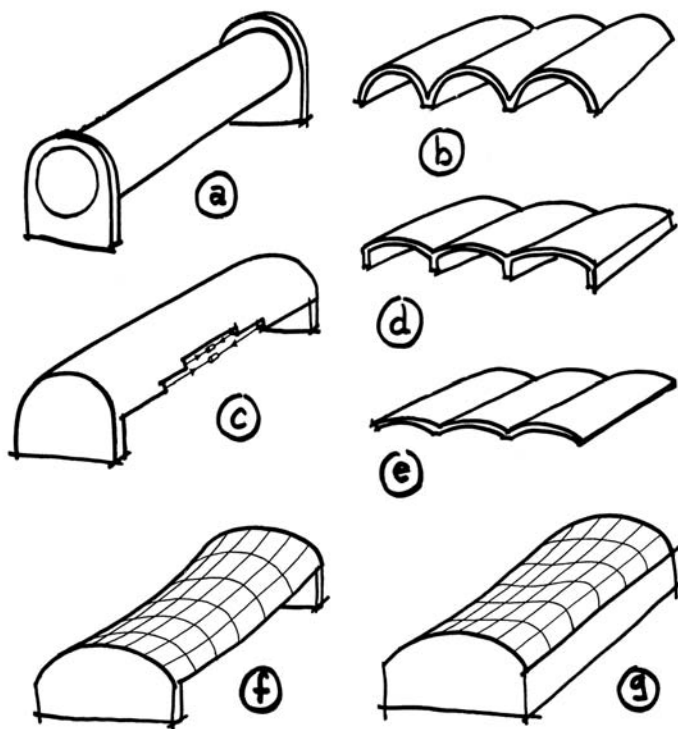
VIII-4. Viga díptera del Frontón Recoletos, Madrid. Fotografía: S. v. Kaskel.

Es muy interesante observar que, si el cilindro fuese completo (fig. VIII. 5a) o de directriz cerrada —circular, elíptica, etc.—, el equilibrio sería posible sin necesidad teórica de ninguna resistencia a flexión de la lámina; y, por tanto, admitiría un espesor todo lo reducido que permitiese la seguridad al pandeo que podría producirse por el efecto de las compresiones que aparezcan según las generatrices.

En estos casos se dice que se trata de un estado díptero o de equilibrio de membrana pura. Esto no quiere decir que no haya flexiones en absoluto, pues las deformaciones, que se producen en las directrices, llevan necesariamente consigo momentos flectores tanto mayores cuanto más fuerte sea el espesor de la lámina; pero no serán de importancia para el equilibrio general del sistema.

Si estas láminas cerradas se cortan por el plano diametral horizontal (fig. VIII. 5b) y sólo soportan los pesos propios, la anti-simetría, de estos pesos de la lámina cerrada respecto a ese plano, hace ver que las tensiones Q , en las generatrices de borde, han de ser nulas; y el equilibrio primitivo puede restablecerse por la sola introducción, en esas generatrices de borde, de unas armaduras postesadas que restablezcan las tensiones cortantes S que la parte inferior ejercía sobre la superior (fig. VIII. 5c).

Pero, corriente y modernamente se prefiere suprimir los faldones en su zona de directriz próxima a la vertical, para evitar sus dificultades de hormigonado y el doble encofrado; la sección se forma entonces por arcos escarzanos enlazados con vigas verticales delgadas (fig. VIII. 5d); o bien se constituye la estructura con aquéllos solos, como en el ejemplo de la figura VIII. 5e, lo que resulta más estético y más económico de encofrado.

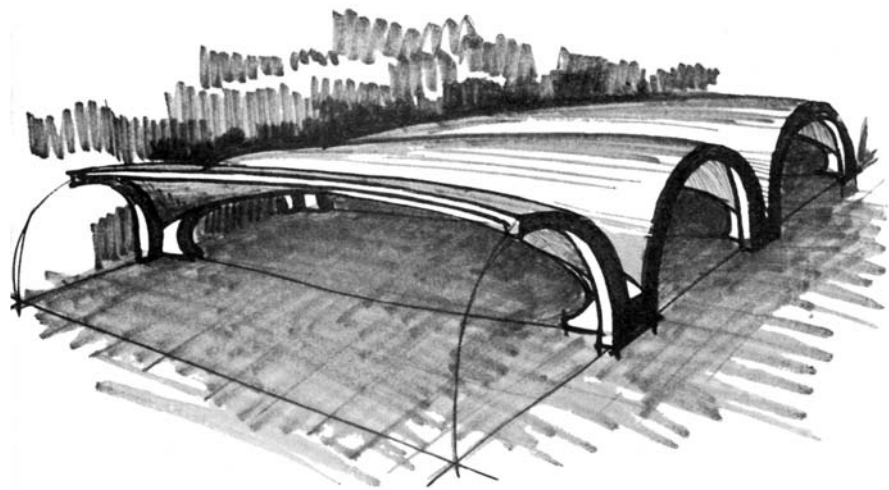


VIII-5. Láminas cilíndricas.

En este caso, no resultan nulas las compresiones Q , que el resto del cilindro completo produciría sobre el trozo que queda, a lo largo de sus generatrices de borde. Claramente se comprende que, al desaparecer esas reacciones que mantenían el equilibrio, los faldones, faltos de contrarresto, tienden a caerse o a bajar; y, para evitar la rotura, se requiere que la lámina trabaje a flexión, sosteniendo los faldones como ménsulas sujetas en la parte más central, sobre unas fajas que, a modo de arcos albeados, van desde las puntas hacia la zona central y de clave; arcos a los que sirven de tirante las generatrices de los bordes o, mejor dicho, las armaduras que se alojan próximas a ellos. En la figura VIII. 5f se han dibujado, las directrices en las que se aprecia la deformación de su curvatura que provoca su flexión como ménsulas.

Por eso, estas flexiones se reducen si a las generatrices de borde se les proporciona un apoyo o un enlace que dificulte su descenso; pero, aun así, no desaparecen totalmente ni se altera fundamentalmente el fenómeno tensional que procede de la mayor rigidez que el marco de borde presta a las directrices extremas respecto a las del resto de la lámina.

La bóveda en cañón simple, uniformemente cargada, no es, pues, más que un caso particular del de la lámina cilíndrica, en el que todas las directrices tienen iguales características e igual libertad de deformación; y todas y cada una de ellas toman la que les pide su trabajo, como arcos independientes. Pero, aun cuando la bóveda apoye y se estribe sobre muros rígidos a lo largo de sus dos generatrices de borde, bastará que se la construya de un material elástico, resistente a la tracción y a la compresión, y se la enlace a muros transversales de fondo (fig. VIII. 5g) rigidizando, con ello, sus directrices extremas, para que todas las directrices no puedan deformarse por igual. Las directrices centrales se deforman, mientras que las extremas no; y, en consecuencia, las generatrices (excepto las de borde) se curvan. Si el espesor es pequeño respecto a la longitud, esta flexión de las generatrices es pequeña e influye poco en el fenómeno resistente.



VIII-6. Bóvedas del
vestíbulo subterráneo del
Hipódromo de Madrid.

Para que las directrices centrales se deformen por flexión y las extremas no, tienen que producirse deslizamientos tangenciales a la directriz, o sea, en el plano tangente a la lámina; deslizamientos para los cuales esta lámina ofrece mucha rigidez. En realidad, son los esfuerzos cortantes S , correspondientes a estos deslizamientos, los que determinan la diferencia en la forma de trabajo de la lámina respecto de la simple bóveda formada por arcos independientes de igual deformación en todos ellos.

Igual que en una viga, la integración a lo largo de la lámina, de los esfuerzos cortantes S , es la que determina, en cada fibra o generatriz, su tensión longitudinal T .

Los lóbulos cilíndricos se prestan, aún mejor que las bóvedas en cañón clásicas, a enlazarse, unos con otros, con orientaciones diferentes para formar láminas polilobulares, en rincón de claustro, con encuentros por aristas, etc. Y, en fin, los múltiples tipos de láminas de doble curvatura amplían indefinidamente las posibilidades, llegando a ejemplos tan originales como el de la figura VIII. 6.

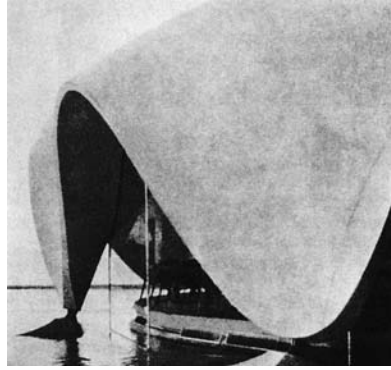
En estos tipos estructurales (fig. VIII. 7) no debe concebirse el conjunto mecánico resistente como formado por unos arcos formeros sobre los que viniesen a apoyar los arcos secundarios de las directrices torales. Es más bien un conjunto de arcos primarios cuyas directrices de doble curvatura en el espacio se amoldan a una familia de isostáticas, mientras la segunda familia establece las fuerzas de contrarresto, entre cada arco primario y sus contiguos, para centrar el funicular de presiones sobre su directriz alabeada.

Solamente después de meditar y asimilar ideas de este tipo, podrá el proyectista, técnico y artista, sacar de estos elementos estructurales el caudal de posibilidades de todo género que, en gran parte, guardan oculto todavía. (fig. VIII. 8)



VIII-7. Iglesia de S. Engelbert, Colonia. Arquitecto Dom Böhm. Fotografía: Hugo Schmölz.

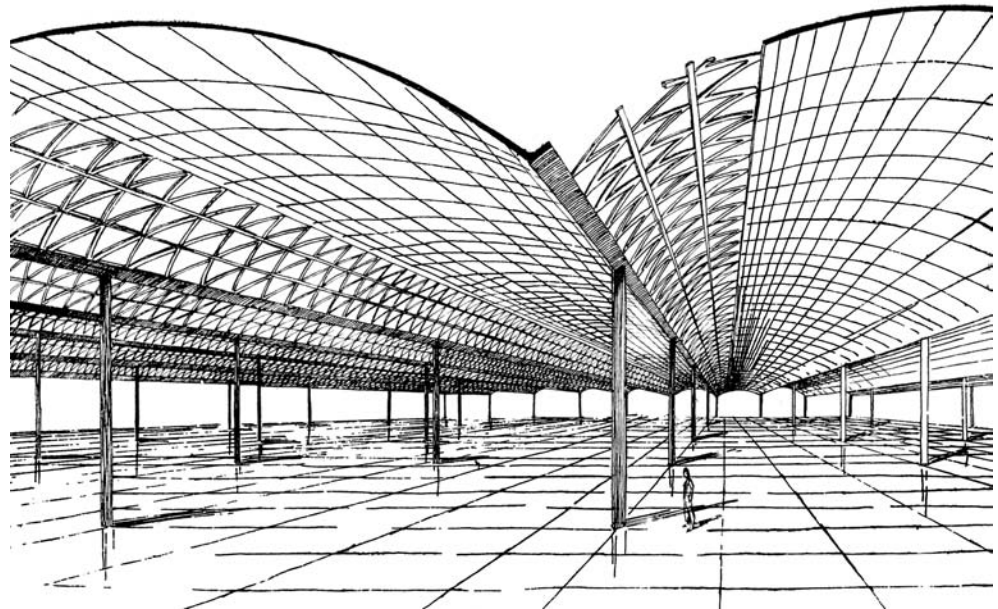
VIII-8. Club del Hotel La Concha, en San Juan de Puerto Rico. Arquitectos Warner Burns Toan & Lundy; Toro y Ferrer. Ingenieros Paul Weidlinger y Mario Salvadori.



Su aplicación puede hacerse, no solamente con materiales o superficies de tipo continuo, sino también en estructura metálica, haciendo que la triangulación se inscriba en la superficie ideada; a la que viene, así, a sustituir. En la figura VIII. 4, se ve cómo parte de la lámina cilíndrica está sustituida por una celosía de hormigón armado para formar lucernario; y del mismo modo, en la figura VIII. 9 se aprecia el interesante resultado y agradable aspecto que puede lograrse aplicando estas ideas a las expuestas sobre láminas cilíndricas. La sencillez de los enlaces soldados, preparados para soldar sin volteo y el escasísimo número de tipos diferentes de piezas, que presenta (sólo tres) el ejemplo de la figura, le hacen muy económico de construcción.

La cúpula es otro de los elementos más simples y mejor logrados del arte arquitectónico clásico. Es la solución más natural, más sencilla y, a la par, la más cargada de sentido técnico para cubrir un área sin soportes intermedios con el mínimo material.

Su forma inicial es la de planta circular con apoyo en todo el contorno y directriz apuntada. Esta directriz es natural, con materiales no resistentes a la tracción; porque la esférica da tracciones en los paralelos de riñones, y la rebajada las da en el anillo extremo, por lo que requiere estribos muy fuertes. Por consiguiente, montada sobre muros verticales, requiere, o un zuncho fuertemente resistente a la tracción, o unos contrafuertes muy acusados y repetidos. Las cúpulas sobre tambor cilíndrico, tan logradas y queridas del arte renacentista, luchan siempre con este problema.



VIII-9. Proyecto de nave industrial. Ingeniero E. Torroja.

Por eso, en la prehistoria de la construcción, la cúpula adopta con frecuencia directriz apuntada. La cúpula del dolmen del Romeral (fig. VIII. 10) es interesante precisamente por su falsa construcción de hiladas horizontales y por la gran losa que la completa. Solamente gracias a ese perfil puede reducir los esfuerzos cortantes en sus juntas horizontales.

Más interesantes son, en realidad, los ejemplos de cúpulas, construidas en barro por los negros africanos del Tchad (fig. VIII. 11). Nunca la humanidad ha logrado, con tan escasos medios, crear un tipo tan racional, tan adaptado a las propiedades del material y a las exigencias económicas de sencillez constructiva. Sus tracciones son tan pequeñas que aun el barro es capaz de soportarlas; construidas por anillos, son estables durante todo el proceso de construcción sin necesidad de cimbra para sostenerse ni de andamiaje para el propio artífice que puede desarrollar su labor, hacia la clave, apoyándose en los salientes dejados al efecto en el paramento exterior; y logrando, con todo ello, un claro valor estético en el conjunto de sus poblados. Si, como D'Ors opina, la cúpula es símbolo de monarquía, estos conjuntos de ellas, más bien parecen expresión de sana democracia, en el acoplamiento igualitario de sus unidades familiares.

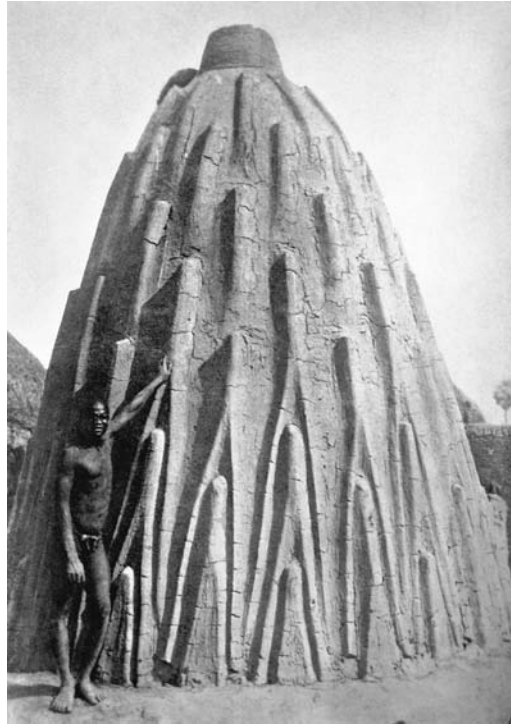
Pero, es con la piedra con la que la humanidad ha desarrollado, hasta el presente, los mejores valores técnicos y estéticos de la cúpula. La forma dovelada según los meridianos y paralelos, responde perfectamente a su fenómeno tensional. Las compresiones meridianas cruzan normalmente las juntas entre hiladas, y la traba entre sillares asegura los paralelos, en los que las compresiones son mucho menores o se convierten en ligeras tracciones.

Todo el problema técnico está en estribarla bien y en evitar las tracciones en los paralelos intermedios; tracciones que, con el casquete esférico, aparecen en cuanto el semiángulo en el centro sobrepasa los 54° . Por eso, para evitarlas, hay que recurrir a cúpulas esféricas de menor abertura angular o a perfiles apuntados. Las primeras resultan rebajadas y, a igualdad de luz, dan empujes mucho más fuertes; lo que, en



VIII-10. Dolmen prehistórico del Romeral, Antequera. De «Summa Artis», J. Pijoán. Espasa-Calpe, S. A.

VIII-11. Chozas de tapial del Tchad. De «Summa Artis», J. Pijoán. Espasa-Calpe, S. A.



ellas, viene agravado, porque su forma suele exigir el tambor para dar al espacio interior sus convenientes proporciones. El apuntamiento, por otra parte, se hace estáticamente necesario cuando el peso de la linterna, en clave, apunta el funicular de las cargas (fig. XVII. 1).

Las mayores posibilidades y, a la par, las dificultades de la cúpula empezaron cuando el hormigón armado permitió su realización con luces enormes y espesores pequeñísimos, limitados casi exclusivamente por el peligro de pandeo.

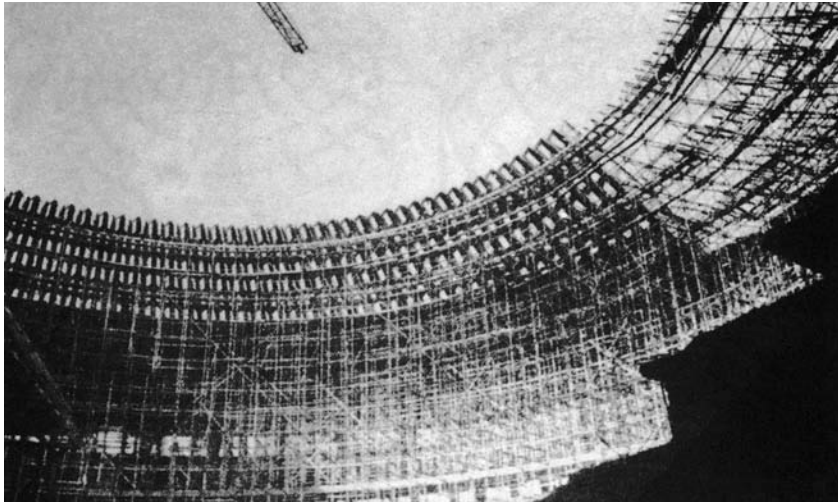
El hormigón armado, al resistir igualmente las tracciones que las compresiones, suprime las exigencias estáticas de la directriz de piedra o ladrillo y amplía el concepto de cúpula al más general de lámina de revolución.

Proyectos, como el de la cúpula del Palacio de Deportes de Roma (figura VIII. 12), demuestran que las posibilidades de este tipo estructural están bien lejos de ser agotadas, a pesar de haber alcanzado esbelteces superiores a las de una cáscara de huevo.

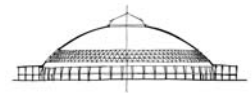
La cúpula puede imaginarse trabajando fundamentalmente como unos gajos o arcos meridianos cuya flexión está impedida por los anillos o paralelos horizontales. En las zonas en que los gajos quieren hundirse hacia adentro, los paralelos se lo impiden trabajando en compresión; y donde los gajos quieren abrirse, el paralelo ha de evitarlo resistiendo en tracción.

Pero, al forzar las tensiones y, por tanto, las deformaciones, aparecen problemas nuevos que se han de considerar con cuidado.

En primer lugar, las deformaciones de la lámina ya no son lo suficientemente pequeñas para poder prescindir de ellas y hacer aplicable el cálculo como membrana pura y rígida. La obligada continuidad entre su superficie y el anillo exterior, que con-



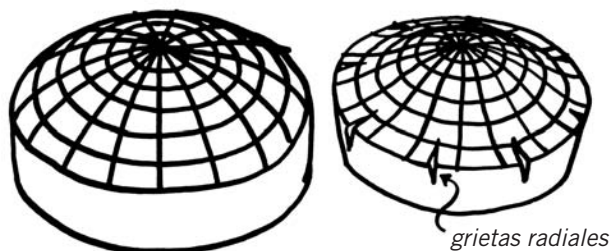
VIII-12. Palacio de deportes, en Roma. Ingeniero Pier Luigi Nervi. Fotografía: Gherardi-Fiorelli.



tiene los empujes, provoca una flexión de los meridianos. En efecto, el anillo de borde, bajo las componentes radiales de los empujes, sufre una dilatación (fig VIII. 13); mientras la lámina, para seguir este movimiento, necesitará deformar sus meridianos, con flexión en ellos, para amoldarse a la nueva dimensión del anillo. La banda contigua al anillo es la que más flexiones sufre, además de las tracciones que le produce la dilatación circunferencial, que tiende a producir, en esa zona periférica, grietas radiales.

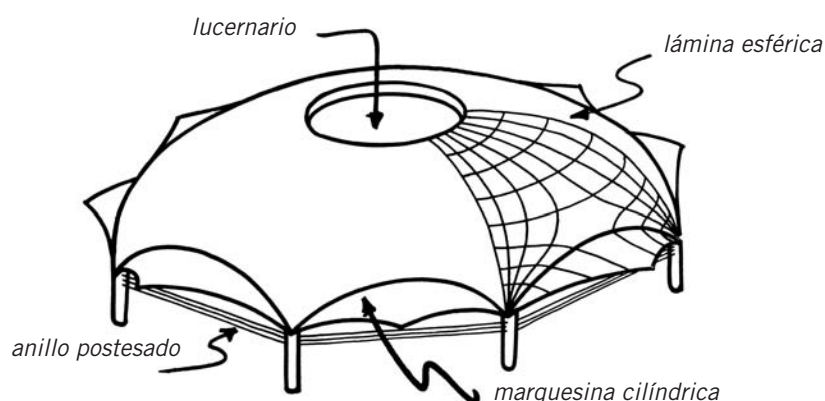
Un fenómeno parecido resultaría si la cúpula, que es deformable elásticamente, estribase sobre un anillo rígido, a no ser que el borde correspondiese precisamente a un paralelo de tensión y deformación nulas. Pero lo corriente es que, tratándose de casquetes rebajados, el último paralelo pida estar en compresión mientras que el zuncho exterior está en tracción y, por tanto, el fenómeno está más agravado, produciéndose, según los meridianos, flexiones importantes en la proximidad del borde.

Aun cuando, en este caso, la flexión no sea un fenómeno tensional primario o esencial en la resistencia —pues la lámina podría teóricamente resistir con momento de inercia nulo, en cuyo caso lo serían también los momentos flectores debidos al tipo de deformación meridiana expuesto—, la cuestión sigue manteniendo su importancia, por cuanto puede provocar el agrietamiento por flexión e incluso la rotura por compresión, al sumarse las compresiones normales del meridiano con las debidas a su flexión.



VIII-13. Deformación de cúpulas.

VIII-14. Esquema estructural del mercado de Algeciras.



El postesado del anillo es una aportación ideal de las nuevas técnicas a este problema, pues permite establecer la tracción del zuncho de borde dándole, al mismo tiempo, la deformación que pida el paralelo extremo; y, así, suprimir o disminuir considerablemente la flexión meridiana.

La retracción del hormigón produce efectos análogos, como es fácil comprender, y que también han de tenerse en cuenta.

Lo mismo sucede con las variaciones térmicas que interesan toda la masa de la cúpula; e inclusive, como su espesor es muy pequeño, puede llegar a tener importancia también la desigualdad de temperatura, del trasdós al intradós, producida especialmente por el efecto directo de la radiación solar (o el efecto higroscópico por el mojado rápido del trasdós) si el hormigón queda directamente a la intemperie.

Más graves suelen ser los efectos del desigual calentamiento de una zona de la cúpula a otra; desigualdad que, en general, no presenta simetría de revolución. Esto mismo se acusa con las sobrecargas accidentales; porque, al reducirse el espesor y, por tanto, el peso propio, ganan en importancia relativa otras sobrecargas, como son la nieve y el viento. Aun cuando su efecto presentase la misma simetría de revolución de la cúpula, siendo su reparto a lo largo del meridiano diferente del peso propio, produciría efectos anormales parecidos a los anteriores; si bien, en general, de menos importancia. Pero no siempre la nieve, y nunca el viento, presentan este carácter de simetría; y ello da lugar a regímenes de esfuerzo diferentes, difíciles o pesados de calcular, y para los que se pierden, en buena parte, las ventajas de la forma de revolución.

Por último, el peligro de pandeo se hace decisivo en la cúpula laminar y puede requerir el empleo de nervios rigidizantes; nervios que no tienen por qué seguir los meridianos, y que se prestan a multitud de disposiciones y cruzamientos de buen aspecto estético, como supieron acusar los artistas hispano-árabes.

El problema viene ligado con el proceso de ejecución cuando la cúpula quiere construirse sin cimbra; porque el borde del anillo interior, que se está construyendo, facilita la iniciación del pandeo y justifica, en este caso, la adopción de rigidizadores definitivos o provisionales, según los paralelos. Por lo mismo, su adopción es obligada cuando la cúpula presenta lucernario central.

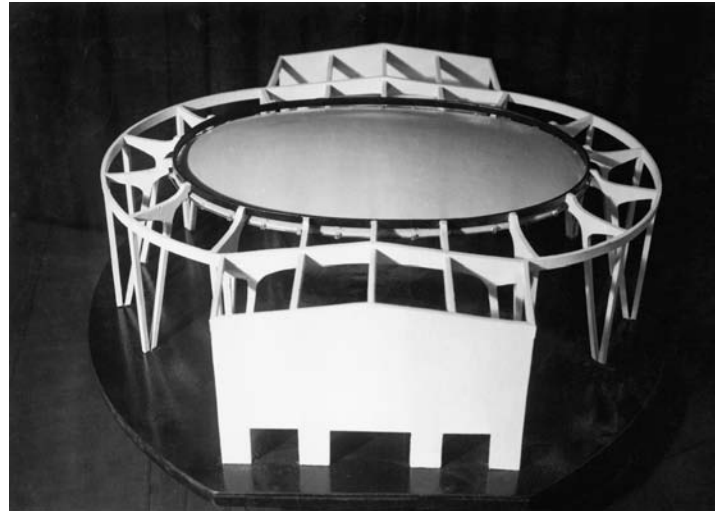
Se ha tratado, hasta aquí, de la cúpula de revolución de apoyo continuo a todo lo largo de un paralelo; pero, en muchos casos, interesa apoyarla sobre soportes aislados. Es clásica la solución de montarla sobre cuatro arcos, enlazando la forma circular, en planta, con el cuadrado circunscrito de los arcos mediante pechinas o trompas para lograr el apoyo continuo (fig. XII. 7); pero la cúpula laminar de hormigón armado, capaz de soportar, no sólo las tracciones y compresiones en el plano tangente, sino también flexiones, permite el apoyo directo de la cúpula sobre soportes aislados.

Aun cuando el fenómeno tensional es, en este caso, mucho más complejo, y las luces que pueden alcanzarse más limitadas, caben muchas soluciones como, por ejemplo, la adoptada en Algeciras (figs. VIII. 14 y 15) cuyo casquete esférico, de 47,6 metros de luz, apoya directamente sobre ocho soportes, atirantados entre sí mediante un anillo poligonal postesado. Los faldones de la bóveda, entre soporte y soporte, vienen escotados por los lunetos que forman las bóvedas cilíndricas rebajadas del contorno, las cuales, a la par que proporcionan sus marquesinas a las puertas, rigidizan la cúpula y encauzan los haces de isostáticas hacia los soportes.



VIII-15. Mercado de Algeciras. Arquitecto M. Sánchez Arcas. Ingeniero E. Torroja. Fotografía: Granada.

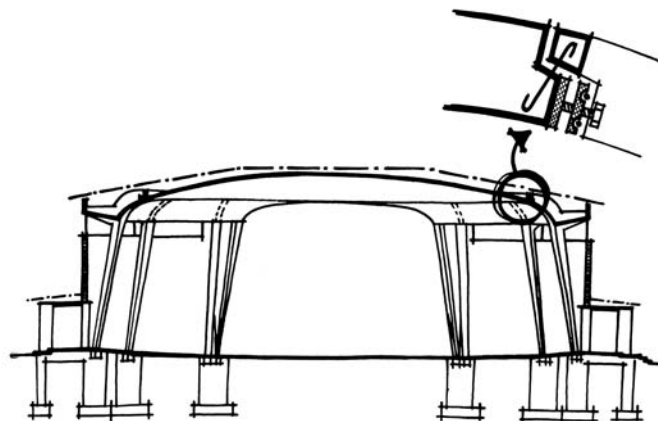
VIII-16. Iglesia de S. Félix y Régula. Arquitecto Meztger. Ingeniero Schubiger. Ingeniero Consultor E. Torroja.



Al tesar el anillo octogonal que recoge y equilibra los empujes radiales de la cúpula sobre los soportes, mediante los tensores de rosca de que iban provistas sus barras, el casquete esférico quedó equilibrado; e incluso, forzando ligeramente la tensión de aquél, se notó perfectamente cómo toda la parte central de la cúpula se levantaba despegando de su cimbra, lo que permitió desmontar ésta libremente sin ninguno de los cuidados que normalmente requieren estos descimbramientos.

La superficie de revolución permite otras formas en las que el carácter de cúpula desaparece totalmente; tal es, por ejemplo, la forma de hiperboloide, ideal para los condensadores de instalaciones termodinámicas (fig. XV. 1). El tipo estructural es perfecto, no sólo desde el punto de vista resistente, sino desde el funcional que requiere esa forma para el establecimiento más eficaz de la corriente natural del aire.

Y de la cúpula de revolución pueden considerarse derivadas también las de planta elíptica, cuyo estado tensional, como membrana, se obtiene directamente, y por afinidad, del casquete circular (fig. VIII. 16); la media naranja, como terminal de una bóveda cilíndrica; los depósitos de chapa metálica con formas esferoidales, estudiadas



VIII-16. Iglesia de S. Félix y Régula. Arquitecto Meztger. Ingeniero Schubiger. Ingeniero Consultor E. Torroja.

para mantener su forma sin grandes flexiones, cualquiera que sea el nivel de líquido y, por último, el mismo depósito de pared cilíndrica de eje vertical, típico del hormigón armado.

También en las cúpulas, al igual que en las bóvedas, cabe sustituir la superficie continua por una estructura triangulada metálica o de otro material. Muchas veces se ha hecho siguiendo con sus barras los meridianos y paralelos del casquete, pero ello requiere diagonales de rigidización para evitar el pandeo por giro, alrededor del eje,



VIII-17. Cúpula del Festival Británico. Arquitecto Ralph Tubbs. Ingeniero Consultor Freeman Fox and Partners.



VIII-18. Sala de Kalsruhe. Arquitecto Erich Schelling. Ingeniero Finsterwalder. Fotografía Gerd Weiss.

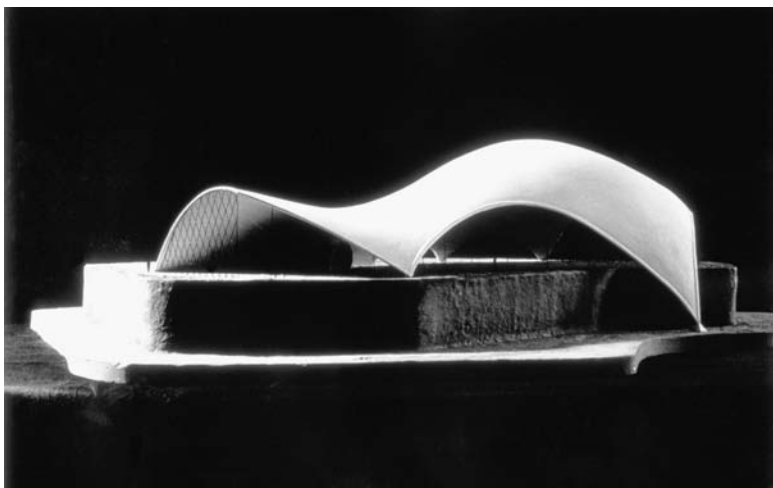
y deslizamiento de unos paralelos respecto a los contiguos. Es, pues, más lógico inscribir directamente en la superficie una triangulación equilátera o similar, como es el caso del gran casquete del Festival Británico (fig. VIII. 17).

Los constructores clásicos adoptaron siempre soluciones cóncavas hacia el interior. Ello se debía no solamente a que, de este modo, la superficie envolvente resulta menor a igualdad de volumen envuelto, sino más fundamentalmente a que sus materiales no eran capaces de resistir en tracción. Sólo en los últimos años se aprecia una cierta tendencia a utilizar superficies cóncavo-convexas trabajando en tracción y ancladas sobre un contorno no plano que limita por arriba los paños verticales de fachada. Tal sucede, por ejemplo, con la sala de Kalsruhe (fig. VIII. 18). La lámina de hormigón pretensado trabaja fundamentalmente en tracción y la doble

VIII-19. Cubierta, en paraboloides hiperbólicos, de un almacén en Méjico. Arquitecto Félix Candela.



VIII-20. Club Táchira, de Caracas. Ingeniero E. Torroja. Fotografía: M. García Moya.



curvatura asegura la rigidez del conjunto. El pretensado asegura por sí mismo la impermeabilidad.

Entre las superficies alabeadas, la más utilizada ha sido el paraboloides hiperbólico (fig. VIII. 19), que ofrece la ventaja de inscribirse bien en un cuadrilátero formado por cuatro bordes rectos. La membrana puede dar entonces reacciones tangenciales solamente, sobre el borde sin provocar flexiones de éste. Conviene entonces que su borde sea muy rígido longitudinalmente y de poco peso; pues éste alteraría el estado de membrana. Aun así, siempre aparecen flexiones que toman importancia cuando las dimensiones son grandes.

Pero los proyectistas de estructuras laminares van adoptando cada día nuevas formas, más atrevidas y complejas que difícilmente encuentran ya expresión matemática. La posibilidad de estudiar su comportamiento resistente en modelo reducido, gracias a los progresos que han hecho las técnicas de análisis experimental de estructuras en laboratorios muy especializados, hace que hoy la mayor o menor complejidad de la forma ya no sea una dificultad para el proyectista que acepte el trabajar en equipo con los especialistas de aquellas técnicas. Y así se pueden construir con éxito formas tan variadas como, por ejemplo, las de las figuras VIII. 8 y VIII. 20, que son solamente anuncio y pregon de la revolución que se avecina en el campo de la arquitectura, cuyo vocabulario de formas plásticas se va abriendo y ensanchando con rapidez y fecundidad imaginativa desconocidas en toda la historia de la construcción.

IX

La viga de alma llena y la placa

Siguiendo la costumbre de empezar citando el presumible desarrollo inicial del elemento, cabe, lógicamente, suponer que la primera viga fuese un tronco, la segunda un monolito de piedra sin desbastar, la tercera un sillar y la cuarta un dintel dovelado en cuñas, lo que ya constituye, en realidad, un arco, aunque las formas exteriores no correspondan a este tipo de elemento. Muchos siglos de experiencia y de meditación necesitaron los constructores para llegar a este último; desde luego, muchos más que para pasar de ahí a las grandes vigas actuales, como la de Colonia (fig. IX. 1) o la de Dusseldorf, con más de 200 metros de luz.

El dintel monolítico, sobre dos pilastras o sobre las jambas del muro ciclópeo, es el primer triunfo del humano constructor para salvar un vano con caracteres de permanencia en su obra. Él no sabía que aquello trabajaba a flexión, no conocía a Galileo, a Euler, a Navier ni a St. Venant; pero debió aprender pronto que, si el canto era pequeño en relación con la luz, la piedra se partía por abajo; y si se impedía el movimiento horizontal, afianzando los extremos del borde inferior contra los muros, el peligro de rotura era menor; y que lo mismo sucedía si se aumentaba el canto hacia el centro, donde los momentos flectores son máximos. Pronto aprendieron, en fin, los límites a que se podía llegar, e incluso establecieron arcos de descarga rudimentarios para salvar de la rotura el monolito de dintel.

En definitiva, todo proviene de que la piedra, por su falta de resistencia a tracción, trabaja muy mal en flexión; y es realmente difícil intuir, en ella, esa forma de trabajo.



IX-1. Puente de Colonia.
Ingeniero F. Leonhardt.
Arquitecto G. Lohmer. Del
«100 Jahre GHH
Brückenbau». Fotografía:
Stein.

La viga de madera, en cambio, acusa perfectamente su fenómeno resistente; su flexibilidad es bien apreciable; se siente su trabajo de compresión en unas fibras y de tracción en otras. Se siente, en fin, su resistencia o, quizá sea mejor decir, su relativamente escasa resistencia a esfuerzo cortante; pues, la facilidad de la madera para ventearse hace fácil el deslizamiento longitudinal, debido a este esfuerzo, entre las fibras contiguas.

Por eso, y por falta de escuadrías suficientes, se recurrió frecuentemente a yuxtaponer varios maderos sujetándolos con bridas o interponiendo cuñas que asegurasen la transmisión del esfuerzo cortante de una a otra pieza (fig. IX. 2a).

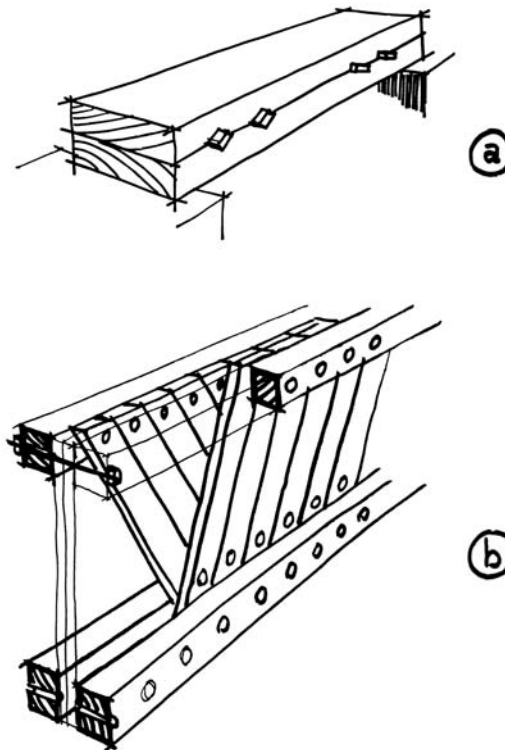
Más moderadamente se han utilizado, también, vigas compuestas o de celosía muy cerrada (fig. IX. 2b); y, últimamente, las maderas encoladas, con las que se aumentan grandemente las posibilidades, tanto mecánica como económicamente, al independizar las dimensiones totales de la viga de las que, con sus troncos, brinda la Naturaleza.

El acero es un material ideal para elementos sometidos a flexión. Su facilidad de fabricación en forma de I permite una buena utilización del material en toda su masa; aun cuando la sección constante, que producen los laminadores, no es la ideal tensionalmente; porque el momento flector es máximo en el centro y nulo en arranque en la viga apoyada, mientras el esfuerzo cortante, por el contrario, es máximo en éstos y nulo en el centro. La forma ideal parece que debería tener sección de cabezas creciente, y ancho de alma decreciente, desde los arranques hacia el centro, para tomar la forma en I en el centro y la rectangular en arranques. Pero, evidentemente, el tipo no tiene interés por sus dificultades de laminación, y se recurre a palastros supletorios, roblonados o soldados, cuando la importancia de la viga así lo justifica.

El acero es el material que mayores posibilidades ofrece hoy para la construcción de grandes vigas; aun dentro del estrecho grupo de las de alma llena, las cabezas de palastros, roblonados al alma mediante angulares o simplemente soldados por cordones longitudinales, son soluciones clásicas de grandes posibilidades. En ellas, los detalles son de tanta importancia como el conjunto (fig. IX. 3). Aun haciendo el enlace con buena técnica, queda siempre el problema del pandeo en cuanto quieren exagerarse las esbelteces. La viga puede pandear por torsión, lo que es necesario evitar, bien aumentando el ancho de la cabeza comprimida, bien mediante viguetas transversales que impidan los giros de torsión; y, aparte de esto, el peligro de pandeo parcial de los palastros exige, o que vuelen poco respecto al alma, o que lleven rigidizadores de los bordes.

Por último, el pequeño espesor, que suele requerir teóricamente el alma, hace que, en las grandes vigas metálicas, sea necesario el establecimiento de rigidizadores relativamente próximos. Muchos son los estudios que se han hecho para fijar, prácticamente, tanto su separación como su resistencia o sección. En el caso de elementos roblonados, los agujeros, en tracción, no sólo limitan la zona útil, sino que provocan las concentraciones de tensión correspondientes; y, si llega a producirse la rotura, es, normalmente, por uno de esos taladros. Si se trata de estructuras soldadas, el peligro se presenta junto a los rigidizadores, por el cambio brusco de sección que establecen.

IX-2. Vigas compuestas de madera.



Este inconveniente sería mayor en las zonas de tracción si la soldadura del rigidizador provocase esfuerzos de tracción en las otras dos direcciones como ya se comentó, es decir, verticalmente y normalmente al plano del alma; por lo que ha de cuidarse mucho el detalle de la soldadura de estos elementos.

En grandes vigas, la sección en cajón —análoga a la que se indicó para los arcos y soportes con dos o más paredes de alma— da secciones muy resistentes, de agradable aspecto exterior, más compactas y de apariencia más clásica que el de las vigas en doble T. Su empleo está perfectamente justificado cuando el espesor de una sola alma, en esta doble T, resultara insuficiente, o cuando se requiera dar a la sección una mayor resistencia contra la torsión y el posible pandeo derivado de ella.

Es frecuente que se presente una gran desproporción entre el espesor del alma y el de las cabezas, lo que dificulta el enlace con soldadura, por el diferente enfriamiento de ambas chapas y la posibilidad de templados parciales. Para evitarlo, la técnica ha tanteado los perfiles en talón (fig. IX. 3). Todo ello son, sin embargo, detalles que se salen un poco —nada más que un poco— del aspecto general del problema estructural que se trata.

Aun con todas las dificultades, la viga de alma llena ha sobrepasado los 200 metros en el puente de Dusseldorf.

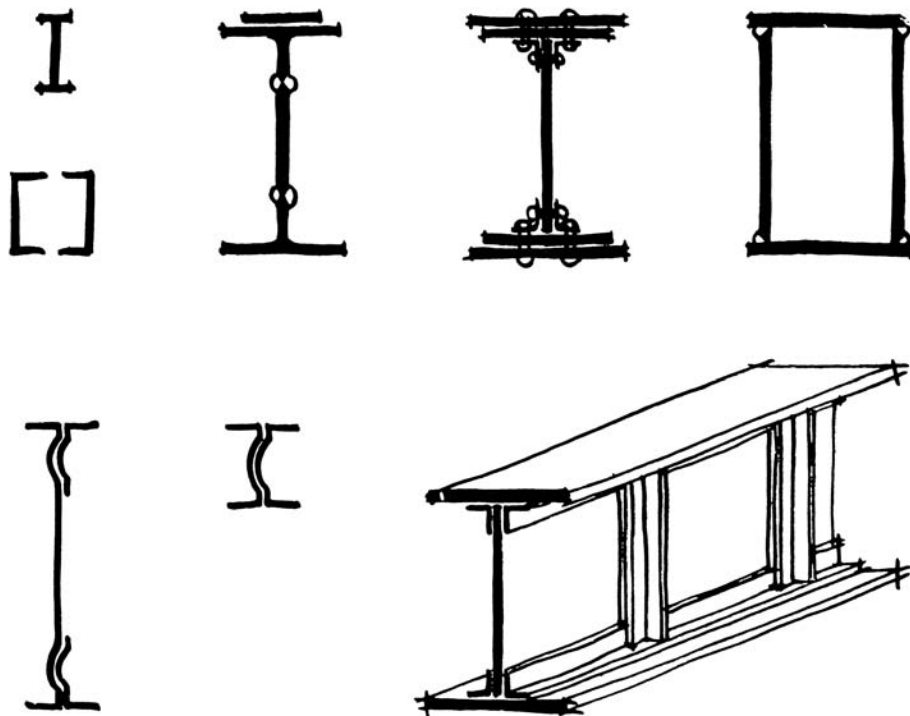
Por el extremo opuesto, para luces y cargas pequeñas, la técnica moderna trata de independizarse de las limitaciones que impone la laminación, y ha desarrollado multitud de perfiles formados con chapa muy delgada, doblada o embutida, para darles

la oportuna forma resistente. Así se logran secciones relativamente rígidas y resistentes con una ligereza que hace pocos años se hubiera considerado imposible de alcanzar (fig. IX. 3). Las posibilidades, aún no agotadas, de este tipo de elementos, son una clara advertencia de lo mucho que puede todavía lograrse con los materiales conocidos, independientemente de lo que han de ofrecer otros nuevos, como las aleaciones ligeras, los plásticos, etc.

El hormigón armado presenta, en flexión, características y posibilidades distintas. En lugar de la doble T, exigida por el material homogéneo, el hormigón armado tiende a la simple T. En ellas, la cabeza del hormigón resiste las compresiones, mientras en la cabeza inferior, formada por las armaduras, éstas no requieren normalmente ensanchamientos, sino que encuentran, en el espesor del nervio, ancho suficiente para alojarse y resistir la tracción.

El hormigón del alma ha de encargarse de resistir los esfuerzos cortantes que transmiten los incrementos de tracción de la armadura. Para mejor comprender todo este fenómeno tensorial y su influencia, determinante de los elementos que forman esta viga, es conveniente volver a la red de isostáticas (fig. II. 7).

Si el hormigón es apto para resistir económicamente las compresiones, y el acero es para las tracciones, es lógico disponer las armaduras según las líneas de máxima tracción. Pero, como, en general, la carga no es fija, la forma de las isostáticas varía y sólo se puede pretender orientarse aproximadamente por ellas; por otra parte, es más económico doblar las barras en forma poligonal que en curvas de radio variable.



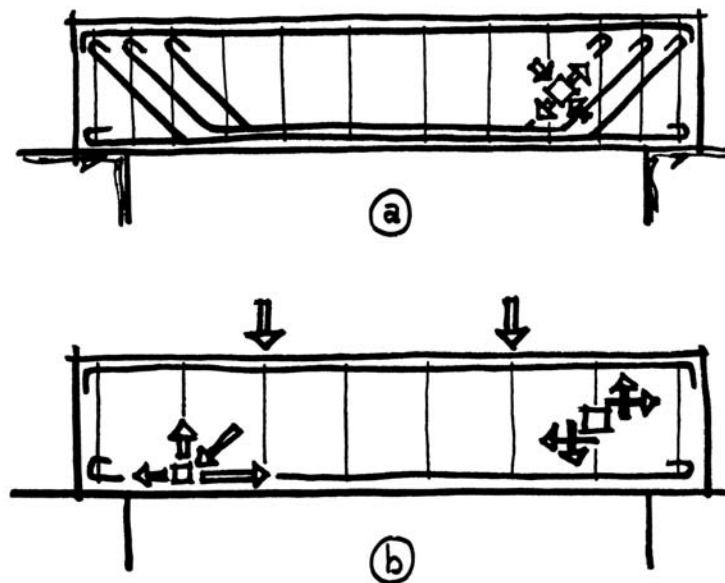
IX-3. Perfiles metálicos.

Así, pues, las armaduras principales van por la cara en tracción, aumentando en número desde arranques hacia el centro, como piden los momentos flectores, y procurando proporcionar a la sección el máximo brazo mecánico y un mayor momento resistente. Las armaduras, que van sobrando hacia arranques, se pueden levantar a 45° para resistir las tracciones oblicuas o de esfuerzo cortante que, correspondientemente, crecen hacia los arranques.

En todo caso, el hormigón ha de soportar, no sólo las compresiones longitudinales en la cabeza, sino también las compresiones inclinadas inherentes a la tensión cortante, lo que determina un ancho mínimo de alma.

Ahora bien; allí donde no se dispone de barras levantadas o cuando no interesa colocarlas por otras razones, se recurre a establecer estribos (fig. IX. 4b). Teóricamente no trabajaban mientras el hormigón se deforma homogéneamente bajo el esfuerzo cortante, porque no acusan, entonces, tendencia a alargamiento en esa dirección normal a la directriz; pero, sí aseguran el que la pieza no se rompa, aun cuando puede agrietarse a 45° por efecto de la tracción consiguiente al esfuerzo cortante. La viga, en ese caso, puede considerarse como una especie de triangulación en la que los estribos trabajan como montantes en tracción, y el hormigón como diagonales en compresión. La resultante de los esfuerzos, que producen estos dos grupos de elementos, provocan, sobre la armadura longitudinal, los incrementos de tracción que, integrados desde el arranque hasta el centro de la viga, dan lugar al esfuerzo total de tracción en ella y de compresión en la cabeza opuesta.

Gracias a esta posibilidad, puede darse a la pieza de hormigón armado, en cada sección, la armadura y la resistencia longitudinal y transversal que necesite, dosificando, en cada zona, la armadura, tanto longitudinal como transversal, con gran economía. Como, además, el encofrado permite variar el canto, e incluso el ancho si se



IX-4. Armaduras de una viga.

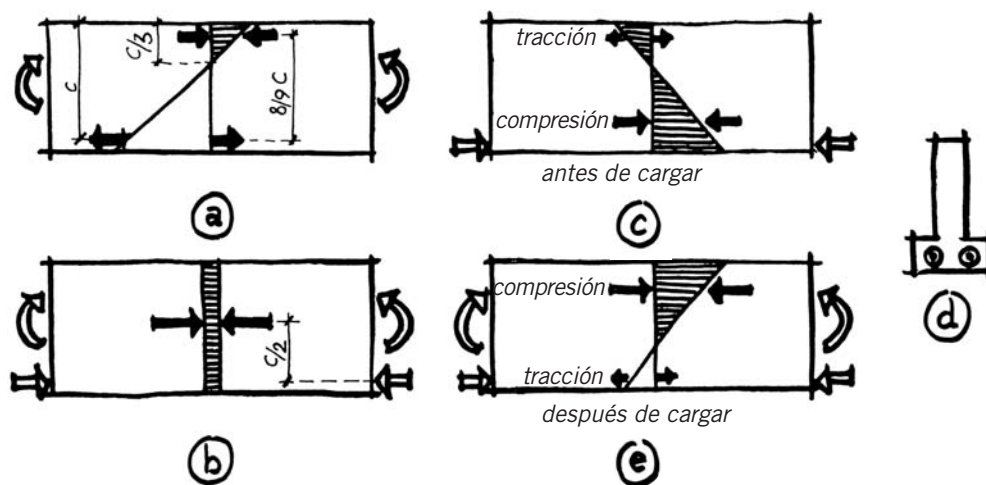
quiere, la pieza de hormigón armado ofrece unas posibilidades de aprovechamiento y de adaptación al fenómeno tensional de cada caso particular, difícilmente obtenibles con otros materiales.

La adecuación de la armadura a las exigencias tensionales se verifica, pues, dentro de la viga de hormigón armado, en una forma mucho más técnica y orgánica de lo que la pieza aparenta al exterior; y esto no es una desventaja, como no lo es el que nuestro esqueleto no aparezca exteriormente. El hormigón armado —como ya se dijo— no es una mezcla o una superposición de los elementos independientemente resistentes. Es un único conjunto armónico; y la viga de hormigón armado ha de mirarse como formada por un nuevo material, resistente tanto a la tracción como a la compresión, alejando de la imaginación aquel otro material frangible que era el hormigón solo, aunque sea la apariencia de éste la que se ofrezca a la vista. La humanidad ha experimentado demasiado con la piedra para que ahora acepte una que sea tan tenaz como el acero; y no es extraño que los técnicos y el público hayan necesitado muchos años para habituarse a las nuevas proporciones que corresponden a los dinteles de hormigón armado, mucho más esbeltos que los de piedra.

El hormigón pretensado ofrece, también, especiales ventajas para este tipo de elementos, en el que ha desarrollado particularmente sus posibilidades.

Por una parte, el empleo de aceros de alta resistencia, que pueden trabajar a tensiones diez y más veces superiores a las del acero normal, permite reducir la sección de las armaduras y el espacio ocupado por ellas, con lo que se reducen, en muchos casos, los espesores de hormigón y, por tanto, el peso muerto y la flexión consiguiente; cuestión ésta muy importante en vigas de luces relativamente grandes.

Por otra parte, la compresión longitudinal permanente, que establece la armadura tesada, impide o retrasa mucho la fisuración transversal del hormigón; e, indirectamente, se disminuye también la tracción por esfuerzo cortante, con lo que permite un mejor aprovechamiento del hormigón en este sentido.



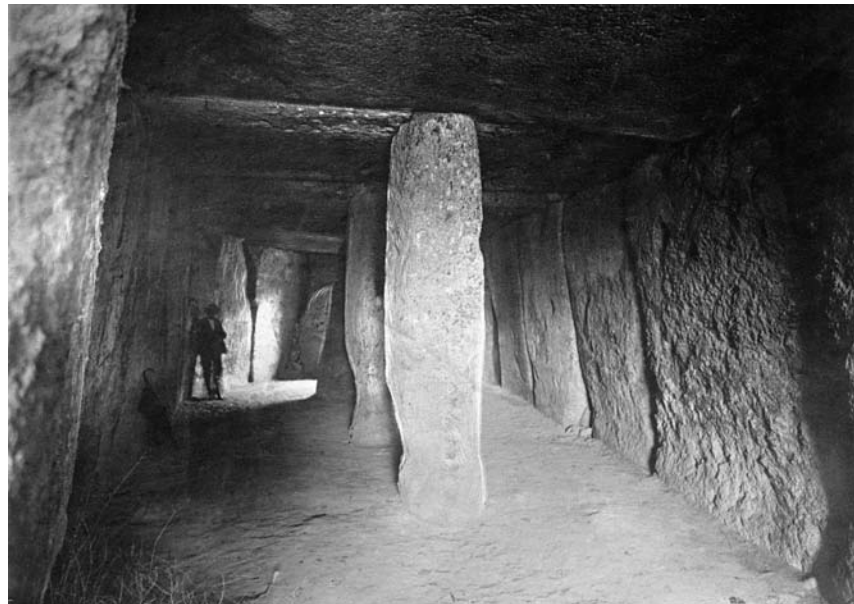
IX-5. Tensiones en una viga de hormigón pretensado.

Si las armaduras se colocasen levantadas, aproximándose a las líneas de máxima tracción, el efecto sería mucho más eficaz; pero, hasta ahora, se ha tropezado con muchas dificultades para su realización por efecto del rozamiento contra el hormigón que, en las curvas, experimentan los alambres tesos, lo que produce pérdidas de tensión importantes.

En fin, si el pre o postensado longitudinal se completa con otro transversal en la dirección de los estribos, se llega fácilmente a compensar o anular cualquier tracción –sea de esfuerzo longitudinal o cortante–; y ello equivale a un aumento grande de resistencia del hormigón en tracción.

La utilización de estas técnicas, unidas a las de la prefabricación con hormigones muy cuidados y de alta calidad, hace que las vigas tomen formas y ligerezas que, sin alcanzar todavía las de las vigas metálicas, se les van asemejando. Las viguetas y elementos pretensados ofrecen una resistencia específica y una elasticidad mucho mayor que las de hormigón armado, aceptando deformaciones elásticas para las cuales este otro material necesariamente se agrietaría y quedaría con deformaciones permanentes inaceptables.

Obsérvese que una pieza rectangular pretensada es fácil de disponer en forma tal que, al sufrir un cierto momento flector, toda la sección de hormigón trabaje a compresión uniforme (fig. IX. 5b); basta que el momento flector se equilibre por el producto de la tracción total de la armadura por la mitad del canto útil. De esta forma, el brazo mecánico es la mitad del canto útil, en lugar de los $\frac{8}{9}$, como viene a ser en una de hormigón armado (fig. IX. 5a); pero, como la zona comprimida pasa de un tercio del canto a la totalidad del mismo, y el reparto, en lugar de ser triangular (máximo igual al doble del medio), es rectangular, resulta que la compresión unitaria máxima baja a menos de un tercio.



IX-6. Dolmen megalítico de la Menga, Antequera. De «Summa Artis». J. Pijoán. Espasa-Calpe, S. A.

Se ve, pues, que, con la misma sección y calidad de hormigón, se podría forzar la armadura hasta hacer que la pieza resistiese un momento mayor del triple del normal, sin rotura ni agotamiento alguno; si bien, para lograrlo, se requeriría que la armadura pretesa fuese capaz de resistir una fuerza de tracción seis veces mayor. Sin embargo, esta ventaja es teórica, por cuanto la viga, así dimensionada, fallaría tanto al aumentar como al disminuir la carga. Sólo servirá el razonamiento para una luz y un peso total, talmente grandes, que la sobrecarga viva no representase nada frente a la carga muerta.

Es este un punto delicado e importante para el proyectista. Deriva de la aparición de un estado de tensión en el hormigón (fig. IX. 5c) producido por el tesado de la armadura; estado de tensión que obra lo mismo cuando actúan las cargas exteriores que cuando todavía no se han aplicado. No basta, por consiguiente, que, al superponerse los dos efectos (el anterior y el de la flexión por cargas), el hormigón quede en buenas condiciones (fig. IX. 5e). Es necesario que lo esté también cuando no actúa la sobrecarga viva. Así pues, la compresión excéntrica, que el tesado produce sobre el hormigón, puede dar lugar –al menos en teoría– a tracciones y peligros de fisuración en la cara opuesta, que requieren, bien una armadura supletoria para resistirlos, o bien alterar la forma dada a la sección con objeto de que la compresión del tesado no quede demasiado alejada del centro de gravedad de la sección de hormigón. Esta es la explicación de que las vigas de hormigón pretensado presenten frecuentemente secciones en T invertida (fig. IX. 5d), para concentrar su cabeza sobre la armadura pre o postesa. Porque, tanto peligro puede haber de que la viga se rompa al cargarla como de que se rompa antes de hacerlo.

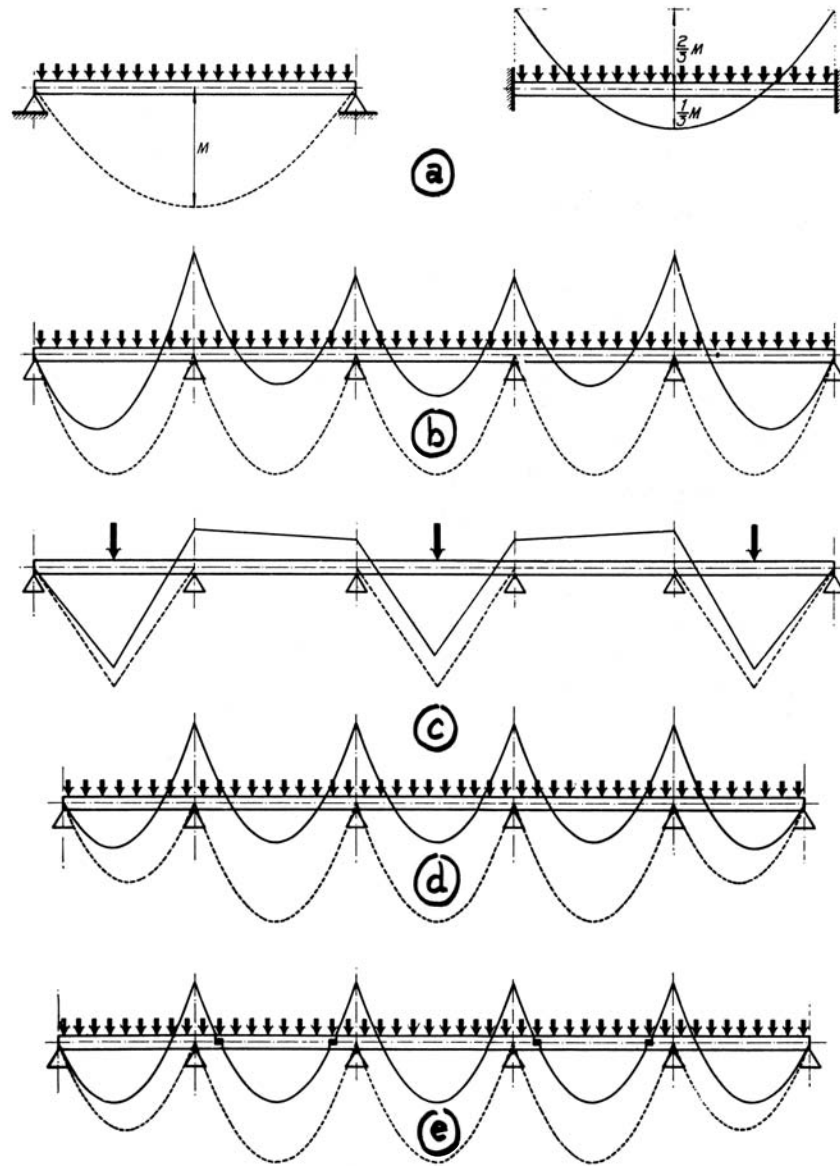
La mayor esbeltez y ligereza de las vigas de hormigón pre o postensado, respecto a las de hormigón armado, procede más bien de la mayor adaptación que aquél ofrece a la prefabricación y, en consecuencia, a la obtención económica y segura de hormigones de alta calidad.

Por último, no hay que olvidar que, cuanto mayor es la esbeltez, dentro de las proporciones usuales, no sólo es mayor el coste, sino también la flecha, y es esta última la que, en muchos casos, establece los límites tolerables.

La viga continua, no podía desarrollarse mientras no progresaran los estudios hiperestáticos. Sin embargo, se encuentra algún raro ejemplo, tan curiosos y antiguo como el prehistórico de la cueva de la Menga (fig. IX. 6), donde las losas monolíticas de cubierta apoyan, no sólo por sus extremos en grandes piedras verticales, sino también a mitad de su longitud sobre una pilastra central que hace de parte-luz; y la eficacia de los tres apoyos se asegura por no ir los cimientos a buscar el firme rígido, sino que insisten sobre una capa de tierra dura, capaz, en cierta medida, de reajustar los asientos y las reacciones. ¿Lo comprenderían así sus constructores?

La ventaja de la viga empotrada es que, para carga uniformemente repartida, el momento flector viene a ser, en los arranques, los $\frac{2}{3}$; y, en el centro, $\frac{1}{3}$ del momento flector correspondiente al centro de la misma viga simplemente apoyada (fig. IX. 7). Sin embargo, hay que tener en cuenta que el momento en el centro es muy sensible a los defectos del empotramiento o de la continuidad resistente sobre los apoyos; y aumenta rápidamente al disminuir la rigidez de estos empotramientos.

IX-7. Vigas continuas.



La viga continua, con luces iguales (fig. IX. 7b), presenta análogas ventajas para cargas uniformes y simultáneas en todas las luces; pero, al tratarse de carga concentrada o móvil, estas ventajas (c) se amortiguan, pues la reducción de momentos flectores es mucho menor.

Con viga de sección constante se logra un mejor reparto de flexiones y un mejor aprovechamiento de la viga (fig. IX. 7d), si las luces extremas son algo menores que las centrales, lo que produce, al mismo tiempo, un buen efecto estético. En el afinado juego de intercolumnios helénico, no hay solamente un efecto de corrección óptica, sino también un agudo sentido resistente que aconseja disminuir los vanos extremos e inclinar sus columnas laterales hacia el interior.

Si se estudia el perfil de igual resistencia de una viga continua, se observa que la ley de momentos flectores pide aumentar fuertemente el canto, o la sección de cabezas, cerca de los apoyos en una longitud relativamente corta, dando lugar, con ellos, al nacimiento de los cartabones. Respecto a los esfuerzos cortantes, no hay grandes diferencias entre viga apoyada y continua, aun cuando también en esta última, pueden ser mayores sobre los apoyos centrales.

La viga continua, como toda estructura hiperstática, requiere, para su buen funcionamiento, una perfecta fijeza de apoyos. Si hay asientos, en la viga isostática sin continuidad, su esfuerzos no se alteran por ello; por el contrario, en la viga continua hiperestática estos esfuerzos cambian y, al producirse los asientos, empeoran en general. Pero, como más adelante ha de comentarse, las estructuras hiperestáticas tienen, en cambio, otras ventajas. En una viga isostáticamente sustentada, basta que falle, por cualquier defecto, una sola sección, para que todo el tramo se hunda; mientras que una hiperestática continua puede, a pesar de ello, seguir resistiendo mientras no agote, también, la resistencia de otras secciones.

Por último, en la ley de flexiones de la viga continua aparecen puntos de momento nulo en lugares determinados de la directriz, para cada distribución de cargas. Si se articula en ellos, la ley, para esas cargas, no se altera y la estructura se convierte en isostática.

El establecimiento de articulaciones y rodillos permite repartir las dilataciones longitudinales de la viga, no concentrándolas en los apoyos extremos; pues hay que tener en cuenta que la viga recta, sin dilatación posible, da empujes grandes y prácticamente irresistibles. Sólo en luces muy pequeñas pueden ser aceptables, y esto porque siempre puede contarse con pequeños huelgos, movimientos o deformaciones en los empotramientos; pues, de no ser así, el esfuerzo sería el mismo cualquiera que fuese la luz. El establecimiento de estas articulaciones con libre dilatación, en tramos alternos y más o menos al quinto de la luz, da lugar al clásico tipo de viga Gerber, traducción isostática de la viga continua (fig. IX. 7e). Su utilización, con canto constante, o con canto variable máximo sobre los apoyos y mínimo junto a las articulaciones, va esencialmente ligada al propio isostatismo de la viga y a su libertad de dilatación.

En fin, igual que el monolitismo de una viga, con sus dos soportes, da lugar al pórtico simple, el de la viga continua, con sus varios soportes, forma el pórtico múltiple. Más adelante será mejor ocasión de hablar de él, a propósito de las estructuras complejas, o no elementales.

La ménsula, que ha aparecido como un elemento de la viga Gerber, es algo así como media viga puesta boca abajo. Para sostenerse requiere un empotramiento en el que sujetarse. No es, pues, tan sencilla de colocar como la viga; y le basta tener un vuelo mitad de la luz que aquélla para que, por su peso propio, produzca el mismo momento flector.

Si el empotramiento es corto, apalanca sobre el muro en que se empotra, levantándole y clavándose por el sofito, junto al borde del muro, con fuerte concentración de tensiones en este punto. Todo ello limita, corrientemente, su vuelo; pero, no por eso ha sido menos utilizada y estimada.

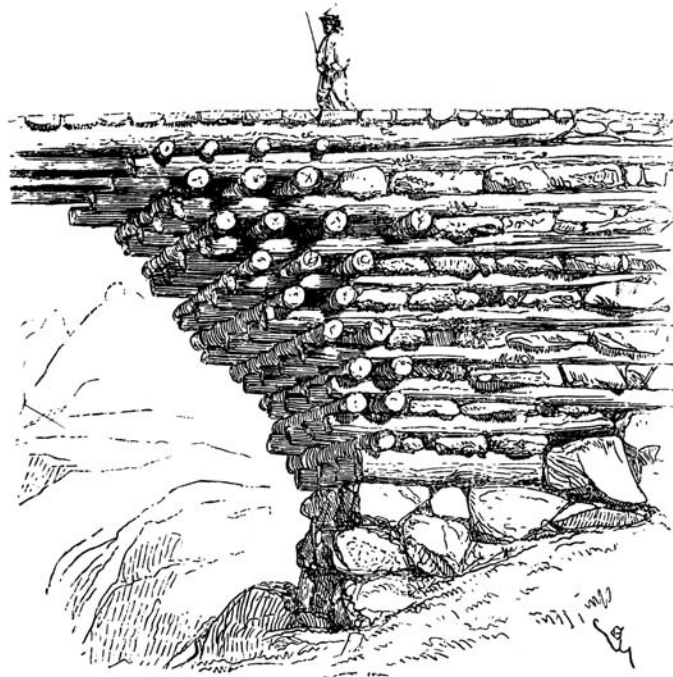
La piedra sólo permite a la ménsula pequeños salientes con gruesa sección, que la eutrapelia gótica realzó en sus gárgolas.

La madera avanza algo más, pero pronto necesita del jabalcón (fig. IX. 8b) para apoyarse, formando, así, una ménsula armada en la que el jabalcón se acodala contra el muro, aceptando las compresiones, mientras el elemento horizontal, al quedarse reducido a cabeza de tracción del conjunto, tiende a arrancarse o desfundarse de su alvéolo en el muro. Por eso, es frecuente ver estos elementos apareados en un conjunto dídimo y equilibrado sobre el soporte; pero, en cuanto la carga no es simétrica, el momento resultante carga sobre el soporte y vuelve a limitar la luz. Ménsula sobre ménsula (fig. IX. 8a) y con buenos contrapesos, avanzaban sus pilas hacia el vano los constructores romanos para apoyar, entre ellas, sus cortas vigas, cuando no era llegado el tiempo de voltear bóvedas de piedra.

Naturalmente, el acero y el hormigón armado permiten vuelos mucho mayores si encuentran buen empotramiento o contrapeso. El hormigón invierte, en este caso, su clásica sección en T para llevar la cabeza por abajo, siguiendo las compresiones; y puede, inclusive, traducir el jabalcón en tirante independiente, formando ya una verdadera estructura triangulada (fig. IX. 9).

En definitiva, la ménsula es una pieza en flexión, como la viga; y así como los lóbulos de la lámina cilíndrica harán de viga—según se verá más adelante—, del mismo modo las ménsulas han adoptado modernamente, con el hormigón armado, las formas curvas del cilindro, el conoide o el mismo hiperboloide (fig. XII. 22), para formar grandes marquesinas de muy variadas y elegantes formas.

En fin, el acero es, como siempre, el material insustituible para los máximos vuelos, como lo es para las máximas luces, y utiliza, para ello, las triangulaciones de que ha de tratarse en el próximo capítulo.



IX-8. a. Puente galo, según Viollet Le Duc.



IX-8. b. Techumbre de Sta. M.^a de la Huerta, en Soria. De «Ars Hispaniae», L. T. Balbás.



IX-8. c. Alero del Pórtico del Partal, en Granada. De «Ars Hispaniae», L. T. Balbás.

Antes de pasar a él, conviene todavía decir algo de otro elemento que trabaja también en flexión, pero ya en dos direcciones.

La *placa* es un elemento en el que lo tensional toma importancia más fundamental; por lo que, en ello, habrá que extenderse relativamente más que en otros elementos.

En primer lugar, cuando en la viga de sección rectangular el ancho es varias veces superior al canto y se hace comparable con la luz, en el lenguaje técnico no se habla ya de una viga, sino de una losa. Este elemento constituye la forma más elemental de cubrir una superficie entre dos muros o líneas de apoyo paralelos; pero ha tenido poco desarrollo hasta que el hormigón armado ha permitido construirla monolíticamente.

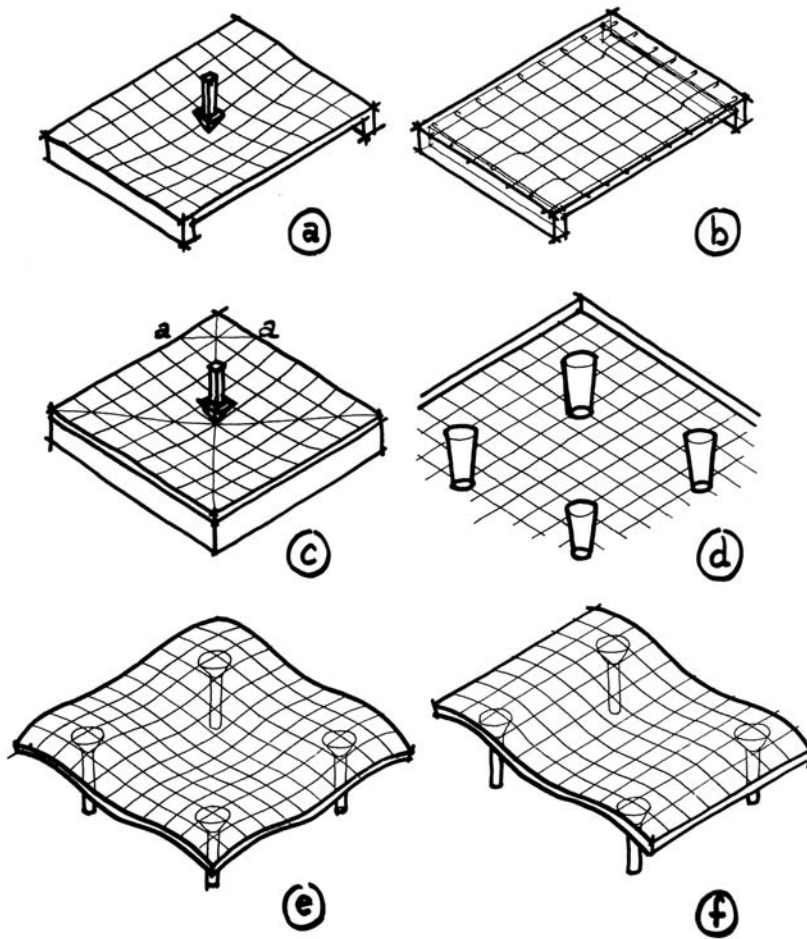
Si actúa sobre la losa una carga concentrada o simplemente una carga desigualmente repartida de una banda a otra (fig. IX. 10a), la deformación longitudinal de la banda más cargada tienen que ir acompañada, no sólo de flexiones longitudinales decrecientes en las bandas contiguas, sino que, simultáneamente y por exigencias de la continuidad geométrica, ha de producirse una flexión transversal. Esta presenta igual signo que la longitudinal junto a la zona cargada y signo contrario a los lados de ella, para enlazar con la zona no interesada por el fenómeno de carga local.

Así, pues, siendo la losa de hormigón armado, se requiere (fig. IX. 10b), además de la armadura longitudinal o principal, otra transversal o inferior e, inclusive, se requeriría completar ésta con otra superior para los momentos negativos; pero, como éstos son menores que los positivos bajo la carga, se prescinde corrientemente de esta última por la pequeñez de las tracciones que habrían de resistir.

Las instrucciones para el cálculo de elementos de hormigón armado dan reglas y fórmulas, tanto para la fijación de la armadura transversal –llamada también de repartición– cuanto para determinar el ancho de la viga equivalente que ha de considerarse en el cálculo, cuando se trata de una carga concentrada; pues se comprende que



IX-9. Acueducto de Tempul, en Jerez. Ingeniero, E. Torroja. Fotografía: M. García Moya.



este ancho depende de la forma y dimensiones del elemento. Pero, aquí solamente interesan los tipos de fenómeno y sus caracteres cualitativos.

Pues bien; si la losa, en lugar de apoyar sobre dos lados opuestos solamente, apoya sobre sus cuatro lados —como en el caso de cubrir un recinto sensiblemente cuadrado rodeado de cuatro muros (fig. IX. 10c)—, todos estos fenómenos pasan a alcanzar valores esenciales en el fenómeno resistente y crean un nuevo elemento estructural, que es la «placa» apoyada en el contorno. Esta placa está caracterizada por trabajar en flexión, necesaria y fundamentalmente, en dos direcciones ortogonales. En ella, no es posible el trabajo de flexión en una dirección sin que se produzca también en la ortogonal, cualquiera que sea el tipo o reparto de cargas que actúen sobre ella.

El contorno de la placa puede ser rectangular, poligonal, circular, elíptico, etc. De su forma y proporciones y del tipo de carga dependerá el que las flexiones, en una u otra dirección, sean mayores o menores. En cada punto aparecerán dos direcciones principales de flexión y dos magnitudes de estos momentos flectores que determinan, en unión de los esfuerzos cortantes, el estado tensional fundamental.

Si, en hormigón armado, cada flexión principal requiere su armadura propia, en cambio, el mismo hormigón es capaz de resistir las dos compresiones a la vez, sin merma de su capacidad resistente para cualquiera de ellas independientemente. Es decir, que, en la fijación del espesor de la placa, necesario para resistir los efectos de estas compresiones, es solamente la mayor de ellas la que influye. Si ambas son iguales —como en la placa cuadrada, o en la circular—, el hormigón, por así decir, se aprovecha dos veces; y ésta es, desde el punto de vista mecánico, la principal ventaja de este elemento estructural.

La ventaja sería aún más completa con el acero, por resistir su masa, con igual ventaja, la doble compresión que la doble tracción. Sin embargo, en construcción, sus posibilidades de realización, en chapa metálica, son muy reducidas por razones económicas y de fabricación.

En el trabajo de una placa rectangular, se producen necesariamente torsiones. Basta observar el tipo de deformación que, a una banda contigua al apoyo, le imponen las deformaciones de las bandas que cruza, para comprenderlo inmediatamente (fig. IX. 10c).

Este fenómeno de torsión coadyuva al trabajo tensional y alivia en buena parte los esfuerzos de flexión; pero, aun independientemente de ello, hay que tenerlo en cuenta, por cuanto representa un nuevo peligro de fisuración, especialmente en las proximidades de las esquinas de la placa, donde las torsiones son mayores. El fenómeno se aclara quizá mejor observando que, en la proximidad de las esquinas, la luz, según la diagonal aa (fig. IX. 10c), es muy corta y, por tanto, las flechas, que toma la placa, han de producir, en esa dirección, una fuerte concavidad hacia arriba con la correspondiente flexión que pide una armadura, según la diagonal aa por la cara inferior de la placa. Del mismo modo, pide otra perpendicular a ésta, por la cara superior, porque la placa, por el mismo fenómeno, tiende a levantar de puntas, despegándolas de los apoyos y dejándolas en voladizo.

Por lo demás, en la palca apoyada sobre el contorno, las tensiones cortantes tienen poca importancia mientras no se vaya a dimensiones muy grandes; y la placa del hormigón armado, en general, no admite económicamente dimensiones demasiado fuertes. Con ellas, pide el empleo de vigas y viguetas para reducir su espesor y su peso excesivos.

Tampoco tiene interés cuando la luz, en una dirección, es mucho mayor que en la otra, porque lo esencial, en la placa, es el trabajo conjunto de las flexiones en ambas direcciones. En cuanto la relación entre ambas se aproxima a dos, toda la flexión carga prácticamente en una dirección; y se pasa a un estado parecido al de la losa citada al comenzar este apartado.

Pero, la placa no siempre está apoyada en todo el contorno; puede tener algún trozo de él sin apoyo, lo que da lugar a estados tensionales y cálculos complicados; e, incluso, puede ir apoyada directamente sobre soportes exentos (fig. IX. 10d), dando lugar a un tipo especial llamado de placa fungiforme, también típico del hormigón armado, y con interesantes ventajas para establecer pisos continuos sobre filas cruzadas de soportes.

Este nuevo tipo tiene dos diferencias esenciales respecto al de placa apoyada en el contorno. Una de ellas es que, ahora, la rotura y la deformación pueden producirse

sin necesidad geométrica de provocar flexiones en dos direcciones. En la figura IX. 10f se ve claramente cómo cabe geoméricamente la deformación en forma de superficie cilíndrica con flexión en una sola dirección.

Suponiendo, para mayor claridad, que los soportes están igualmente distanciados en ambas direcciones, es claro que la deformación, en régimen elástico de trabajo, ha de ser igual en una que en otra dirección (fig. IX. 10e); pero, si por un defecto cualquiera se produce mayor curvatura de deformación en una dirección que en otra, y empieza, según aquélla, una deformación de tipo plástico o de pre-rotura, el fenómeno puede continuar hasta producirse ésta sin que, en la otra dirección, tenga por qué producirse análogo fenómeno; es decir, sin que su resistencia se sume necesariamente a la otra, o coarte su posibilidad de deformación creciente y de rotura.

Otro punto, en que esta placa se separa de la apoyada en el contorno, es en la importancia relativa del esfuerzo cortante. Ahora, la carga de cada recuadro se concentra en el perímetro, relativamente pequeño, del soporte; y éste podría taladrar con facilidad la placa si no fuese porque, para evitar ese peligro, se le provee de un fuerte capitel encargado de aumentar el perímetro, no sólo resistente a esfuerzos cortante, sino también a la flexión que se concentra, en gran parte, junto al soporte; o, mejor dicho, que ha de presentar sus valores máximos a lo largo de ese perímetro, como se comprende fácilmente. El tamaño que requieren estos capiteles es frecuentemente mayor de lo que quisieran los estetas. Ensanchando el soporte hacia arriba, a modo de estípite, se logra disminuir algo las dimensiones aparentes del capitel (fig. IX. 10d). Análogo efecto puede lograrse aumentando el espesor de la placa en la zona inmediata al capitel; pero, el sofíto de la placa toma entonces formas escalonadas o ligeramente arqueadas que complican el encofrado.

Las placas fungiformes, mientras sus vanos están equilibrados, no dan flexión sobre el soporte; pero, en caso contrario, el pórtico, que forman placa y soporte, adolece de la debilidad a flexión del soporte y de la compleja concentración de esfuerzos que se producen en el empotramiento de éste sobre la placa. Por eso, su aplicación ventajosa se reduce a los casos en que las distancias de soportes son parecidas en una y otra dirección; y mejora, aún más, si las luces extremas son menores que las centrales, o si hay bien proporcionados voladizos por fuera de ellas, y si las sobrecargas no son demasiado diferentes de un vano a otro.

Por lo demás, la ordenación de soportes no necesita ser rectangular, sino que puede ser trapecial, a tresbolillo o en triángulos equiláteros, lo que proporciona, en muchos casos, ventajas apreciables de utilización. Su encofrado es muy sencillo y económico, y la altura total que ocupa la placa es menor que la necesaria con el sistema de forjado sobre viguetas; pero, el volumen de hormigón y el peso de armadura que requiere son, en general, mayores que el de este otro sistema de piso.

Triangulaciones y mallas

Desde que la mecánica racional, a partir del siglo XVIII, encontró con sus aplicaciones vectoriales, campo abonado para desarrollarse en la técnica de la construcción, las estructuras trianguladas fueron dejando entrever mayores posibilidades, aun con la misma madera que siempre acusa el defecto de sus ensambles en tracción. La cubierta del Picadero de San Petersburgo (fig. X. 1), con sus 48 metros de luz, es una buena prueba de ello.

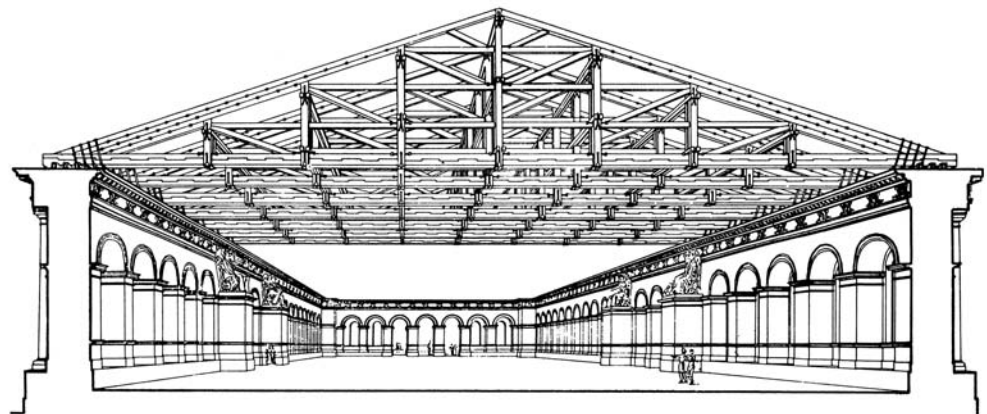
Y cuando el acero laminado acaparó el dominio de las estructuras, el desarrollo de la triangulación fue tan rápido, exuberante y atrevido como demuestran, entre tantos otros, la torre Eiffel y el puente de Firth of Forth (fig. XIV. 3).

Por eso, la triangulación puede mirarse como un elemento estructural más; tanto más interesante cuando que se aplica, por igual, a la formación de casi todos los otros, sean soportes, vigas, arcos o pórticos; e, incluso, se atreve a sustituir, con su red, las superficies continuas de las estructuras laminares.

La triangulación es una disposición especialmente apta para elementos que han de trabajar en flexión. Aun los que lo hacen fundamental o exclusivamente en compresión, como los soportes, lo que buscan en la triangulación es el arriostamiento que evite la flexión parcial o total de sus elementos longitudinales y del conjunto de la pieza.

Así, pues, lo que se comente, sobre el empleo de la triangulación en las vigas, ha de permitir, por sí solo, enjuiciar los problemas y características de su utilización en otros elementos, pórticos, arcos, etc.

La viga triangulada no permite esbelteces tan grandes como las de alma llena, por lo que luego se verá; pero sí permite disminuciones de peso y, por tanto, aumentos



X-1. Proyecto de picadero, en Moscú. Ingeniero A. de Betancourt.

de luz enormes; existiendo hoy vigas de puente metálicas de este tipo de 457 metros de luz (fig. X. 2), mientras que la mayor de alma llena sigue por bajo de los 300 metros, y esto con desventaja económica por su parte.

La viga de celosía conserva las cabezas de la viga maciza; pero el alma se descompone en dos familias de elementos, unos en compresión y otros en tracción, que absorben los fenómenos de esfuerzo cortante del alma.

En la viga de alma llena de gran canto es frecuente que el material no pueda aprovecharse bien porque el pequeño espesor del alma facilita el pandeo. En la viga triangulada, este peligro se aleja porque la concentración de esfuerzos, sobre elementos independientes, permite dar a éstos mayor rigidez y disminuir el peso del conjunto, al mismo tiempo que facilitar la construcción.

Los primeros intentos y éxitos de la triangulación se hicieron, naturalmente, con la madera, no para vigas propiamente dichas, sino para cerchas de cubiertas a dos aguas, donde la diferencia de nivel, entre cumbre y arranques, facilita su desenvolvimiento.

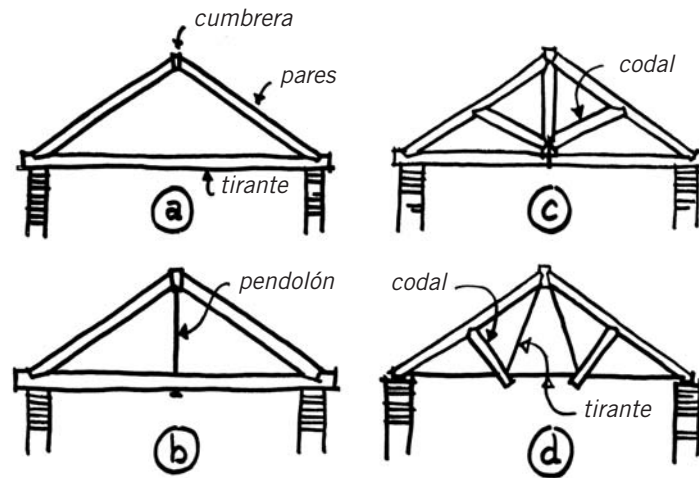
Los dos pares o alfaridas (fig. X. 3) requieren acodalarse sobre las fardas de un tirante o almarbate para no abrirse tumbando los muros o deslizándose sobre ellos; así se formó el primer triángulo (a). El tirante resultó demasiado flexible, aun para su propio peso, y pidió un pendolón para colgarlo por el centro (b). Y, por fin, los dos pares se apuntalaron con éxito, sobre el pendolón, partiendo en dos la luz libre de aquéllos (c). De aquí a la viga Polonceau va sólo un paso: el de abrir el pendolón en dos (d).

Pero, en la viga propiamente dicha, el primer paso, que dio el acero, para aligerar su alma, no fue tan simple, o, mejor dicho, no recorrió un camino de complicación sucesiva; sino que, con criterio más intuitivo y menos mecánico, empezó por sustituir la continuidad del alma por una celosía múltiple muy cerrada (fig. X. 4). Pronto se comprendió que los problemas de rigidización continuaban los mismos, aparte del hiperestatismo, del que luego se tratará. Y se llegó a la conclusión de que es preferible agrupar los esfuerzos en el mínimo de piezas para poder darles mayor rigidez sin aumentar el peso total.



X-2. Puente de Moissac. De «Esth et Constr. des Ouvrages d'Art». J. Demaret.

X-3. Cerchas de madera.



Algunos tipos de vigas pretendían arrancar con varias diagonales desde los apoyos; pero, esto, llevado al extremo (fig. X. 4b), presenta dos inconvenientes aleccionadores. Uno es que cada par de diagonales sólo trabaja para la carga que actúa sobre el montante que apoya en el extremo común de aquéllas. Con ello se pretende repartir las cargas entre las diferentes diagonales para que, por así decir, cada cual soporte la suya; pero, de ese modo, se desaprovecha la resistencia de cada una de ellas cuando las sobrecargas ocupan otras posiciones.

Esto va contra el principio económico del mejor aprovechamiento de los elementos principales cuyo trabajo es preferible utilizar en todo momento, aun a trueque de tener que reforzarlos; porque, en general, una única pieza, de determinada sección, es más económica que varias cuyos pesos o secciones sumen lo mismo que aquélla, especialmente si han de trabajar en compresión o flexión.

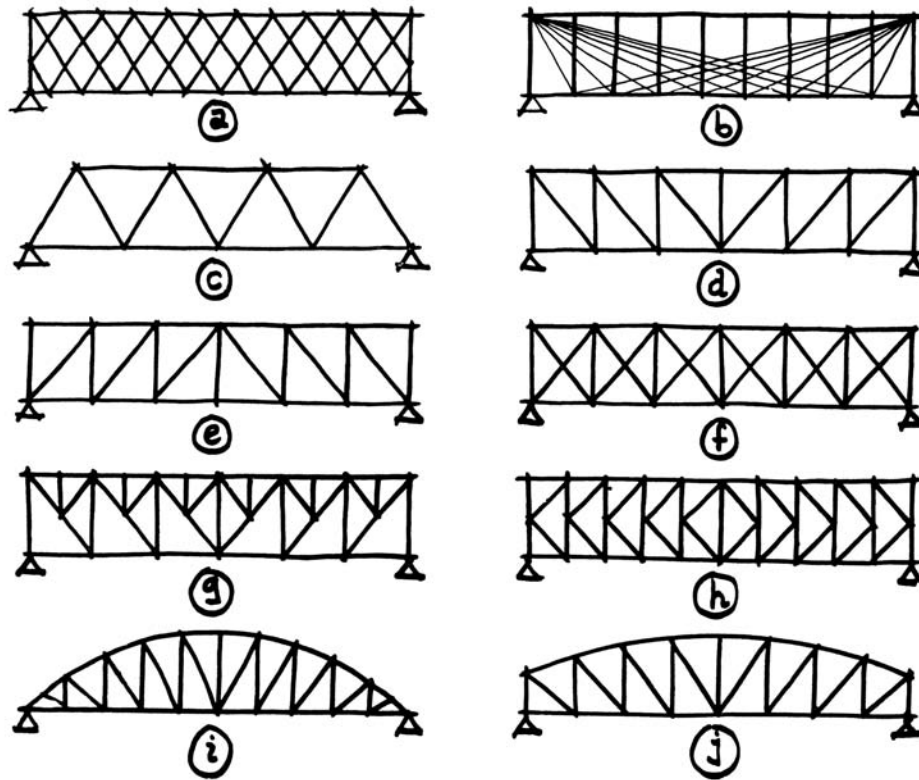
Por otra parte, al pasar la sobrecarga concentrada sobre un montante, solamente hace trabajar un par de diagonales, que se deforman y producen un descenso de la carga sin que el resto de la estructura les acompañe en el movimiento.

Por último, los ángulos resultantes de cada triángulo de trabajo son muy agudos u obtusos, y eso da lugar a que la desigualdad de deformaciones, entre las barras de un triángulo, produzcan variaciones angulares fuertes que se traducen en esfuerzos secundarios perjudiciales.

Por todo ello, las triangulaciones tendieron a formarse por una sucesión de triángulos, de lados no muy diferentes en longitud, con ángulos comprendidos entre los 45° y los 60° y con pocas barras, relativamente robustas.

La viga Warren (fig. X. 4c) es la más representativa de esta tendencia. En ella se ve cómo la armadura obliga a deformar y esquematizar la red de isostáticas que aparecía en la viga maciza; pero, en realidad, no demasiado. Por su parte, la estática gráfica acusa bien claramente el esquema de esfuerzos que resulta.

Hoy, aparte de la viga en K (fig. X. 4h), puede decirse que sólo se utiliza la triangulación simple, formando una serie de triángulos, cada uno de ellos adyacentes solamente al anterior y al posterior.



En general, interesa mantener, dentro de límites aceptables, la esbeltez de todas las piezas; pero más especialmente las que han de sufrir esfuerzos axiales de compresión, que están, por tanto, expuestas a pandear. Por eso, puede ser preferible la viga Pratt (fig. X. 4d) que, a plena carga, trabaja con los montantes verticales, más cortos, en compresión, y las diagonales, más largas, en tracción; mientras que, en la Howe (e), ocurre lo contrario. Claro está que, para sobrecargas parciales no ocupando más que un trozo de la luz, los esfuerzos pueden invertirse y perderse buena parte de esa ventaja. Para evitarlo, se pensó en duplicar las diagonales (fig. X. 4f) con objeto de que siempre hubiese una, en cada recuadro, dispuesta a trabajar en tracción, y por consiguiente, ninguna de ellas necesitase ser resistente a compresión. Pero, la ventaja queda compensada con creces por el exceso en el número de barras; y además, el hiperestatismo de la estructura hace que las barras, que habrían de trabajar en compresión, aunque innecesarias para el equilibrio isostático, sufran realmente ese tipo de esfuerzo que la deformación les impone, y tiendan a pandear, perjudicando, con ello, los enlaces y el mismo trabajo de las otras piezas.

En todo caso, el peligro de pandeo de los montantes, o de la cabeza comprimida, y las mismas flexiones de ésta por su propio peso, dan lugar, en triangulaciones grandes, a secciones demasiado fuertes, y se hace necesario buscar arriostamientos intermedios para sus barras. De esa necesidad, y de la de evitar que la sobrecarga actúe

sobre las piezas de las cabezas entre nudos, provocando su flexión, nacen los elementos y triangulaciones secundarias dentro de la triangulación principal, tales como los que aparecen en la figura X. 4g.

Por otra parte, este género de vigas importantes necesita arriostramientos normales a su plano para evitar el pandeo lateral, especialmente de la cabeza comprimida, y ello aumenta los problemas de enlace.

Todas estas estructuras trianguladas, que primero se construyeron articuladas, pasaron pronto a hacerse de nudos rígidos, con roblonado más fácil y económico que las articulaciones; y han acabado de rigidizarse, aún más, con la soldadura. Esto hace que una estructura isostática articulada pase a ser hiperestática al suprimírsele sus articulaciones. Las deformaciones longitudinales de las barras, diferentes de una a otra dentro de cada triángulo, no son ya posibles sin unas flexiones, en ellas, que interesa reducir al mínimo posible. Para ello, es conveniente que los triángulos no sean demasiado escalenos, como se ha dicho. En este sentido, la triangulación Warren es mejor que la Pratt, si bien la conveniencia de reducir las longitudes de pandeo, en diagonales, inclina muchas veces la balanza hacia este último tipo de triangulación.

El que hoy se desechen triangulaciones múltiples tiene, aparte de otras justificaciones, la de que los errores o forzaduras, que impone el roblonado y aun la soldadura, hacen que, en la estructura hiperestática que es siempre una celosía múltiple, las tensiones secundarias y parásitas anormales puedan ser demasiado fuertes; pues, son nuevas barras que se introducen en una estructura, ya completa y rígida de por sí.

Los problemas, que resultan en los nudos y cruces de una barras con otras, dan lugar frecuentemente a bastantes quebraderos de cabeza durante el proyecto, especialmente en estructuras roblonadas; por lo que, muchas veces, se prefiere reducir al mínimo estos elementos, aun a trueque de aumentar el peso total de la estructura.

En vigas de gran luz, como pueden ser las de los puentes, la aparición de montantes supletorios u otras piezas viene impuesta por la distancia conveniente entre las viguetas transversales del tablero que han de recoger y transmitir las cargas a la viga; o de los elementos de arriostramiento que sea necesario establecer normalmente al plano de la viga para evitar su pandeo o vuelco general. En estos casos, la triangulación en K (fig. X. 4h) puede ser muy ventajosa, porque sigue siendo una triangulación simple —es decir, isostática, si los nudos fuesen articulados—, en la que, sin variar la inclinación de las diagonales, la separación, entre montantes o entre nudos sobre las cabezas, se reduce a la mitad respecto a la Warren o a la Pratt. Al mismo tiempo, se disminuye mucho la longitud libre de los montantes y de las diagonales. Como consecuencia de ello, y de dar a esas piezas la sección apropiada para igualar sus peligros de pandeo en ambas direcciones —en el plano de la viga y normalmente a él—, se pueden lograr buenas economías con el empleo de la triangulación en K cuando se trata de grandes luces y alturas de viga.

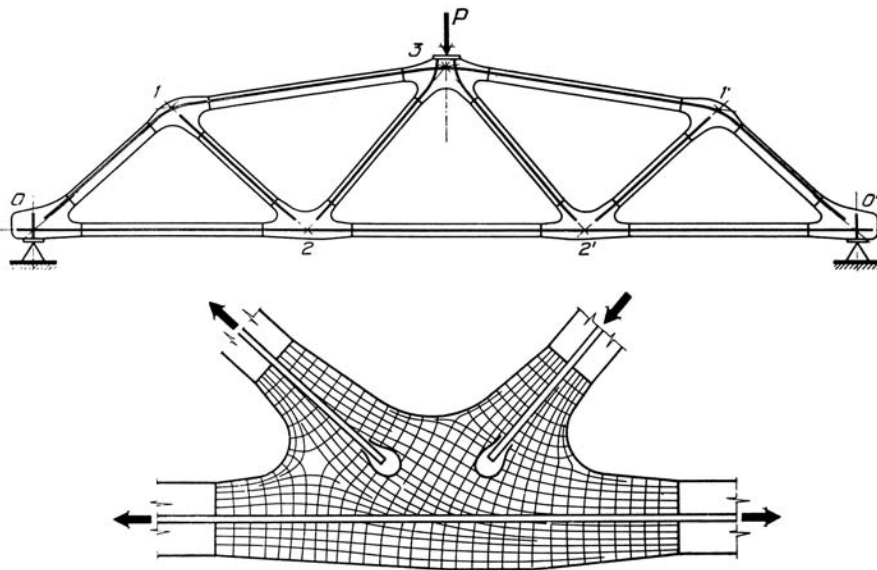
Estas vigas trianguladas se prestan muy bien a hacerlas de altura variable siguiendo, más o menos, las exigencias de las flexiones. Así, con carga uniformemente repartida, que da lugar a una ley parabólica de momentos flectores, se puede hacer variar el canto según esa misma ley (fig. X. 4i); pero, a poco esbelta que sea la viga, la parábola da ángulos demasiado agudos en los triángulos extremos, con esfuerzos secundarios

demasiado grandes; y, por eso, se emplea frecuentemente la, mal llamada, viga semi-parabólica, tal como la representada en la figura X. 4j.

Con directriz parabólica, el conjunto presenta un aspecto parecido al de un arco atirantado; sin embargo, su fenómeno resistente es totalmente diferente. La triangulación liga todas las barras obligándolas a trabajar como una estructura completa, en sí misma, aun cuando todos los nudos fuesen articulados; y las barras no han de trabajar más que en compresión o tracción axial, sin las flexiones que son obligadas en el arco para soportar las desigualdades de sobrecarga. En estas vigas, interesa mucho menos que en el arco, el que la cabeza siga una parábola u otra curva parecida como, por ejemplo, un arco de círculo. Cuál sea la curva y a qué cabeza se aplique suele, pues, depender de razones funcionales o de otro orden no puramente resistente.

En los elementos triangulados, el enlace tiene importancia fundamental. Las barras, coincidentes en un nudo, le transmiten sus esfuerzos axiales, equilibrándose o contrarrestándose unos con otros. Ello provoca, necesariamente, cambios bruscos de dirección en las tensiones principales, con concentraciones importantes y con desaprovechamiento de secciones resistentes. Este desaprovechamiento es bien aparente en las costuras por roblonado; pero, aun con la soldadura, se produce también, pues las tensiones han de transmitirse por los estrechos cordones de soldadura establecidos sobre los bordes de los perfiles laminados cuya sección se mantiene constante; y corrientemente estos perfiles, que han de soldarse, no pueden ir en el mismo plano, ni coincidir en toda su sección.

Basta observar la red de isostáticas en los enlaces de la triangulación experimental de la figura X. 5, construida y estudiada en el Laboratorio del Politécnico de Zurich, para comprender cuánto falta todavía para poder llegar, en la práctica, a una solución parecida. Se comprende que, con las exigencias y limitaciones de los perfiles actuales,



X-5. Viga experimental, estudiada en el Laboratorio de Zurich.

de una parte, y de la soldadura por cordones exteriores, de otra, las soluciones no pueden ser las óptimas; y los que están más en el detalle y en el estudio de la cuestión saben, mejor que nadie, la distancia que les separa todavía de esa solución óptima, con ser mucho lo que ya se ha adelantado por ese camino.

Nada se ha dicho de las posibilidades del hormigón armado o pretensado en estos tipos de vigas trianguladas, porque el hormigón armado es poco apto para este tipo estructural que, con estos materiales, exige mucho encofrado, presenta dificultades en los nudos para el paso de las armaduras, tiene un hormigonado costoso y, sobre todo, produce, normalmente, fuertes esfuerzos secundarios; aparte de ello, su peso es siempre mayor que el del acero. Sin embargo, hay vigas, como las del puente de Lafayette, con 70 metros (fig. X. 6) de luz, que han resuelto lo mejor posible este problema de los esfuerzos secundarios, gracias a hacer piezas anchas, normalmente al plano de triangulación y estrechas en ese plano, y evitando, además, su pandeo mediante la doble triangulación, que acorta la longitud libre de las diagonales.

Las ideas de Dischinger, consistentes en postesar las armaduras en algunos elementos –como, por ejemplo, las diagonales, para corregir su longitud y disminuir los secundarios–, resultan difíciles y costosas de ejecución.

Pero, con ello y con todo, su empleo puede interesar y se va difundiendo, en vigas y cerchas, cuando se trata de muchos elementos iguales y de dimensiones no demasiado grandes, de modo que el problema permita su fabricación, en serie, tumbadas en el suelo para levantarlas después y elevarlas hasta su posición definitiva (fig. X. 7). En estas vigas es necesario estudiar los secundarios y reducirlos todo lo posible, disminuyendo los espesores en el plano de la triangulación, e inclusive suprimiendo el hormigón en algunas piezas en tracción, para dejar sólo las armaduras. De este modo, quedando las armaduras vistas, es fácil introducir acortamientos determinados, en ellas, mediante



X-6. Puente de Lafayette, en París. Ingeniero A. Cacquot. De «Esth et Constr. des Ouvrages d'Art», J. Demaret.



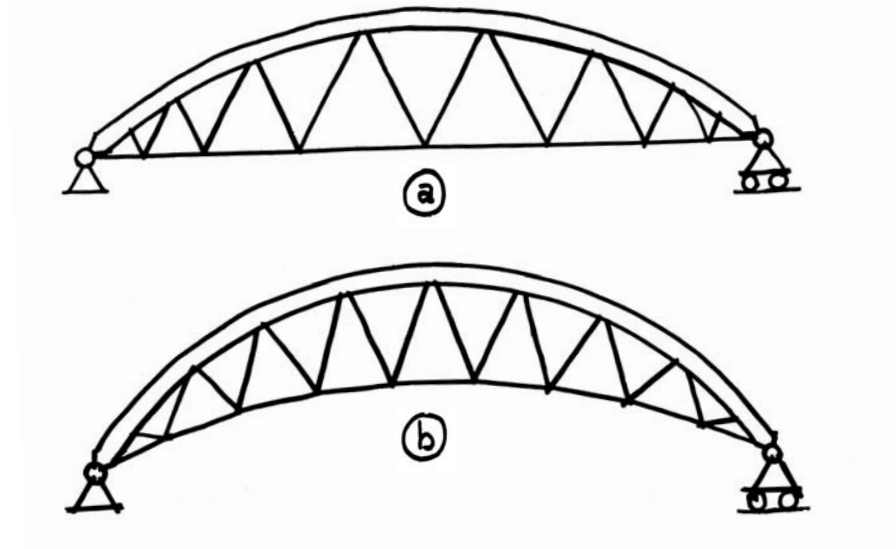
X-7. Cercha, en Ávila. Ingeniero E. Torroja.

tensores; y lograr contrarrestar, así las deformaciones que han de producirse, después, en el trabajo normal de la estructura. El corte y la soldadura de estas barras, después de endurecido el hormigón del resto de la estructura para hormigonar luego esas armaduras, cuando ya se les ha obligado a tomar el acortamiento necesario, puede ser una solución satisfactoria.

En fin, en este tipo de cerchas, en las que interesa reducir los pesos y los espesores, podría encontrar una aplicación el hormigón pretensado, en cuanto la normalización de las luces permitiese su fabricación en gran serie. Su menor propensión al agrietamiento, durante el transporte y montaje, proporcionaría una ventaja no despreciable.

Todavía dentro del conjunto de las vigas trianguladas podría considerarse, con carácter específico, la viga tipo Nielsen, formada (fig. X. 8a) por una cabeza superior curva, una inferior recta y unas diagonales, sin hormigonar, capaces de trabajar solamente en

X-8. Viga tipo Nielsen.



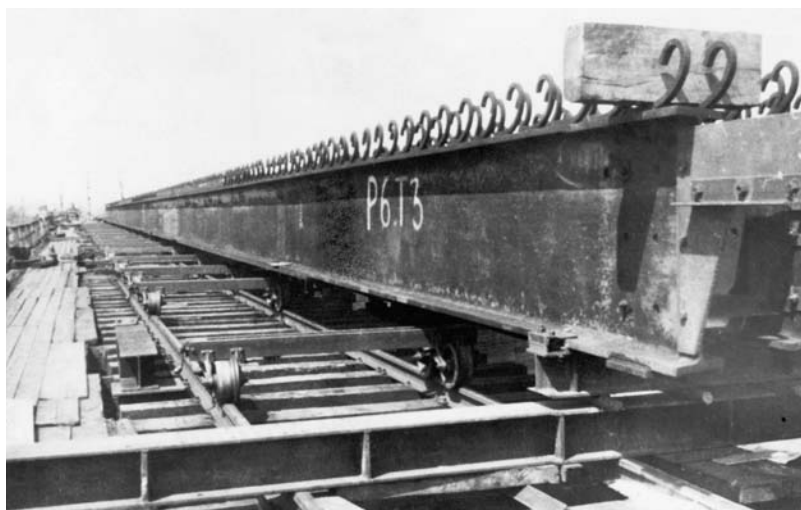
tracción, con lo que su sección puede disminuirse al límite por no existir peligro de pandeo. Para que esta viga triangulada pueda trabajar, como tal, requiere, naturalmente, que las compresiones, que pudieran resultar en la diagonales, por efecto de las desigualdades de sobrecarga, sean siempre inferiores a las que produzca el peso muerto.

Parecidas ventajas pueden obtenerse curvando la cabeza inferior para que el tirante poligonal, que resulta (fig. X. 8b), dé componentes de tracción sobre las diagonales. De este modo, aun actuando la parte principal de la sobrecarga viva sobre la cabeza superior, puede lograrse que no aparezcan compresiones en las diagonales, o que éstas se limiten a las diagonales extremas cortas, siempre que las posibles variaciones de la sobrecarga, a lo largo de la viga, sean pequeñas, y que las alineaciones de ambas cabezas hayan sido bien estudiadas.

En estas vigas, lógicamente, son de hormigón armado las piezas destinadas a trabajar en compresión; y de acero, los tirantes o las barras que lo hacen en tracción. Este tipo de estructuras mixtas presenta indudables ventajas de ligereza y economía.

La viga de alma llena se ha compuesto también, en algunos casos, por una viga de cabeza inferior y alma metálicas a la que se sobrepone una cabeza de hormigón. El enlace se asegura (fig. X. 9) mediante talones metálicos o redondos soldados al alma y anclados a la cabeza. Este sistema presenta el inconveniente de las desiguales deformaciones entre un material y otro, por la retracción y la deformación lenta del hormigón bajo carga permanente; y, en fin, por las desiguales temperaturas que pueden tomar los dos materiales bajo las variaciones diurnas, al tener distinta masa térmica y diferentes coeficientes de transmisión del calor y de absorción por radiación solar, las partes de hormigón y las del acero no hormigonado.

En las vigas trianguladas este inconveniente se reduce mucho, porque las barras pueden ser suficientemente flexibles para que estos fenómenos sólo produzcan esfuerzos



X-9. Viga mixta para el puente de Lumes. Ingeniero M. Ridet. De «An. Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics», nov. 1950, nº 10.

secundarios aceptables y correctamente previsibles. Las economías que pueden obtenerse con este mejor aprovechamiento de los materiales, en determinados casos, son bien comprensibles y apreciables.

Naturalmente, la técnica y el tipo del enlace, entre hormigón y acero, son diferentes y pueden adoptar formas tan nuevas como las indicadas en la figura X. 10. La compresión de la diagonal se compone con la tracción del montante para provocar en la cabeza un esfuerzo de compresión sobre el palastro encargado de transmitírsele al hormigón en un área suficiente. Unas rejillas curvas de redondos alejan el peligro de rotura de éste, mientras otros redondos, terminados en gancho, complementan la adherencia de la armadura con el hormigón. La disposición de la armadura longitudinal de la cabeza permite un buen hormigonado, y todo el enlace está estudiado para que haya una eficaz transmisión de esfuerzos dentro del hormigón.

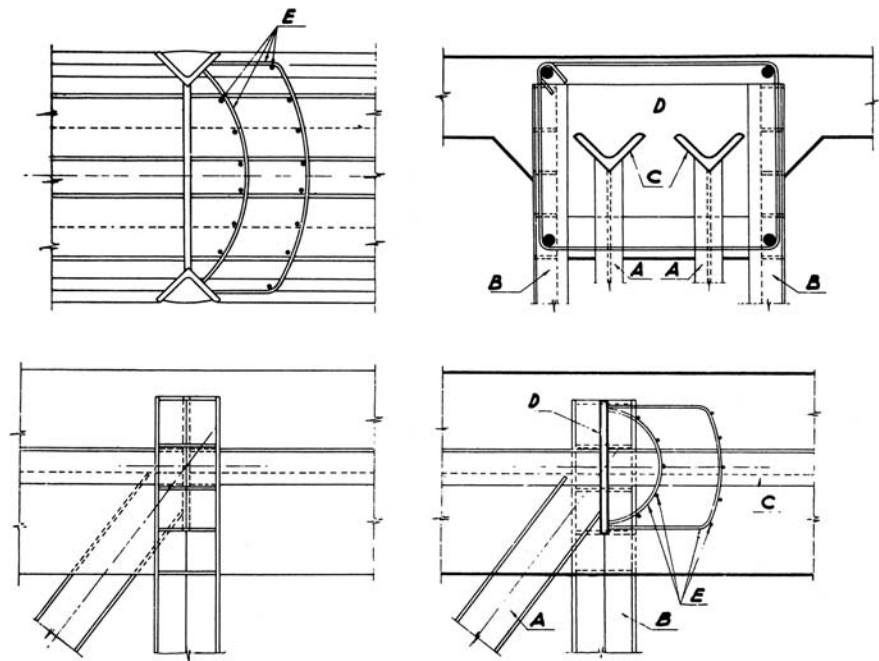
Por último, conviene decir algunas palabras respecto a otro tipo de viga, totalmente diferente de la triangulada y de origen más moderno; es la viga Vierendeel (fig. X. 11). En esta viga, la función de las diagonales, que no existen en ella, está sustituida por la resistencia a la flexión de las piezas que forman las cabezas y los montantes.

La tendencia a deslizar la cabeza superior respecto a la inferior, producida por el esfuerzo cortante, está contenida, en las vigas trianguladas, por las componentes de las fuerzas que, paralelamente a las cabezas, producen las diagonales. En la viga Vierendeel, estas componentes están contrarrestadas, en los empotramientos de los montantes, por el esfuerzo cortante de éstos con las flexiones consiguientes.

Lógicamente, esto produce tensiones mayores o mayores secciones y momentos de inercia en las piezas y, por consiguiente, no es fácil que pueda resultar más económica que la viga triangulada. Como sus deformaciones y flechas son también mayores, su justificación ha de buscarse exclusivamente en razones funcionales como, por ejemplo, la gran ventaja que ofrece de dejar vanos rectangulares libres, lo que puede ser muy útil en fachadas y vigas de entreplanta.

Estas vigas pueden tener cabezas rectas o curvas, o mejor poligonales. Si la cabeza superior es un polígono inscrito en la parábola, los inconvenientes anteriores disminuyen;

X-10. Estructuras mixtas de hormigón y acero.



porque, a plena carga, la estructura puede trabajar, así, como un arco atirantado, y las flexiones locales de los montantes sólo aparecen entonces para compensar desigualdades de la sobrecarga.

Estas vigas, que tuvieron una rápida floración en Bélgica, sufrieron, sin embargo, el accidente del puente de Hasel. Entre los comentarios autorizados a propósito de las causas del accidente, se habló mucho de su excesiva rigidez. Concepto que conviene aclarar; pues, en realidad, no parece tratarse en este caso de un exceso de rigidez del conjunto de la estructura, sino de los nudos o elementos dentro de cada célula trapecial. Las contracciones de soldadura pueden, en ellas, producir tensiones importantes. Pero, aparte de ello, son los grandes momentos flectores, que han de transmitirse por los nudos, los que resultan más peligrosos, por las brusquedades que introducen en el camino de las tensiones y por la bi o tritricciones que pueden aparecer en los ángulos entrantes.

Cuando este tipo estructural se hace de hormigón (fig. V. 2), se produce igualmente la debilidad consiguiente a los ángulos entrantes en tracción con sus peligros de fisuración; y, si para evitarlo, se redondean estos ángulos, resulta la viga demasiado rígida, costosa de encofrado y complicada de armadura.

Por eso, la viga Vierendeel es menos utilizada que la triangulada; pero es utilísima en ciertos casos de edificación en los que los huecos de puertas, ventanas, etc., proscriben el empleo de diagonales.

Aunque sean bien discutibles, suelen alegarse razones estéticas en favor de este tipo de viga; porque hay que reconocer que a la viga triangulada y, en general, a cualquier otro elemento triangulado no ha sabido dársele, hasta ahora, la expresión y el valor estético que a otros elementos. Siempre aparece como algo esquelético y tendinoso, en lo

que la razón resistente se muestra con excesiva crudeza y primordialidad exclusivista. Pero, la viril apariencia de algunas grandes vigas de puente, o la femenina elegancia, tan típicamente parisina, de la torre Eiffel, no son tampoco nada despreciables; y la compacidad y limpieza de perfiles, que permite la soldadura, suprimiendo cartelas y cabezas de roblón, ofrece buenas perspectivas para el mejoramiento estético, posiblemente con formas o variantes todavía inéditas de las estructuras trianguladas.

Por último, no debe olvidarse que la triangulación no sirve solamente para formar conjuntos planos o tridimensionales, sino, también, para sustituir los elementos laminares como se ha comentado ya anteriormente. Esas triangulaciones superficiales inscritas en superficies cilíndricas, acupuladas o de otras formas, pueden desarrollarse todavía mucho más de lo que lo han hecho hasta la fecha. Las originales cúpulas de Buckminster Fuller son buena prueba de ello (fig. X. 13). En competencia con ello se presentan, en fin, las superficies, no trianguladas sino formando mallas trapezoidales.

La *malla-tesa* constituye otro elemento superficial fundado en principios, en cierto modo, contrapuestos a los de la triangulación. Es quizá el más reciente de los que pueden considerarse como sistemas elementales de los posibles conjuntos estructurales.

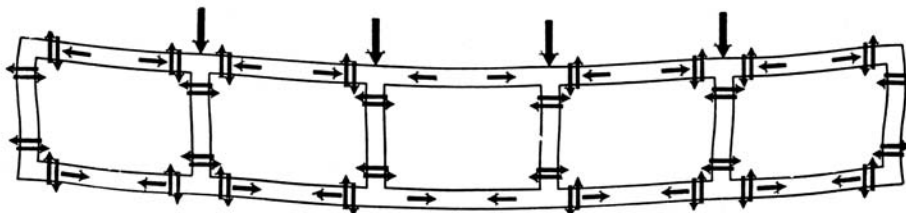
La malla-tesa está formada, esencialmente, por dos familias de cables, anclados por sus extremos a un determinado contorno y cruzándose entre sí en dos direcciones para formar una malla.

Esta puede, por tanto, considerarse inscrita en una superficie sobre la que quedan los nudos o encuentros de cada dos cables. Su utilidad principal es la de servir de sustentación a un material de cobertura para formar, así, grandes cubiertas.

Mecánicamente, de lo que se trata es de que todos los elementos de la malla estén en tracción para lograr un total aprovechamiento de las secciones de los cables, formados por hilos de acero de muy alto coeficiente económico-resistente. Para lograrlo, la superficie es siempre cóncavo-convexa; es decir, con una familia de cables sustentantes colgados de un determinado contorno con su concavidad hacia arriba, y otra de cables rigidizantes con la concavidad hacia abajo. De este modo, la tensión dada a los rigidizantes pone en carga a los sustentantes.

Sólo así se puede lograr, de una parte, que las variaciones de carga —debidas a la nieve y más corrientemente al viento—, no alteren exageradamente la forma de equilibrio de la malla; y de otra parte, que en ningún caso trabajen los cables en compresión.

Es necesario, por tanto, que las reacciones que los rigidizantes producen sobre los sustentantes sean varias veces mayores que las desigualdades de carga que puedan producirse. Parece, y es cierto, que, de este modo, una gran parte de la resistencia de



X-11. Viga Vierendeel.

los cables se pierde en soportar esas cargas que unos cables ejercen sobre otros. Por otra parte, hay que contar con unas determinadas sobretensiones para compensar los posibles aflojamientos por dilataciones térmicas.

Pero, a pesar de ello, la estructura puede resultar económica, gracias al mejor aprovechamiento del material que ofrecen las tracciones sobre las compresiones y las flexiones.

Se trata, pues, de una estructura esencialmente pretensada. Sin los esfuerzos que previamente le impone este pretensado por el borde, el equilibrio o la fijeza del conjunto no sería posible.

Es curioso observar que, en realidad, es una estructura incompleta, cuya figura de equilibrio, en consecuencia, varía con el sistema de cargas que en cada momento haya de soportar. Pero si, como se ha dicho, las que crea el pretensado son suficientemente grandes, se puede lograr que, prácticamente, las obras no alteren apenas la forma que previamente se le ha dado; del mismo modo que el funicular de un cable varía poco al variar el sistema de pesos que cuelga de él, si previamente se le ha cargado con otros mucho mayores.

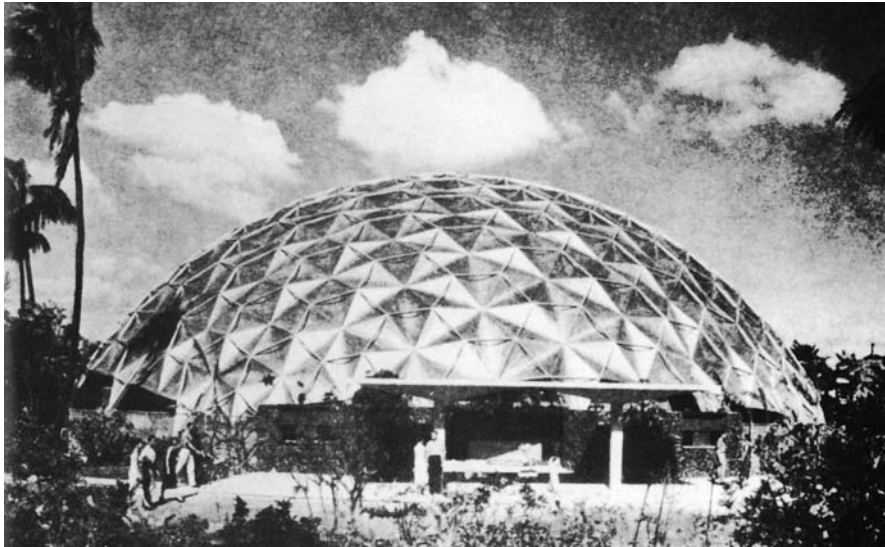
No es éste lugar para enterar en el intrincado y poco estudiado problema de cuál es la forma óptima de la malla, sobre un contorno determinado. Basta decir que interesa, entre otras cosas, mantener lo más uniforme posible la tensión a lo largo de cada cable; uniformar igualmente las distancias entre cables para facilitar la sujeción del material de cobertura; reducir al mínimo el área de la superficie, y lograr buenas curvaturas –cuanto mayores, mejor– para alcanzar la máxima rigidez. Con esto sólo, se comprende que el problema no es fácil; pero, sin necesidad de llegar a la solución óptima, se han realizado ya cubiertas de máxima importancia e interés (fig. X. 12).

El borde que ha de soportar las tensiones de los cables puede, a su vez, estar en tracción o en compresión. En cualquiera de los dos casos, interesa que se amolde todo lo posible el funicular de cargas para evitar sollicitaciones de flexión.

Parece que sustituyendo la malla por una retícula triangulada se podría aprovechar la ventaja de su mayor rigidez; pues, de esta forma, la estructura incompleta y, por tanto, fácilmente deformable, se convierte en otra, no sólo completa, sino hiperestática. Pero



X-12. Estadio de Raleigh.
Arquitecto Henley Deitrick.
Ingeniero Matthew Nowicki.
Ingenieros Asesores, Severud-Elstad-Krueger. Fotografía: Lewis P. Watson.



X-13. Cúpula poliédrica de aluminio, en las islas Hawai. Ingeniero R. Buckminster Fuller. Fotografía: Kaiser Aluminium.

el sistema no se ha desarrollado con elementos todos en tracción, bien sea porque la superposición de tres familias complica los enlaces y dispositivos de cobertura, bien porque el aumento de rigidez es poco eficaz para contener los corrimientos normales a la superficie, cuando ésta es de poca curvatura, bien porque la complicación del tesado no permita asegurar, ya, un buen reparto de las tensiones entre los diferentes cables.

Otro nuevo tipo estructural sin nombre todavía, está dispuesto a entrar ya en acción; tal es la fusión estructural de la malla-tesa con la lámina. Sus posibilidades de forma, de luces y de economía aún no se pueden fijar, de puro grandes que parecen ofrecerse. Quizá pudiera llamársele la malla-tesa laminar.

Porque la lámina corriente proporciona, en general, una gran reducción del volumen de hormigón e incluso de peso de armaduras, si la forma está bien escogida para reducir sus flexiones y aproximarse al estado díftero o de membrana. Pero el coste del encofrado y de su cimbra no se reduce, y llega con facilidad a representar la parte principal del costo.

Para evitar este inconveniente se ofrecen dos posibilidades. Una es la de establecer una malla-tesa, y sobre ella colocar placas de hormigón para rejuntarlas «in situ». Ciertamente estas placas resultan, en general, alabeadas y distintas unas de otras, pero existen tipos de molde que pueden adaptarse fácilmente a distintos alabeos y cuadriláteros de contorno e incluso diferentes radios de curvatura y signos de ésta, con mucha mayor economía que la de hacer un molde distinto para cada pieza.

La otra consiste en formar la lámina continua por proyección de mortero a presión; con la técnica —mal llamada de cemento-cañón o gunita y que mejor sería llamar de mortero proyectado—, sobre una tela metálica fina sujeta a la malla sustentante.

Por este último procedimiento, el espesor de la lámina puede ser muy pequeño, ya que no forma un elemento resistente, sino solamente de relleno sobre la malla sustentante para establecer la superficie continua, para rigidizar el conjunto y para evitar la oxidación de los cables de la malla. El encofrado desaparece totalmente o se

reduce a unas tablas o cartones sobre la tela metálica para evitar el paso del mortero a través de ésta durante su proyección y que se pueden ir corriendo y reutilizando a medida que avanza la zona de proyección.

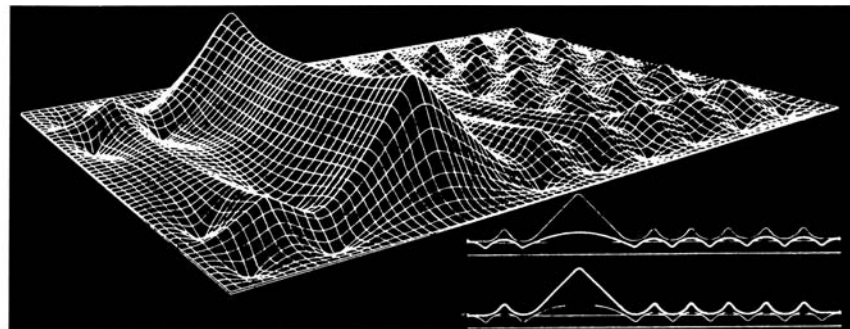
Un grave peligro, que ha de evitarse en este proceso, es el de agrietamiento de la lámina por efecto de las sucesivas deformaciones que va tomando la malla a medida que se va avanzando el hormigonado. El peso de las primeras zonas obliga a la malla a buscar una cierta posición de equilibrio; y al hormigonar las zonas siguientes, cambia esta forma y puede agrietar las otras zonas, ya hormigonadas y endurecidas.

Un sistema de evitarlo es el cargar con pesos toda la malla e ir después sustituyendo estos pesos por el de la propia lámina a medida que ésta se va vertiendo. Otro puede ser el de sustituir esos pesos muertos por fuerzas producidas por tirantes provisionales que, anclados a la solera de la sala, tiren de la malla produciendo en ella el mismo efecto del peso de la lámina. Incluso pueden irse corrigiendo o anulando los corrimientos que tienda a tomar la malla, mediante los oportunos tensores de rosca de que vengan provistos los tirantes.

Pero aún puede darse un paso más; el de tensar la malla sobre soportes o tirantes provisionales para soltarlos después de hormigonar la lámina hormigonada sobre ella. De este modo, al suprimir las reacciones externas provisionales, las tensiones de la malla pasan a comprimir la lámina; y ésta, así comprimida, queda libre de los peligros de fisuración pasando, de un simple elemento de relleno, a cumplir simultáneamente una función resistente.

Estudiar los estados de tensión intermedios, las condiciones que el sistema impone sobre la forma de la superficie, la distribución, orientación y densidad de malla que convenga adoptar en cada caso, para llevar las reacciones a los apoyos provisionales primero, y a los definitivos después, siempre con el mínimo posible de material, analizar el sistema vectorial de la malla inicial y su paso al tensorial de la lámina continua definitiva, y tantas otras cosas, son cuestiones cuyo solo enunciado basta para dar idea de la complicación de proyecto, de cálculo y de cuidados de ejecución que esto representa; pero la Técnica está hoy preparada y no debe asustarse frente al problema, dadas las enormes posibilidades que se ofrecen por este camino, todavía inédito.

Formas tan novedosas, como la de la figura X. 14, que podría realizarse por este sistema sosteniendo sólo provisionalmente los vértices superiores para tesar la malla entre ellos y los inferiores definitivos, son solamente un destello inicial de la aurora que se anuncia.



X-14. Modelo realizado en la School of Design. North Carolina State College. Arquitecto Horacio Caminos.

La contención

Con todos estos elementos, y otros en cuyo detalle no puede entrarse sin alargar demasiado la exposición y desviarla de las ideas fundamentales que interesa destacar, ha de hacer el técnico sus estructuras mediante una hábil combinación y una acertada elección de los materiales que han de formarlas.

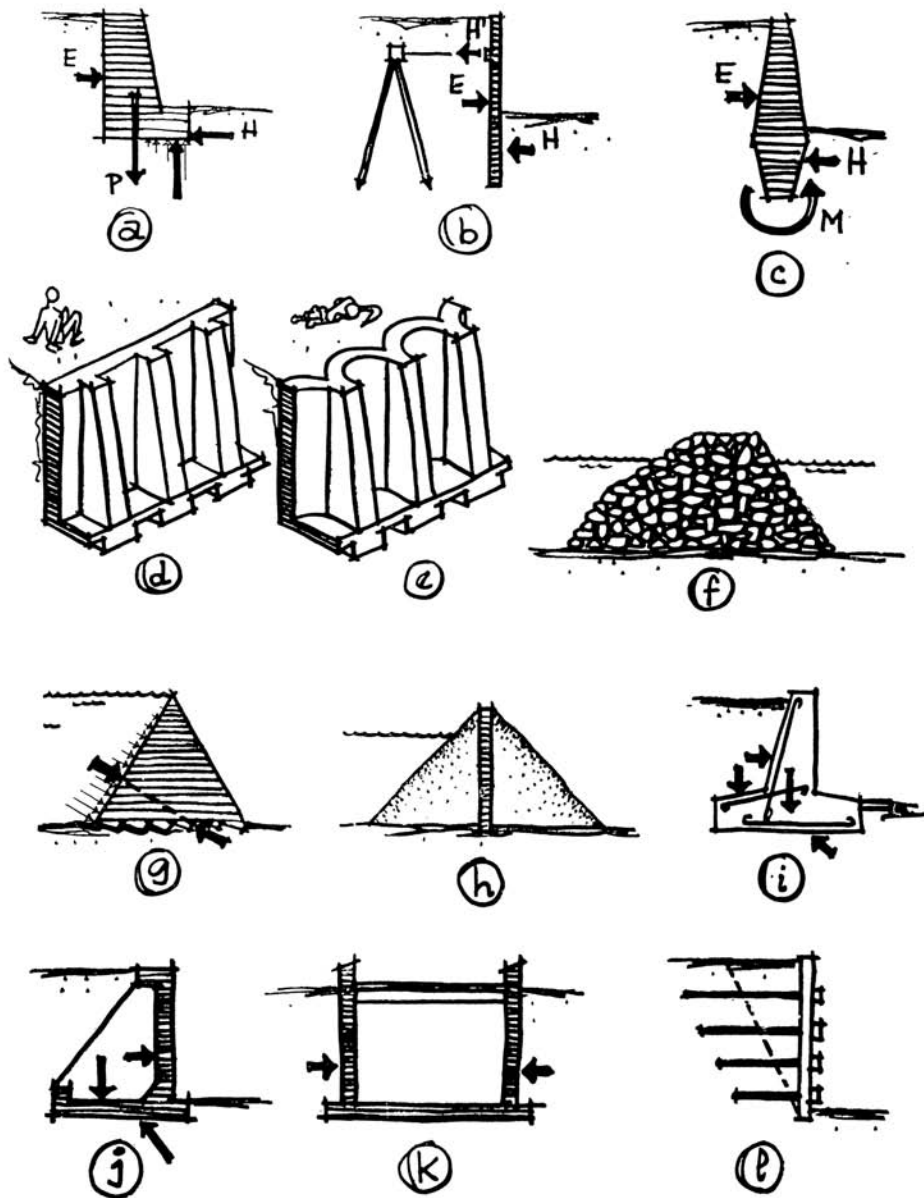
Cada problema concreto es diferente y, en pocos de ellos, el proyectista podrá dejarse guiar ciegamente por los tipos estructurales establecidos sin necesidad de poner en juego sus imaginación y, no menos su espíritu crítico, para enjuiciar la adaptación del tipo clásico a las condiciones particulares del caso que ha de resolver.

En los libros se encuentran descritos y comentados todos esos tipos estructurales clásicos y las reglas que han de seguirse para su cálculo y perfilamiento. Por tanto, lo que interesa, aquí, no es entrar en el razonado y monótono catálogo de esos tipos, ni en la historia de las causas de su nacimiento y de las influencias que han terminado por darles sus características actuales; sino que ha de limitarse la exposición a resaltar las ideas básicas, funcionales, tensionales y constructivas, que juegan en ellos, para que su meditación pueda servir de guía cuando llegue el momento de trazar una estructura nueva y de moldear, sobre ella, la mejor aptitud para la misión que ha de cumplir.

Es raro, bien que no imposible, que una estructura no haya de servir, o para contener unos empujes de tierras, áridos, aguas, etc., o para cubrir y cerrar un espacio, o para establecer un piso de edificación o de puente; aparte, claro está, de las estructuras auxiliares encargadas solamente de soportar otros elementos. Y cualquiera de esos tres grupos puede servir de fértil campo de ideas y comentarios.

El muro de contención es un elemento que se presta bien a analizar cómo un mismo problema puede resolverse con varios tipos de estructura totalmente diferentes; si bien, en general, las propiedades y condiciones, propias de cada material y de cada elemento estructural, conducen a soluciones específicas que, con pequeñas variantes, responden al perfecto acoplamiento de las características del tipo con las necesidades del problema.

El muro de fábrica, sea piedra, ladrillo u hormigón, brinda no sólo la solución tradicional de contener unas tierras sobre plano vertical, sino que sigue siendo la solución óptima en la mayoría de los casos. Porque, en definitiva, de lo que se trata es de establecer una superficie continua sobre la que actúa un empuje horizontal E (fig. XI. 1a) que ha de transmitirse al cimiento. La reacción horizontal H , de éste, establece, con el empuje E , un par que sólo puede resistirse mediante una de estas tres cosas: un peso P que, con la correspondiente reacción vertical del terreno, proporciona un par estabilizante alrededor del posible eje de vuelco; otra fuerza horizontal H' más alta que el cimiento (b); un empotramiento M en la base (c). Y éstas son, esencialmente, las tres únicas soluciones que se han desarrollado.



Para la primera, se observa que los elementos estabilizantes son el peso del muro y el brazo entre la vertical de este peso (baricentro del macizo) y el eje de vuelco. Interesa, pues, siempre que se pueda aumentar el brazo para poder reducir el peso y el volumen del macizo; y la forma apropiada de realizarlo, con materiales frangibles (no resistentes a tracción), es dar talud al muro o proveerle de contrafuertes exteriores siempre que el cimiento lo permita (fig. XI. 1d). El muro de contrafuertes no es más que un muro más ancho, en el que se ha suprimido, en parte, la zona de macizo próxima al eje de vuelco, cuyo poder estabilizante quedaría mal aprovechado por falta de brazo.

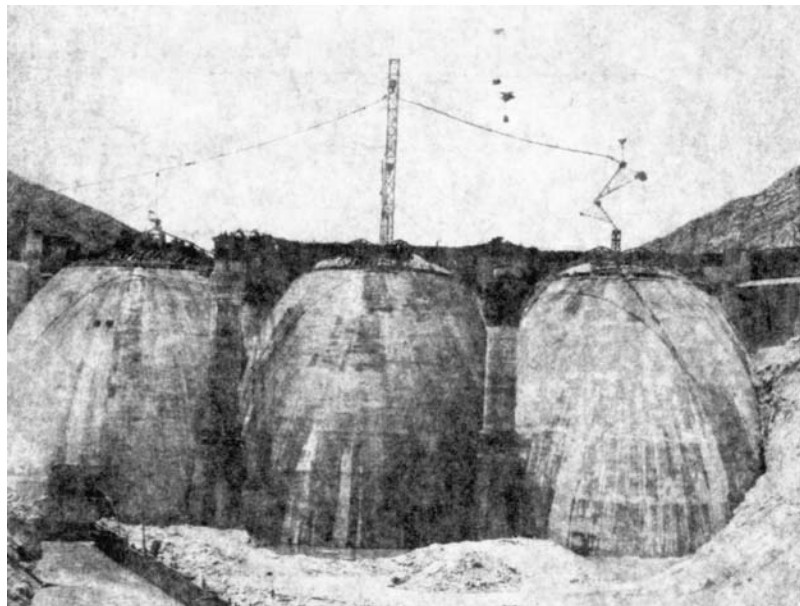
Por el camino de los aligeramientos, sólo pueden hacerse dos cosas más: o aligerar el contrafuerte, convirtiéndolo en un arbotante, o separar los contrafuertes; y, entonces, abovedar el muro (fig. XI. 1e), entre ellos, para suprimir la flexión, e, inclusive, establecer cúpulas bicóncavas como en la presa de Coolidge (fig. XI. 2). Se llega así a la gran presa de contrafuertes y bóvedas múltiples, donde estos principios se han llevado al máximo aprovechamiento.

El establecimiento de arbotantes, al concentrar su empuje sobre el muro, se presenta como solución indicada, solamente si los empujes activos son también concentrados; tal sucede cuando se trata de soportar bóvedas por arista.

Por otra parte, la posición del eje de vuelco depende mucho de la resistencia y rigidez del terreno de cimentación. Al iniciarse el giro, toda la carga tiende a concentrarse sobre la arista; y, si el terreno es blando, cede plásticamente al llegar a una cierta carga, haciendo retroceder el eje de vuelco (fig. XI. 1a). Por consiguiente, la zapata, con berma hacia el exterior, se impone, no sólo por el efecto directo de repartir las cargas sobre el terreno, sino, también, por el indirecto de avanzar el posible eje de giro, aumentando, con ello, el brazo estabilizante, y permitiendo aligerar el muro.

Aparte de todo esto, no puede olvidarse que no es solamente el conjunto del muro el que debe ser estable, sino cada una de sus partes; y ello define los espesores y pesos en todo lo alto del muro.

Los empujes y la función de contención son diferentes, y ello puede alterar totalmente el tipo de solución. Así, por ejemplo, para un dique rompeolas, que, en cierto modo, es también una forma de contención, puede utilizarse el muro macizo de grandes bloques. Pero en general, es más económica la solución de escollera (fig. XI. 1f); porque, en este caso, no importa que el agua se filtre a través de él; no se requiere ni conviene establecer un desnivel, como en el caso de la presa. Lo único que se requiere es que el peso de cada bloque sea capaz de mantener su inmovilidad bajo



XI-2. Presa acapulada de Coolidge. Ingeniero H. C. Neuffer.

el empuje de la ola, en cada altura, y que los huecos entre bloque y bloque sirvan para absorber y amortiguar la energía de aquélla.

Porque la mejor solución de un problema puede consistir en suprimirlo. Un talud estable del terreno evita totalmente los empujes y la necesidad de su contención, si el ancho que ese talud ocupa es aceptable. Y del mismo modo, si, en el dique, lo único que se trata es de amortiguar la energía de las olas evitando el resistirlas y detenerlas de golpe, no hay por qué complicar el problema y encarecer la solución con nuevas imposiciones. El portero de un equipo de fútbol hace frente a la pelota solamente cuando va dirigida a la meta; pero, en caso contrario, la deja pasar. Y las mismas olas, que atacan con furia los acantilados y acaban por vencerlos, mueren suavemente ante las menudas arenas de una playa tendida.

Si, en definitiva, lo que se trata de reducir es el par volcador, esto puede alcanzarse no sólo disminuyendo el empuje, sino también disminuyendo su brazo; y esto último puede lograrse inclinando el paramento para inclinar igualmente el empuje. Cuando éste alcance la base del contrafuerte, el par habrá desaparecido. Tal sucedería (fig. XI. 1g) en una presa, cuyo paramento de aguas arriba se inclinase suficientemente; la necesidad del peso estabilizante desaparece entonces totalmente. Ahora bien, como siempre existe un peso, necesario para construir la pantalla y el contrafuerte, es preferible aprovechar el par estabilizante, que producen estos pesos, y reducir el talud al justamente necesario para asegurar la estabilidad. Así queda impuesto el talud de las grandes presas de contrafuertes. El tipo no es, pues, un casual descubrimiento del genio intuitivo; es la consecuencia lógica a la que se llega, infaliblemente, por el simple estudio estático y económico del problema.

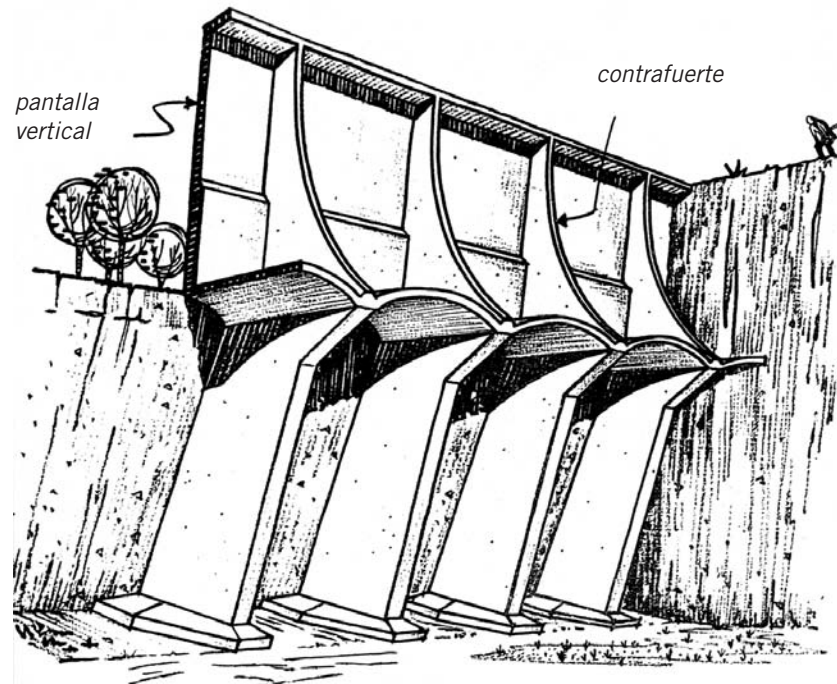
En todo valle ancho, la presa maciza de gravedad o la de contrafuertes, con perfil triangular, es la solución lógica y casi ineludible. Razones económicas, constructivas u otras, producidas por las características de la cimentación, decidirán después entre una y otra; porque si la de contrafuertes reduce el volumen, no cabe duda que, en ella, el precio del metro cúbico de material es mayor; y las tensiones en el contrafuerte y en el terreno, bajo él, pueden llegar a ser tan altas que el aligeramiento sea prácticamente improcedente y, en fin, si aún el perfil continuo requiere un ancho excesivo en la base, para evitar cargas que el terreno sería incapaz de resistir, la presa de tierra (fig. XI. 1h) se impone; porque, sólo con un material tan barato como ella, se pueden construir económicamente esos volúmenes; y, porque, para lograr la impermeabilidad, basta una delgada pantalla cuya estabilidad queda asegurada por el macizo de tierras.

Con materiales traccio-resistentes, son ya posible otros tipos estructurales. Con ellos, cabe establecer una ménsula –mientras la altura no sea demasiado fuerte–, empotrada en su base sobre una zapata (fig. XI. 1i); y cabe, igualmente, que el contrafuerte, capaz de trabajar en tracción, vaya por el lado del relleno (fig. XI. 1j).

La ventaja principal, de esta última disposición, es la de permitir aprovechar, como peso estabilizante, el de las propias tierras que cargan sobre la zapata o placa inferior en la que se ancla el contrafuerte. La verdadera zapata de cimentación es la parte delantera o berma exterior de ésta; mientras la parte trasera es una placa, encargada solamente de soportar la acción vertical del peso de las tierras y transmitírsela al contrafuerte para equilibrarle.

En este tipo, y aun pudiendo hacerse el material resistente a tracción, interesa, como siempre que ello es posible, sustituir la flexión de la losa por la simple compresión de la bóveda; pues, de este modo, se ahorra acero en las armaduras. La estructura del muro de la figura (fig. XI. 3) es un ejemplo de esta disposición, llevada al límite de aprovechamiento de todos los elementos para asegurar la estabilidad del conjunto. Se trataba de establecer un paramento vertical de contención de tierras en 11,50 metros de altura, sobre un relleno de otros 12,00 metros de espesor sobre el firme. La estructura de contención es la clásica que acaba de justificarse; bajo ella, los machos de cimentación se continúan en desplome para asegurar que la resultante, sobre el terreno, no se salga de la base de sustentación. Claro está que, en todos estos casos de bóvedas sucesivas, es necesario que las últimas puedan quedar bien estribadas. Pueden sustituirse, también, las pantallas verticales por bóvedas; y, si en el caso citado no se hizo así, fue porque razones arquitectónicas exigían el plano para el plaqueado posterior en piedra.

En todos estos casos, en los que la estabilidad del par de vuelco se logra con un par de fuerzas verticales —peso y reacción vertical del terreno—, es necesario asegurar, igualmente, el equilibrio de las componentes horizontales, y comprobar que la cimentación es capaz de provocar la reacción correspondiente, bien sea por el rozamiento que el peso ejerce sobre el plano de contacto con el terreno, bien por el empuje pasivo que pueden resistir las tierras por delante de la cimentación. El olvidarlo ha dado lugar a que muchos muros hayan roto filas y perdido la alineación, con todos los peligros consiguientes.



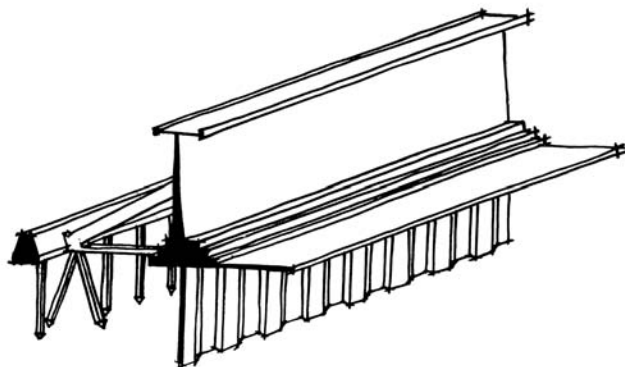
XI-3. Muro de contención de Cantarranas, en Madrid. Ingeniero E. Torroja.

Parece que, siendo principal y casi exclusivamente empujes horizontales los que plantean el problema de la estructura, es un tanto raro –y poco lógico– empeñarse en equilibrarlos por pares de fuerzas verticales y por una reacción horizontal en la base. Esto sólo será aconsejable con materiales de gran peso específico y bajo coste.

Para equilibrar la estructura mediante otro par de fuerzas horizontales, se requiere poder establecer un cierto desnivel o brazo vertical entre ellas; es lo que se hace en la solución (fig. XI. 1c). La dificultad estriba únicamente en la forma de poder transmitir esta reacción, en esa dirección, al propio terreno. La cosa es fácil, y se utiliza siempre que se trata de dos muros paralelos próximos, como sucede con los muros de un sótano (fig. XI. 1k), sobre todo si funcionalmente se requiere un piso o elemento horizontal. En caso contrario, puede establecerse un peso muerto de anclaje, fuera del prisma de rotura de las tierras (fig. XI. 1b), o hincar dos pilotes inclinados que, por composición de sus reacciones axiales, permitan dar la resultante deseada. Una pantalla de tablestacas hincadas en el terreno, por ejemplo, se puede adaptar bien a ese tipo de solución.

Pero, las tres soluciones primeramente propuestas, con ser las que aparecen lógicamente en un primer juego de fuerzas, no son, ni con mucho, las únicas que pueden idearse. En cuanto entran otras conveniencias funcionales o, en cuanto las condiciones básicas varían, el número de soluciones y variantes posibles se multiplica. Así, por ejemplo, si no se trata solamente de establecer una pantalla vertical contra el agua, sino que, al mismo tiempo, hay que evitar el paso del agua por el propio terreno permeable de la cimentación –como es el caso del muro de la figura XI. 4 que ha de recintar una dársena sobre arena–, el proyectista se encuentra con la necesidad de hincar una tablestaca de impermeabilización; y puede utilizarla para completar y asegurar la estabilidad del muro cuyos empujes van, a través de un arbotante y unos pilotes inclinados, a hundirse en el terreno. Para evitar los inconvenientes de la rigidez longitudinal de la pantalla e impedir su fisuración, se cortan, en planta, los contrafuertes, dando lugar, así, a una especie de junta de dilatación, dentro de la cual las presiones del agua comprimen la placa, disminuyendo las tracciones que la flexión produce en ella.

Y, en fin, si de lo que se trata es de contener un terraplén, sin ninguna otra razón funcional que exija el muro continuo de fábrica, lo primero que debe analizarse es lo

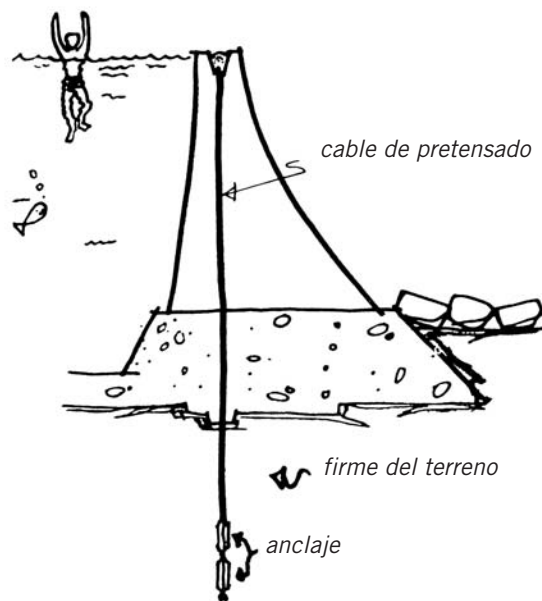


XI-4. Pantalla metálica.

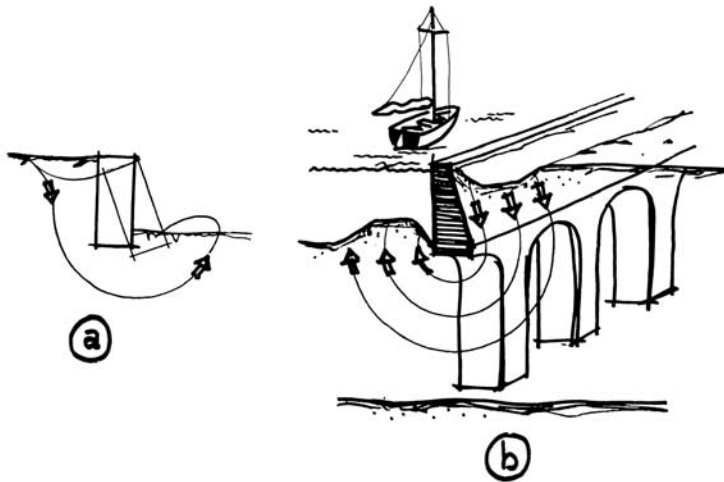
que les falta a esas tierras para sostenerse; y tratar de proporcionales solamente eso que les falta. Supóngase, para simplificar las cosas, que se trata de un relleno con gravas o arenas. Estos áridos tienen una buena resistencia a compresión y ninguna a tracción; tienen un alto coeficiente de rozamiento interno y, en cambio, carecen totalmente de cohesión. La inyección de un conglomerante resuelve teóricamente el caso; pero, en general, no es económico con los medios y materiales de inyección de que hoy dispone la técnica. El árido, gracias a su rozamiento, es capaz de mantener, por sí solo, un cierto talud; por encima de él, rompe porque el peso del prisma de rotura vence el rozamiento sobre un cierto plano o superficie de deslizamiento (fig. XI. 11). Como en toda rotura por deslizamiento, la forma de evitarla es establecer un cosido de ese plano que resista las tracciones de esfuerzo cortante correspondientes. Igual que sucedía con el hormigón armado, bastaría disponer los oportunos estribos o barras inclinadas con un anclaje en el propio terreno fuera del prisma de rotura; anclaje que puede ser sustituido por el simple rozamiento en suficiente longitud, o por otro medio. Este sistema de contención ha sido utilizado, efectivamente, con éxito y economía en muchos casos.

El terreno, como se dijo en otro capítulo, ha de considerarse como un material de construcción; y cuando con él hay que habérselas, es lógico tratar de utilizarle en provecho propio para darle la vuelta al problema y eliminarlo o reducirlo. Tal sucede dándole el talud que pide para quedarse estable; un simple revestimiento para evitar, en caso necesario, la erosión externa atmosférica —o la interna de las aguas que lo atraviesen y busquen su salida por el talud—, resuelve entonces la cuestión con el mínimo gasto.

Aunque sólo sea accidentalmente, no puede silenciarse aquí otro tipo, totalmente diferente, de aprovechamiento del terreno como elemento resistente, y de contrarresto, ideado por Coyne en la genial presa de Grands-Cheurfas (fig. XI. 5). A embalse



XI-5. Presa de Grands-Cheurfas. Ingeniero A. Coyne.



llo, la línea de presiones no sólo se salía del tercio central, sino que caía fuera de la base. Toda solución, consistente en aumentar el perfil de la presa, resultaba costosa y poco satisfactoria. En vista de ello, Coyne introdujo unos cables verticales en el cuerpo de la presa, los cuales, una vez anclados a suficiente profundidad en una potente capa de margas compactas, fueron puestos en carga, mediante la acción de gatos instalados en la coronación. La idea puede interesar económicamente en muchos otros casos de presas de gravedad de mediana altura.

Volviendo a los casos corrientes de contención de terrenos de poca cohesión, y a la influencia de sus características propias en el tipo estructural resistente, no hay que olvidar, en fin, en estos casos, que el mismo terreno es el que produce la acción y la reacción. La estructura no es más que un elemento intermedio, dentro del proceso general de transmisión y equilibrio de fuerzas y reacción. Independientemente de ella, el corte y el desnivel, que se establezcan en el terreno, pueden dar lugar a la rotura de éste, por deslizamiento según un círculo pésimo exterior a la obra; y hundimientos, como los del muro de puerto de Argel —que tanto impresionaron e intrigaron a los ingenieros europeos de hace algunos decenios— (fig. XI. 6a), son ejemplo típico de este peligro.

Aun puede suceder, también, que rellenos blandos, contenidos por el muro horizontalmente, deslicen verticalmente para sifonar por debajo de él (fig. XI. 6b); la perfección y firmeza de la obra sólo sirve, en este caso, para acusar el error básico funcional de la solución, cuya finalidad no era precisamente la de que ella se estuviese quieta, sino que lo estuviesen las tierras, en lugar de tener que reponerlas continuamente con la misma pertinaz insistencia con que ciertos deportistas se empeñan en meter el balón en un cesto sin fondo, del que, naturalmente, vuelve a caer en seguida.

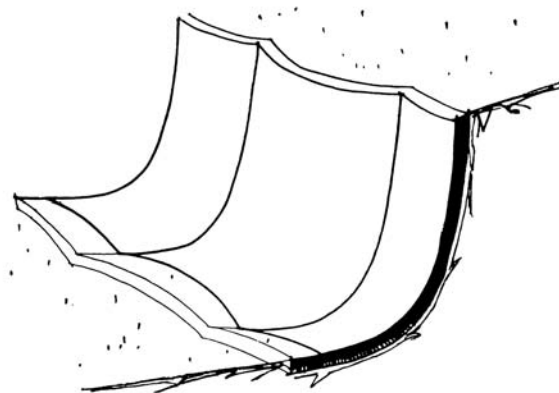
Por eso, las condiciones del muro varían según se trate de un relleno o de un terreno natural, casi siempre más cohesivo. En éste, es preferible establecer el muro directamente contra el terreno, asegurando lo mejor posible la unión entre ambos elementos, sin disturbar el equilibrio de éste. En muchos de estos casos, el muro puede reducirse grandemente, dándole el oportuno perfil curvo que pide la estabilidad del

terreno, y proporcionándole rigidez gracias a una doble curvatura como se indica en la figura XI. 7. De este modo, el volumen de obra se reduce al mínimo; los nervios de rigidez y la pantalla se funden en un mismo elemento, y la adherencia del hormigón con el terreno, que se puede completar con un cosido mediante barras clavadas en éste, permite aprovechar, al máximo, la cohesión del terreno. El hiperboloide se amolda bien a este tipo de superficie; sus generatrices rectas facilitan el maestrado de la excavación y el encofrado exterior; y hasta puede suprimirse este último, dado que el espesor del revestimiento puede ser de unos centímetros solamente.

Todas las consideraciones anteriores se referían a muros continuos de gran longitud respecto a su altura. El problema cambia completamente cuando esta condición no se cumple. Si se trata, por ejemplo, de establecer una presa en un valle estrecho, la bóveda es preferible a la solución de viga o ménsula vertical (fig. XI. 8), porque elimina las tracciones. Claro está que la bóveda, requiere un doble estribo capaz de soportar sus empujes; pero, mientras esto exista, y la luz de la bóveda no sea varias veces superior a la altura de la ménsula, la preferencia por aquélla es obligada.

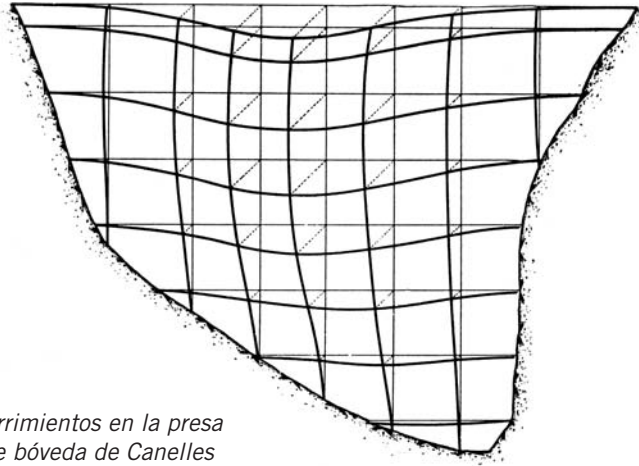
Pero, el interés de aprovechar simultáneamente todas las posibles formas de trabajo resistente de un mismo elemento, hace que, aun en la presa bóveda, el trabajo, como ménsula o muro equilibrado por peso propio, sea rara vez despreciable. La forma, más o menos, en V de los valles, con menos anchura abajo, donde las presiones son mayores, induce mecánicamente a disminuir los radios de los anillos horizontales hacia el fondo; y, al mismo tiempo, a curvar la sección vertical, dándole concavidad hacia aguas abajo para mejor aprovechar el efecto estabilizante del peso (fig. XI. 8).

La consideración de esta doble forma de trabajo complica evidentemente el cálculo y la búsqueda de los perfiles óptimos. Porque, como ya se comentó oportunamente, el estado tensional va unido a uno deformativo, del que no puede independizarse; y toda superposición de formas de trabajo, en un mismo elemento, se traduce en un hiperestatismo, aun cuando cada una de ellas sea capaz de establecer el equilibrio, que sería isostático si no existiese la otra. Al menos teóricamente, la presa podría construirse por una serie de ménsulas verticales independientes; pero, al soldarse y fundirse unos elementos con otros, el trabajo, que cada cual acepte, dependerá de todos



XI-7. Muro de contención de doble curvatura.

*laboratorio central para ensayos
de materiales de construcción*



*corrimientos en la presa
de bóveda de Canelles*

XI-8. Corrimientos en la presa de bóveda de Canelles.

los demás, y será necesario establecer correcciones en la forma estructural, hasta encontrar la solución óptima en la que, con el mínimo volumen, se eviten, en todo punto, sobretensiones peligrosas. Así, por ejemplo, se tiende modernamente a reducir la curvatura de los anillos, allí donde la rigidez debida al efecto ménsula es mayor; y aumentarla, donde la elasticidad de la ménsula es más grande, respecto a la del arco, con lo que descarga, sobre éste, mayor proporción de la presión hidrostática. Pero, estos refinamientos, son ya tan complejos y atañen a casos tan especiales que se salen del campo de esta obra. Baste, pues, señalar el interés que tiene el aprovechar, en cada elemento, los diferentes fenómenos resistentes de que es capaz, la importancia de la economía que, así, puede obtenerse, y la influencia que todo ello ejerce en la morfología de la estructura, que puede llegar a repercutir en la elección del propio material; pues —aunque nada se haya hecho, hasta la fecha, en este sentido—, cabe el que el hormigón postensado interese, con ciertas formas de presa, para evitar económicamente las tracciones que llevaría aparejadas la presa al hacerse de simple hormigón en masa.

Quizá, para aclarar el tema con un caso más corriente y sencillo, convenga citar el tipo de trabajo y deformación de la pared de un depósito de agua cilíndrico; o de un silo, cuyas paredes se empotran normalmente en la placa de fondo (fig. XI. 9). En realidad, es un caso particular —el más sencillo— del general de que acaba de hablarse. Se pretende que la pared trabaje como anillos en tracción por efecto de la presión centrífuga del agua. Pero, estando esta pared empotrada en el fondo, la dilatación radial, en los anillos inferiores, queda impedida o coartada; y se produce una flexión en los elementos verticales, que obliga a reforzar la armadura de repartición vertical e, incluso, el espesor de la pared junto al empotramiento, donde los anillos quedan mal aprovechados. Cuando el diámetro es muy grande respecto a la altura, el trabajo de aquéllos es prácticamente nulo, y se hace necesario dimensionar la pared como una ménsula; la armadura circunferencial pasa entonces a hacer el simple papel de armadura de repartición. Bastará establecer una junta impermeable, entre la pared y

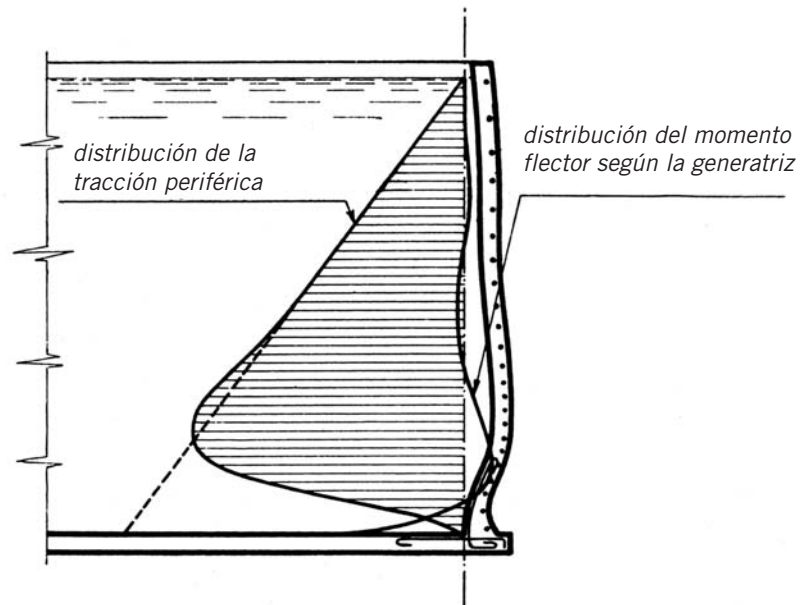
el fondo, para que este fenómeno desaparezca; si bien, en muchos casos, los inconvenientes prácticos de la junta desaconsejan su establecimiento.

Esta cuestión de las juntas de dilatación es importante, y en muros más que en otros elementos, por la gran rigidez que aquéllos presentan en general.

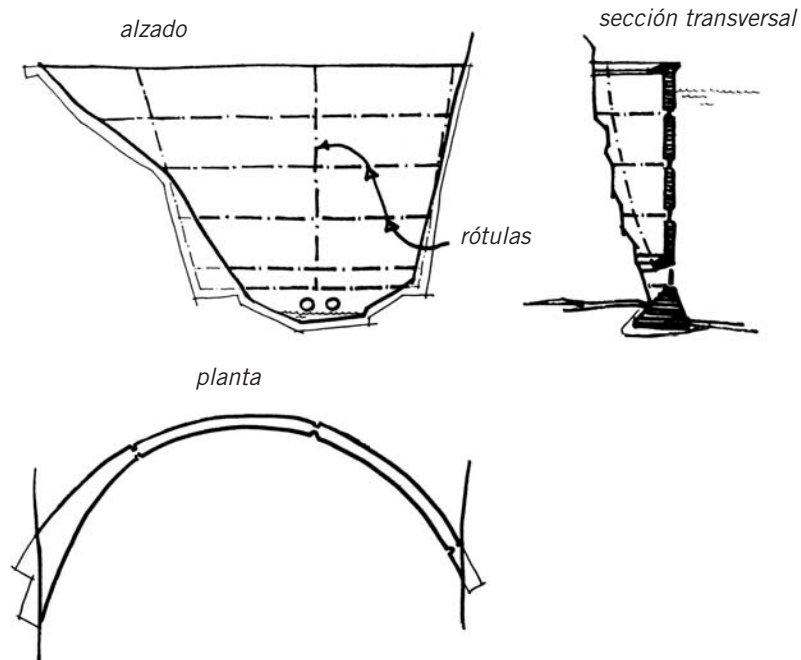
Los grandes planos continuos son siempre propicios a la fisuración; y, si están rígidamente unidos a otros elementos indeformables, como los macizos de cimentación sometidos a condiciones ecológicas diferentes, el peligro de fisuración pasa a convertirse en una previsible seguridad de que se produzca. Un muro de hormigón corrido, a la intemperie y monolítico con su cimentación enterrada, acusa, al cabo de pocos meses, grietas verticales —bien apreciables cada cuatro o seis metros—, producidas por las desigualdades de retracción y de deformación higroscópica. La sola diferencia de temperatura y de humedad, entre la pared vista y la que queda en contacto con el relleno, es causa suficiente de agrietamientos que perjudican y alteran su comportamiento resistente y afean su superficie.

Análogamente, la deformación elástica, por carga, produce grietas de torsión en las esquinas del recinto formado por el muro perimetral de cualquier depósito rectangular.

Es necesario, por consiguiente, dejar juntas verticales que, por lo menos, supriman el efecto antiestético y, por otra parte, aseguren al proyectista cuál va a ser la forma real de trabajo de cada elemento y cuál su contorno. Las juntas pueden hacerse machihembradas, de forma que permitan los movimientos de los elementos contiguos en su plano y los impidan en dirección normal a ese plano; o bien, pueden adoptarse otros tipos de junta. En él los contrafuertes son en forma de T, formando la cabeza con los elementos de pantalla contiguos al nervio; y la parte central de ésta apoya a media madera, dejando las armaduras pasantes. La escasa distancia, entre



XI-9. Deformación de la pared de un depósito.



XI-10. Proyecto de presa para el Llauset. Ingeniero E. Torroja.

junta y junta, hace que el movimiento de cada una de éstas sea muy pequeño y acepte bien esta disposición.

En los muros curvos, en bóveda, el peligro es menor; pero aún así, se presenta especialmente entre los anillos inferiores y el cimiento. En la pequeña presa-bóveda de la figura XI. 10 se requería, por su ubicación y condiciones locales, reducir al mínimo el volumen del muro. Para evitar el peligro de que ahora se trata, se proyectó la presa de arcos triarticulados con articulaciones plásticas; y, en la parte inferior, se dispuso una pantalla de poca altura, articulada arriba y abajo y suficientemente delgada para aceptar la torsión que le impone el movimiento de giro relativo entre su línea de articulación superior y la inferior. Es un caso especial y extremo, pero, que demuestra bien la importancia que tiene el oportuno establecimiento de juntas, tanto de retracción o dilatación como las de giro producido, bien por estas causas, o bien por las propias deformaciones elásticas bajo el efecto de las sobrecargas.

La cubierta y el cerramiento

La envoltura de un edificio o de un espacio cualquiera se suele formar de dos elementos diferenciados; el cerramiento y la cubierta; vertical el primero, por conveniencias funcionales y facilidades constructivas, y horizontal o inclinado el segundo para facilitar el desagüe.

La cubierta requiere una superficie continua; y si su estructura se separa del material de cobertura, es por la dificultad o el coste que lleva consigo el establecer esa superficie impermeable con los materiales resistentes y estructurales de que ha ido disponiendo el constructor en las distintas épocas.

Solamente el hormigón armado y, en todo caso, el ladrillo enfoscado, permiten alcanzar, con el propio elemento estructural, la impermeabilidad necesaria; y aun así, en general, es necesario recubrir esa superficie con telas asfálticas o materiales análogos para evitar la entrada del agua por las posibles fisuras, tan corrientes en estas superficies. Con el acero, las superficies de palastro resultan demasiado costosas; y, con la madera, es necesario solapar las tablas unas sobre otras, con lo que requieren otro elemento sustentante debajo. Por otra parte, tanto el acero como la madera, resisten mal la intemperie. La piedra presenta la dificultad de impermeabilización de las juntas entre sillares o mampuestos, y muchas veces se le ha sobrepuesto la verdadera cubierta, como hacían los constructores góticos (fig. XII. 1) a pesar del valor funcionalista que muchos autores dan hoy a ese estilo.

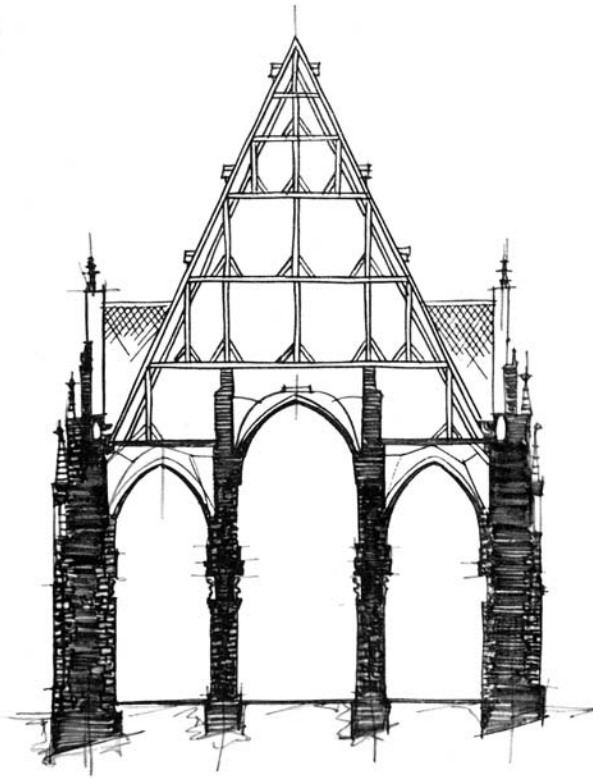
Como siempre que se trata de cubrir una luz, aparecen dos soluciones: el arco-bóveda con su variante de cúpula trabajando en compresión, y la viga en flexión. En cualquier de los dos casos, la solución puede ser diferente según se trate de naves rectangulares alargadas, o con planta de lados parecidos.

En el primer caso, la solución elemental es la bóveda en cañón; y, como todo abovedamiento; lleva consigo unos empujes, el camino más directo de llevarlos al terreno es fundir la cubierta con el cerramiento y llevar los arranques de aquélla a los cimientos. Siendo las sobrecargas relativamente pequeñas, interesa aligerar la bóveda, reduciendo todo lo posible su espesor para disminuir los esfuerzos que son debidos, en su mayor parte, al peso propio.

En cuanto la luz es un poco grande, esta reducción de espesor se encuentra limitada por el peligro de pandeo o por las flexiones introducidas por las sobrecargas accidentales de viento o de nieve. La lámina-bóveda requiere, pues, aumentar su momento de inercia, y aparece la típica sucesión de formas, de la figura XII. 2, que el hormigón armado ha desarrollado hasta el límite, y que interesa comentar.

Primero aparece el forjado rigidizado por nervios o arcos perpieños; al aumentar más la flexión, se requiere aumentar las cabezas, y se ocurre la sección en cajón para obtener rigidez y resistencia a la flexión en los dos sentidos; pero, no requiriéndose

XII-1. Sección de la Catedral de Viena.

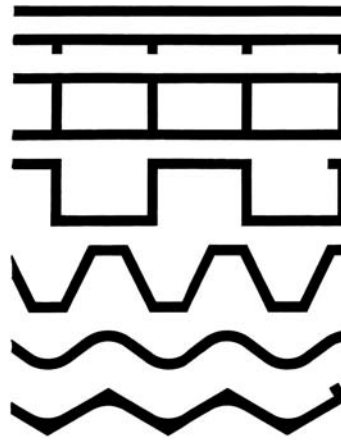


la totalidad de las cabezas a cada lado, se alterna ésta entre cada dos nervios, y queda la sección en greca rectangular que ahorra material y permite un más fácil desencofrado si se trata de hormigón; y, por último, la greca trapecial o sinusoidal que favorece, aún más, el desencofrado, y disminuye el desarrollo de la superficie total.

Es la solución consagrada por Freyssinet en el hangar de dirigibles de Orly (fig. XII. 3), con la que se satisfacían simultáneamente todas las condiciones, funcional, resistente, constructiva, económica e incluso estética, aunque, en este último punto, el gusto de cada cual se permitiese sus críticas.

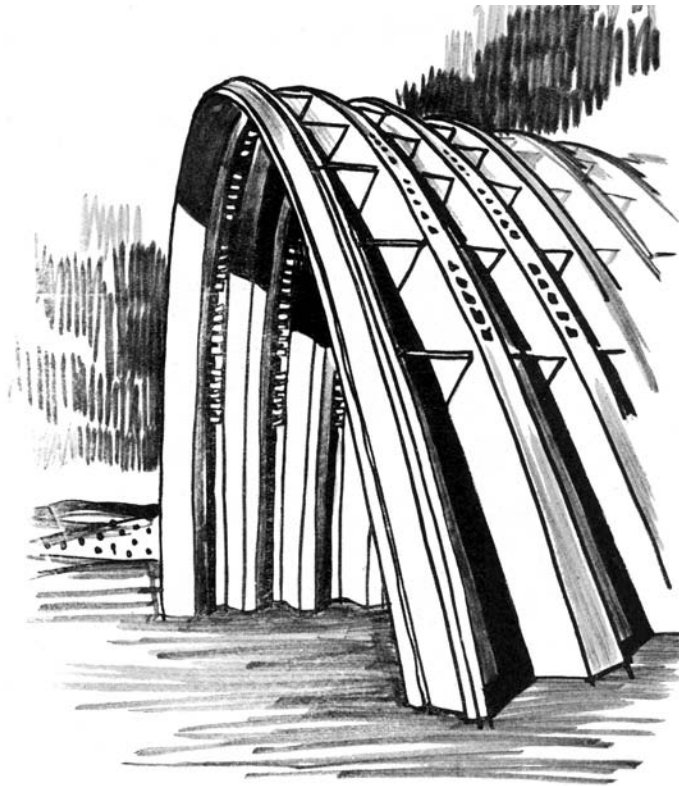
Que la directriz sea una u otra, o que la sección sea diferente, puede aportar ventajas, según sea el caso; pero el tipo estructural es fundamentalmente el mismo. La solución de bóvedas bicóncavas adyacentes (fig. VIII. 6) puede satisfacer más a la vista del espectador que interpreta la estructura como unas bóvedas apoyando en arcos formeros. Ese fenómeno resistente puede ser cierto construyendo los arcos metálicos o de hormigón armado, con momento de inercia suficiente para soportar todas las cargas y sus desigualdades; y montando sobre ellos las bovedillas transversales como elemento secundario. Aun así, sabiendo que las tensiones no pueden desligarse de las deformaciones que llevan consigo, se comprende que los arcos no pueden deformarse sin arrastrar las bovedillas en su deformación; y que éstas, por consiguiente, tienden a funcionar con los arcos formeros como un arco conjunto de mayor rigidez. Para evitarlo, sería necesario dejar juntas en las bovedillas, perpendiculares a los arcos.

XII-2. Secciones tipo de láminas.



Por eso, la bóveda toral cóncavo-convexa (fig. XII. 4) es igualmente resistente y puede ofrecer ventajas constructivas, al ser hormigonada sobre una lona que hace de encofrado y que cuelga de cerchas provisionales situadas según los aristones.

Por el contrario, si se quiere que la cubierta deje lucernarios transversales –como es corriente para dar iluminación norte–, se puede dar, a cada lóbulo, forma asimétrica de conoide o de hiperboloide. Esta última forma tiene, sobre el conoide, la ventaja de dar mayor rigidez o momento de inercia a la sección por efecto de la doble curvatura. La solución es tan racional y funcional resistentemente que resultó, en el caso particular de la



XII-3. Hangar de dirigibles de Orly.



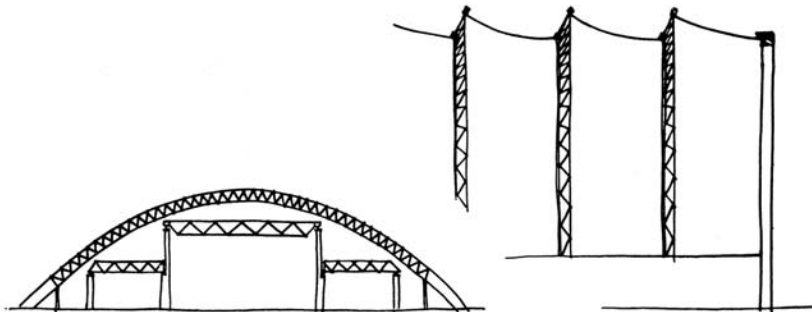
XII-4. Bóvedas de doble curvatura. Ingeniero K. Billig. Fotografía: M. García Moya.

figura XII. 5, más económica que la de subdividir la luz en tres, aprovechando los soportes de los puentes grúas existentes.

Pero, el llevar las formas abovedadas hasta el suelo no permite, en general, un total aprovechamiento de la planta; y el muro vertical se presenta frecuentemente como una exigencia funcional y quizá también estética.

En ese caso, es necesario contrarrestar el empuje de la bóveda sobre la cabeza del muro; y, para ello, se ofrecen dos soluciones: establecer tirantes a la altura de arranques, o dar al muro la estabilidad que necesita proveyéndolo de contrafuerte, o descomponiéndolo en el elemento vertical de cierre y en arbotantes independientes.

El tirante es siempre feo. Es difícil explicar por qué; pero, es un hecho que todo elemento, que corta la diáfania del espacio bajo la bóveda, se considera desagradable estéticamente. Los constructores góticos se sentían orgullosamente satisfechos cuando podían contemplar, en el interior de sus catedrales, las formas cóncavas y diáfanas de sus bóvedas, aunque para ello hubiesen de esconder, tras los dibujos de sus vidrieras, los elementos de contrarresto necesarios para sostener esas bóvedas interiormente aparentes. Y se complacían en dejar visto al exterior el esqueleto de arbotantes,



XII-5. Proyecto de nave industrial de 70 m de luz. Ingeniero E. Torroja.

XII-6. Catedral de Sevilla.
De «Hist. Arq. Cristiana».
Fotografía: Cubiles.



contrafuertes y botareles (fig. XII. 6) que equilibran las bóvedas, a su vez ocultas del exterior por glabets y cresterías; y sobre los que solamente aparecían los planos en pendiente de una cubierta sobrepuesta al de las pesadas bóvedas interiores. En realidad, esos planos de la verdadera cubierta, con su secreta armadura de madera, no hubiesen requerido más que unos ligeros contrafuertes, en los muros calados, para dar estabilidad al conjunto. Es algo así como un organismo al que se le hubiese vuelto del revés, dejando el esqueleto exterior y los encantos de la epidermis al interior. Porque era ese interior el elemento funcional que merecía todos los desvelos de la sociedad que lo creó; y dentro de ese espacio, que con expresionismo de honda raíz simbólica se alargaba hacia las alturas, todo tirante o todo elemento que cortase, en su paso, la vista hacia lo alto, era considerado como un pecado funcional y un malhadado signo de mecánica impotencia material.

Pero, sin ir tan lejos, en el comentario de las razones estéticas que se opongan al tirante —y que quedan ahora fuera de lugar—, es el caso que las formas abovedadas no satisfacen plenamente cuando aparece éste para equilibrarlas; y la única forma de establecer el tirante, sin cruzar el espacio interior, es convertir la bóveda en cúpula para que el tirante rodee el perímetro de la superficie cubierta. La misma cantidad de hierro se requiere, teóricamente, para contrarrestar una cúpula con tirantes radiales que con uno de contorno; pero, la ventaja de diafanidad, que ofrece esta segunda solución sobre la primera, es indudable.

El tirante exento presenta, por otra parte, el inconveniente de sus posibles alargamientos o acortamientos, distintos de los de la bóveda o cúpula que contrarresta, por las diferencias térmicas entre uno y otro elemento; embutido en la propia masa de la cúpula, este inconveniente desaparece o se reduce fuertemente. Y en fin, si se somete el tirante a un postesado, permite, como ya se comentó anteriormente, asegurar su eficacia, independizando su trabajo de la deformación elástica que tome la lámina bajo la acción de su peso propio, y permitiendo reducir mucho las flexiones secundarias

de la cúpula por efecto de borde. Cubiertas acupuladas como las del Mercado de Algeciras (fig. VIII. 15), o la de la iglesia de San Félix de Zurich (fig. VIII. 16), con tirantes postesados, son ejemplo de la eficacia del tipo estructural que ha permitido reducir los espesores de las cúpulas a pocos centímetros.

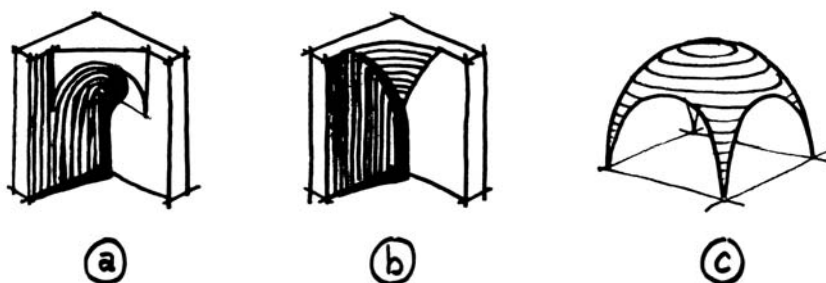
Volviendo a la cubierta cilíndrica, y queriendo prescindir de los tirantes, los empujes de la bóveda han de resistirse en compresión por elementos exteriores a la planta; y la solución resulta tanto más enojosa y costosa, cuanto más elevada y cuanto más acostada sobre la horizontal es la reacción, es decir, cuanto mayor es su componente horizontal, o empuje. Interesa, pues, reducir este empuje, inclinarlo y concentrarlo sobre puntos en los que pueda darse al contrafuerte, o elemento equivalente de contrarresto, la mayor rigidez y anchura posible en la dirección del empuje.

Puede decirse que el arte arquitectónico se concentró durante siglos en la resolución de este problema; y especialmente el gótico es pródigo en muros contrarrestados por soberbios arbotantes, estabilizados, a su vez, por botareles, para resistir los empujes de las bóvedas por arista que se apuntan para no forzar demasiado las elegantes dimensiones de todos los elementos sustentantes. E, inclusive, encontró alojamiento para las capillas laterales en el propio espesor del contrafuerte, dando al muro la misma sección, en greca, propuesta anteriormente para elementos sometidos a flexión. Porque, esas mismas secciones son aplicables al muro, con la particularidad de poder disminuir su canto hacia arriba hasta acabar en una recta de coronación donde la flexión es nula.

La planta en cruz permite, no sólo el desarrollo de bóvedas de diferentes tipos en las naves longitudinales y transversales, sino también el establecimiento de una cúpula central que concentre sus empujes sobre los muros de las naves que salen radialmente de aquélla.

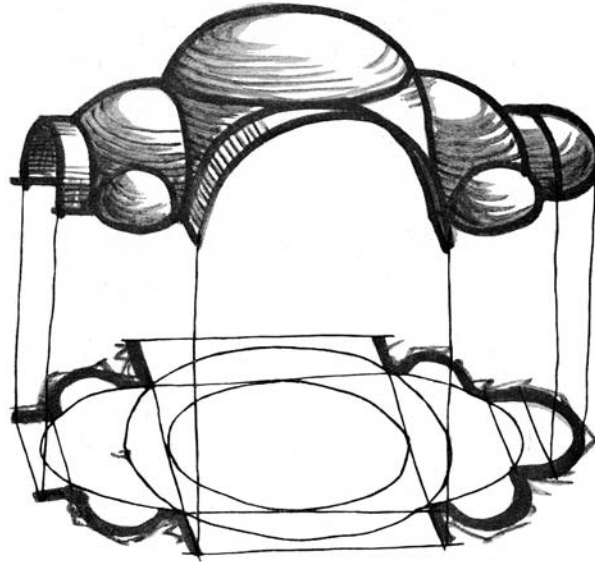
Aparece entonces el problema de la cúpula sobre planta cuadrada, apoyada en las cuatro esquinas, que ofrece rigidez y resistencia sobrada para lanzar sobre ellas los empujes. El casquete de la cúpula insiste sobre los cuatro arcos en que terminan las bóvedas radiales, y la línea de apoyo se completa con trompas (fig. XII. 7a) o pechinas (b) para dar apoyo continuo a la cúpula circular u octogonal; o bien, todos esos elementos se funden en uno solo para formar la cúpula vaída (c), cuyas formas óptimas están aún por estudiar.

En el desarrollo de estos tipos, los constructores bizantinos llegaron a soluciones tan complejas y completas como la de Santa Sofía (fig. XII. 8), en la que el casquete



XII-7. Trompas y pechinas.

XII-8. Cúpulas de Santa Sofía.



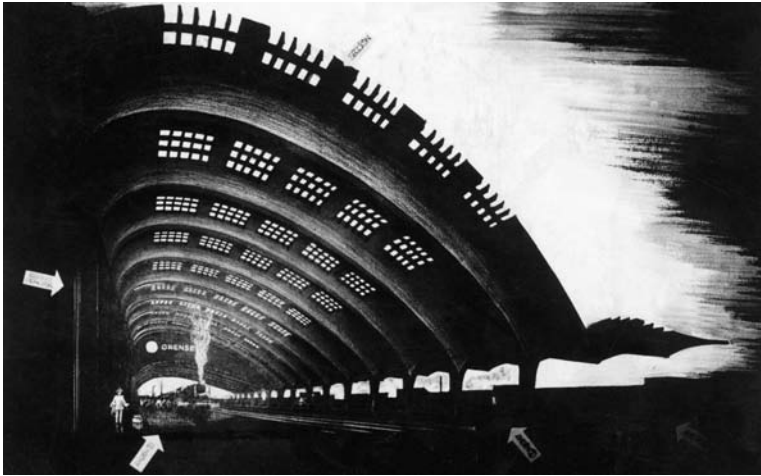
central transmite sus empujes, por todo el contorno, a través de un aro de pilastras inclinadas en la dirección de las reacciones para ir a difundirse en las bóvedas de cañón, o en las media naranjas colaterales, y morir en los muros que las sostienen.

Esta solución presenta, ya, otra novedad tensional: la de aprovechar la rigidez longitudinal de las bóvedas cilíndricas; los empujes corren sobre su superficie, según una red de isostáticas superpuesta al fenómeno de compresión y de flexión secundaria propios de la bóveda.

Este aprovechamiento, de los posibles estados tensionales en los planos tangentes a la bóveda cilíndrica, es el que actúa como fenómeno resistente primario en las láminas cilíndricas comentadas en un capítulo anterior. Con ellas, la cubierta lógica, de una nave rectangular alargada, ya no es la bóveda en cañón longitudinal, sino la serie de lóbulos cilíndricos dispuestos transversalmente uno al lado del otro. En consecuencia, los empujes de la bóveda desaparecen y el elemento fundamental de la cubierta pasa a ser un elemento trabajando fundamentalmente en flexión, en el que las vigas y las bovedillas se han fundido en un solo elemento.

En el caso de la figura XII. 9 –en el que se pedía, por razones funcionales y estéticas, una forma abovedada disimétrica que no diese empujes sobre la cornisa de la fachada existente–, se proyectaron unas vigas curvas, apoyadas en esa cornisa, y en una fila de soportes, y contrapesadas, en parte por su prolongación en voladizo. La directriz curva de estas vigas y su sección transversal abovedada dan la sensación de bóvedas; pero, en realidad, no son más que unas vigas con el alma desdoblada en dos superficies curvadas como las alas de una gaviota. Es exactamente el mismo tipo estructural, aunque con distinta forma de los voladizos, de la figura VIII. 4.

Es la fusión de diferentes elementos estructurales en uno solo que absorbe distintos fenómenos tensionales, primarios y secundarios, y que se ha comentado antes como tendencia propia del hormigón armado; tendencia que éste puede satisfacer gracias a

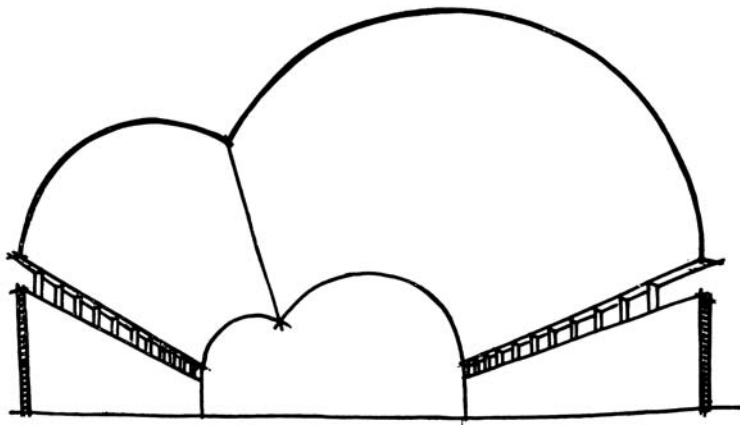


XII-9. Proyecto de cubierta de estación de ferrocarril. Ingeniero E. Torroja.

la constitución adecuo-resistente que le ofrecen sus armaduras y su fácil variabilidad de espesores.

Cabe también naturalmente, cubrir la nave con un lóbulo longitudinal que, manteniendo la forma aparente de una bóveda en cañón, apoye fundamentalmente en los muros transversales extremos; y quede, bien con sus falsos arranques al aire sin necesidad de apoyo en los muros longitudinales, bien buscando en éstos un apoyo suplementario. Como este último puede ser, ahora, sin componente horizontal, el muro se aligera mucho. Así, por ejemplo, la lámina del Frontón Recoletos, formada (fig. XII. 10) por dos lóbulos longitudinales desiguales, salvaba los 55 metros de longitud de la sala, cargando principalmente sobre los muros de fondo, y sólo muy ligeramente sobre los laterales. La forma y orientación de los lóbulos venía impuesta por razones funcionales de iluminación en relación con la utilización de la planta.

Fuera de estos casos extremos, el engarce de varias láminas abovedadas permite las mismas soluciones clásicas de la piedra –bóvedas por arista, en rincón de claustro, de lunetos, etc.– con más libertad y posibilidades todavía que la misma piedra. Buenos ejemplos de ello son las cubiertas de la Iglesia de S. Engelberto, en Colonia (fig.



XII-10. Frontón Recoletos, en Madrid.

XII-10. Frontón Recoletos, en Madrid. Arquitecto S. Zuazo. Ingeniero E. Torroja. Fotografía: Castellanos.

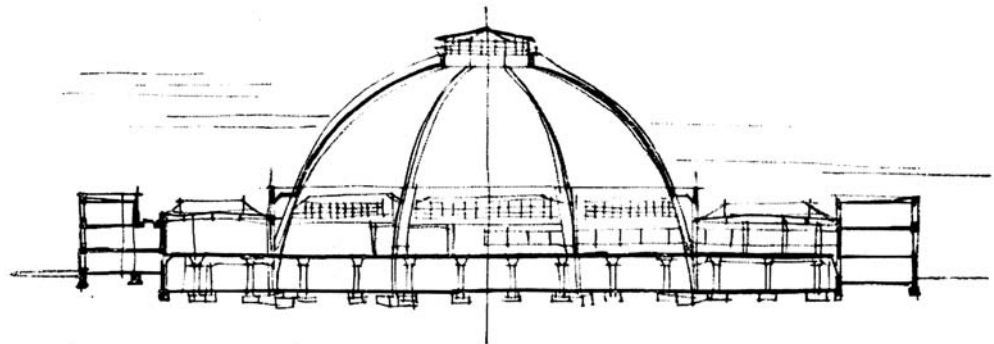


VIII. 7), en la que las fachadas rigidizan las bóvedas; o la del mercado de Basilea (fig. XII. 11), en el que, con ligeras modificaciones, hubieran podido suprimirse los arcos aristones exteriores, e incluso las vigas de descarga, dejando trabajar el faldón de la lámina, de soporte a soporte. Evidentemente, en toda cúpula sobre apoyos aislados, las cargas se concentran sobre ellos y, en sus proximidades, la compresión exige aumentar el espesor de la bóveda o reforzarlo con nervios aparentes; pero, en hormigón armado, esto se puede lograr, con igual o más eficacia y menos coste, aumentando el espesor de la lámina en las proximidades de los soportes, como se hizo en Algeciras (fig. VIII. 15).

Otro grupo de soluciones nada despreciables, especialmente por su relativa facilidad de encofrado, es el de las llamadas estructuras poliédricas o plegadas, porque sus pequeños modelos se han hecho frecuentemente dando a una hoja de papel los oportunos dobleces o pliegues (fig. XII. 20).

El alma vertical de una viga puede descomponerse en dos inclinadas, con la cabeza inferior común formando una viga díptera. Sus cabezas superiores podrían pandear con

XII-11. Mercado de Basilea. Arquitectos Gönner y Rhyner. Ingenieros Riggerlch y Eger.



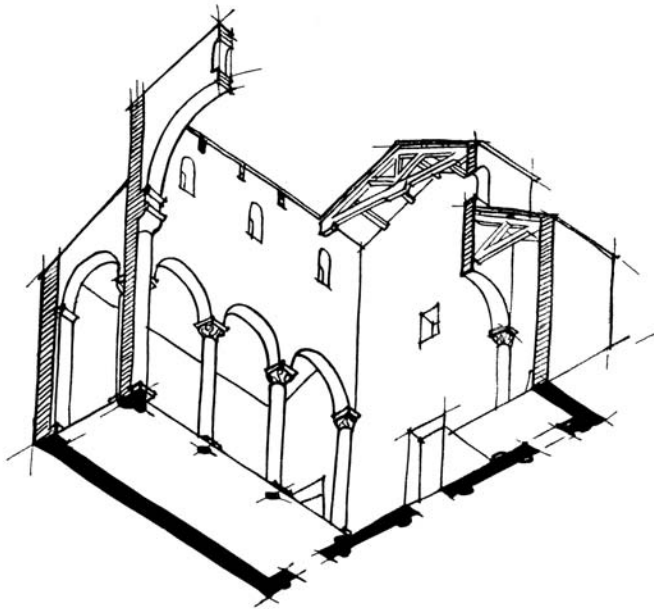
facilidad; pero una sucesión de vigas dípteras, que dos a dos junten o fundan sus cabezas contiguas, puede evidentemente servir para cubrir un vano rectangular por sí sola, sin necesidad de forjado entre éstas. Los esfuerzos en las cabezas no se alteran por esta disposición, y los cortantes se pueden considerar descompuestos vectorialmente sobre las dos almas.

Y del mismo modo que, a fuerza de ingenio y de dobleces, se puede convertir una hoja de papel en una pajarita o en una rana, se pueden también encontrar multitud de soluciones de estructuras plegadas, que sirven, no sólo para formar la cubierta, sino también las paredes de cierre verticales o inclinadas.

En realidad se trata de una estructura laminar en la que las flexiones, debidas a las componentes del peso normales a cada placa, se superponen a las tensiones de membrana o lámina que forma el conjunto. Un punto delicado en ellas es el de la transmisión de esfuerzos en los dobleces y más aún en los trifinios de placas contiguas, que se encuentran en ellos con orientaciones diferentes.

De todos modos, si los anchos de las placas que forman el conjunto no son demasiado grandes, los espesores pueden ser tan reducidos como en una lámina curva. Y si las pendientes no pasan de los 35°, el hormigonado puede resultar igualmente económico.

La tendencia, que se aprecia en estos últimos tiempos, al empleo de cubiertas delgadas para cubrir grandes espacios, ha dado lugar a algunos ejemplos como los señalados al final del capítulo VIII. Estas soluciones, en hormigón pretensado, ofrecen un aspecto totalmente nuevo; y, si bien requieren mayor superficie envolvente a igualdad de volumen envuelto, también permiten una mayor capacidad de ventanales verticales en fachadas, lo que, en ciertos casos particulares, puede ser una ventaja.



XII-12. Basílica de S. Miniato, Florencia. Según Choisy.

La sala de Kalsruhe (fig. VIII. 18) es una láminas con fuerte armadura pretensada para llevar las cargas al borde. Por su lado, el Estadio de Raleigh (fig. X. 12) es una malla-tesa con material de cobertura sobrepuesto.

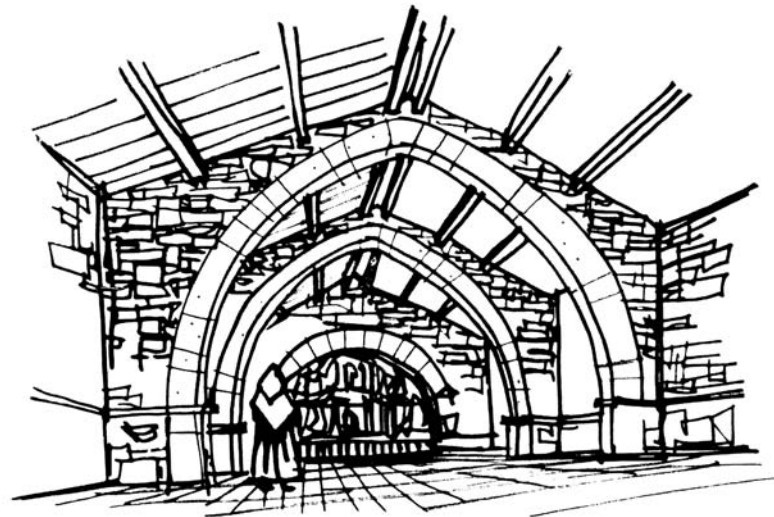
Es un caso típico de cómo las condiciones de los nuevos materiales pueden cambiar totalmente –y en estos casos verdaderamente invertir– las soluciones clásicas. Aun cuando, como siempre, se pueden encontrar precedentes antiquísimos en las viviendas de ciertos pueblos nómadas –como, por ejemplo, la jaimía marroquí–, lo cierto es que el campo, abierto hoy a las mallas-tesas, es de los más vastos, vírgenes y atractivos para la fantasía del proyectista.

Conviene distinguir entre las formadas por una sola malla elemental sin discontinuidades o bordes interiores, y las construidas por conjuntos de éstas enlazadas entre sí.

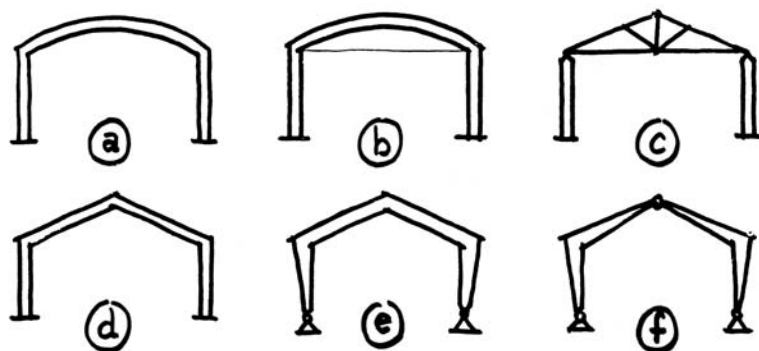
Porque, puede decirse que siempre la malla elemental determina una superficie cóncavo-convexa, de las que la forma más simple y representativa es, quizá, el paraboloides hiperbólico. Por consiguiente, sobre un contorno determinado en planta, impone, en general, una curva alabeada en el espacio, con fachadas de altura mayor que en centro de la cubierta por una zonas y más bajas por otras.

Pero, además, el contorno no es prácticamente libre tampoco en planta. Porque, si no se sigue el funicular de las reacciones de los cables, quedará sometido forzosamente a fuertes flexiones costosas de resistir y que darían al traste con la economía que pretenden ofrecer estas mallas. Es necesario estudiar con cuidado el problema conjunto de la forma del contorno y la forma de la superficie que depende, tanto de aquél como de las tensiones previas que se den a los diferentes cables, las cuales, a su vez, determinan la forma de la superficie y el funicular de borde.

Si se trata de hacer el contorno en compresión, suele proyectarse insistiendo sobre los soportes de fachada y siguiendo una línea cóncava hacia el interior y, naturalmente, cerrada. El conjunto puede tomar, como en el estadio de Raleigh (fig. X. 12), la forma de una entalamadura o sector de ella.



XII-13. Santa María de Noya.



Pero puede también anclarse la malla elemental a un contorno en tracción. En este caso, y perdiendo nuevamente algo de rigidez, puede formarse también el borde por un cable tesado, sujeto por puntos a los oportunos soportes, con la economía consiguiente.

El contorno entonces aparece como estrellado, constituido por arcos convexos hacia el interior; y dando fuerzas centrípedas concentradas en los vértices. Ello obliga corrientemente a completar el soporte con otro cable inclinado y anclado al suelo para soportar la componente horizontal y lograr que sólo el soporte trabaje en compresión; y lo haga, a su vez, sin flexión.

Los tendales, así formados, permiten el máximo aprovechamiento del trabajo en tracción simple; pero, como se comprende, las condiciones que a la forma del contorno impone este tipo estructural son máximas.

Es en la combinación de varias mallas elementales, donde puede encontrarse el mayor caudal de soluciones; es decir, en el establecimiento de bordes interiores entre malla y malla elementales. Estos bordes o aristas internas pueden, a su vez, ser en compresión, o estar formados también por relingas en tracción, dando, con ello, lugar a cubiertas en pabellón o en multitud de otras formas, las más de las cuales continúan todavía sin haber sido utilizadas.

En el mismo grupo podría, quizás, incluirse la sala de EE.UU. en la exposición internacional de Bruselas. El anillo central colgaba de los cables sustentantes radiales que bajaban desde el borde exterior hasta el borde inferior del aro central; mientras los rigidizantes subían del borde exterior al superior del anillo central y sostenían el material de cobertura, formado allí de placas transparentes de plástico.

En grupo aparte deben considerarse los escasos ejemplos de mallas de curvatura positiva en las que la rigidez final se obtienen gracias al peso muerto del hormigón, que, en forma de placas prefabricadas, insiste sobre la malla para formar, una vez rejuntadas, la superficie continua de la cubierta. En realidad se trata aquí de una estructura simplemente colgada. El ejemplo de Montevideo (fig. XVI. 12) puede considerarse único, y las condiciones del desagüe son especialmente las que limitan su uso en casos muy especiales.

Se ha tratado hasta aquí, en este Capítulo, exclusivamente de naves sin soportes intermedios. Evidentemente, si las exigencias funcionales del problema no lo impiden, la colocación de soportes interiores, sobre los que carguen las bóvedas contrarrestando naturalmente sus empujes, permitirá reducir éstos y aligerar los elementos externos

de contrarresto de las últimas bóvedas al disminuir la luz libre de los vanos. El número y las dimensiones de éstos habrán de fijarse en cada caso particular, no sólo por razones tensionales, sino de otro orden: condiciones de la cimentación, peticiones de desagüe e iluminación, exigencias constructivas, estéticas, etc.; y no pudiendo comentar todos los casos, poco puede decirse, sobre ello, con caracteres de generalidad.

Más fundamental es el cambio que introduce la disociación del conjunto de la cubierta en sus dos elementos: el de cobertura, propiamente dicho, y el resistente o estructural que lo sostiene. Esta diferenciación se hace ineludible con la madera, y más especialmente con el acero, ya que su empleo, en superficies continuas de chapa, resulta, en general, prohibitivamente antieconómico. Ciertamente que se emplea para depósitos, en formas acupuladas de simple chapa con rigidizadores, pero es por razones demasiado particulares de este tipo de construcción.

Las cubiertas de tipo vegetal que cubren las chozas de muchos pueblos aborígenes, la arcilla apisonada sobre tablas o troncos de madera y, en fin, la pizarra o la teja de solape, que se sigue empleando con éxito en muchas construcciones, requieren un entramado resistente para establecerse; y le imponen unas determinadas condiciones, como por ejemplo, el establecimiento de correas horizontales a una cierta separación o el de un entablado continuo sobre parejuelos inclinados, próximos entre sí. Las chapas onduladas, de metal o de fibro-cemento, permiten suprimir el entablado y aumentar la separación de correas. Pero, estos materiales de cobertura suelen esconderse vergonzosamente tras un falso pretil, sin atreverse a aceptar la comparación con los clásicos.

Su comentario queda aquí, fuera de asunto, y, por ello, y aunque sólo de pasada, conviene recordar lo que la humanidad ha gozado de ese sencillo y genial invento, que es la teja acanalada o troncocónica, que antiquísimos alfareros moldearon, sobre sus muslos, para que sirviese luego, de cobijo, durante siglos, a la familia humana, mientras el rojo, que le dio el fuego, cobraba tradición y vida bajo los líquenes que la doran con acogedores matices. Al menos para los viejos mediterráneos, para quienes la vivienda tenía todavía valores de familiar continuidad tradicional, la casa no hubiese sido lo que era, sin ese manto de las tejas abrigando el fuego del hogar.

Pero, aquí sólo se trata de estructuras, y es forzoso ceñirse a ellas; cualquiera que sea el material de cobertura, necesita, debajo, un entramado resistente que ha de ajustarse a los planos de las vertientes.

El tipo consagrado por los constructores clásicos, y en el que más típicamente se desarrollan todos sus elementos, es la basílica romana (fig. XII. 12).

Su cubierta a dos aguas está formada, estructuralmente, por un entablado sobre correas horizontales sostenidas por cerchas transversales, cuyo desarrollo, como vigas trianguladas, fue justificado anteriormente.

En definitiva, no son más que vigas aisladas que aprovechan la forma, que la función les impone, para alcanzar, con su gran canto en el centro, buena rigidez y económica resistencia. Su cabeza de compresión queda fácilmente arriostrada por las correas y elementos de los faldones; y la separación, entre cerchas, queda impuesta por la luz económica de estas correas.

En basílicas de tres naves, era frecuente que las colaterales, más pequeñas, quedasen cubiertas a un solo agua y sostenidas por medias cerchas. Tanto el desagüe como

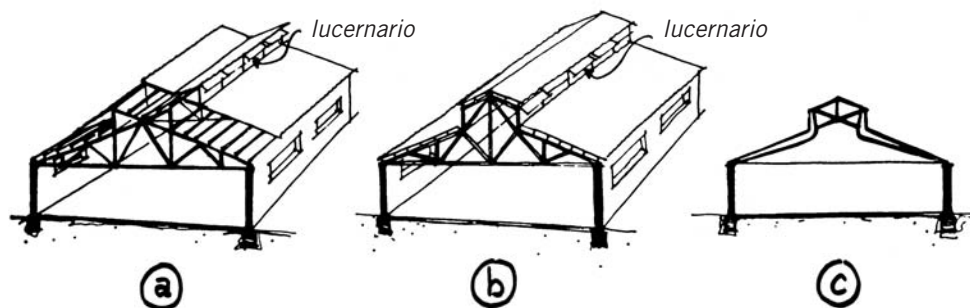
los huecos de iluminación en los muros verticales, dan al conjunto su funcionalismo perfecto. Sin embargo, la estabilidad transversal está confiada solamente a la propia de los muros; y, sobre todo si los centrales, más altos, van aligerados con arcadas sobre columnas, están pidiendo a la propia cubierta un buen arriostramiento, fácil de lograr estableciendo unas triangulaciones en los planos de correas.

Esta rigidización transversal del entramado, que permite llevar los empujes del viento a los muros transversales o de fondo, es interesante, no sólo en este caso, sino con carácter de generalidad, porque permite reutilizar los elementos ya existente para llevar los empujes horizontales al cimiento; y la ventaja es aún mayor si hay elementos —en este caso las cerchas—, que arriostran este nuevo entramado horizontal o inclinado, impidiendo el pandeo total o parcial de sus elementos resistentes.

Sin embargo, no siempre estos entramados de cubierta tienen la rigidez e indeformabilidad necesarias para arriostrar los muros macizos, mucho más indeformables que aquéllos. Quizá por eso, los pre-románicos buscaron la solución, tanto de la rigidez como de la supresión de tirantes y entramados interiores en la sala, sustituyendo las cerchas por arcos de piedra con tímpanos macizos hasta los faldones de cubierta; solución cuya economía mantuvo durante siglos en iglesias rurales (fig. XII. 13).

La forma propia de la cercha a dos aguas, con su canto máximo en el centro y nulo en arranques, apoyado sobre soportes o muros verticales (fig. XII. 18c) forma, con los muros, un sistema biarticulado en el que la viga trabaja en flexión a toda luz; y los muros, no sólo en compresión, sino en flexión bajo la acción del viento, como grandes ménsulas empotradas en el cimiento.

Al primer golpe de vista, se observa que el polígono, formado por dos faldones inclinados y los dos muros verticales, se presta bien a formar un pórtico, que puede ser monolítico, biarticulado en cimientos, o triarticulado en cimientos y clave (fig. XII. 14d, e, f). La idea de biarticularlo a mitad de camino sobre la coronación de soportes, resulta poco lógica y sólo puede estar justificada cuando la altura de los muros sea pequeña y no tengan que sufrir empujes; o bien, cuando el arriostramiento horizontal de cubierta, antedicho, impida el movimiento horizontal de la cabeza de esos muros; o, en fin, cuando la necesidad de establecer un piso o cielo raso a la altura de los arranques de los faldones, induzca a formar, con él y estos faldones, la viga triangulada de gran canto en el centro y nulo en arranques; o mejor, cuando se combinan ambas cosas. Fuera de esos casos, la tendencia al vuelco de los muros obliga



XII-18. Cerchas a dos aguas.

a robustecer sus espesores y encarecer el cimientó; y la solución porticada parece preferible. Pero ello dependerá mucho de las proporciones de la nave en planta y en alzado. Si es alta y la longitud es pequeña respecto al ancho, la rigidización horizontal de la cubierta, arriostrando los muros longitudinales, es económica; y, en cambio, se hace prohibitiva con longitudes excesivas.

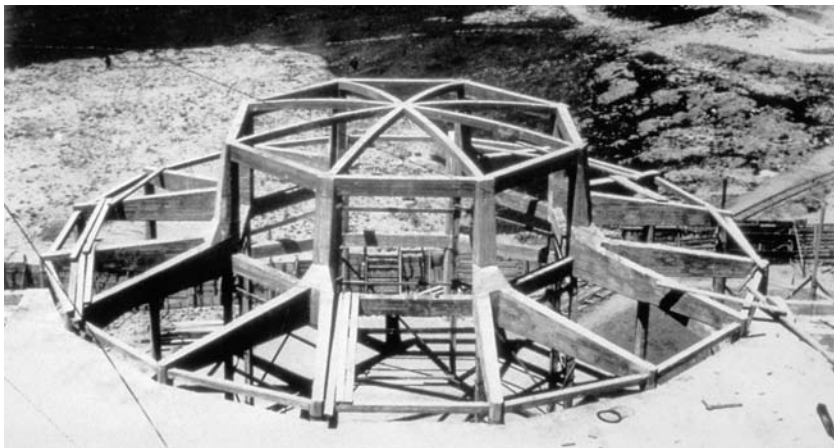
Se ve la imposibilidad de establecer tipos que resulten ventajosos para todos los casos. Cada uno de ellos es un problema particular, en el que el número de variables, que interviene, es muy grande. Cada nuevo dato puede cambiar la solución óptima; tal sucede con la presencia de puentes-grúas u otros elementos. Pero, lo que más corrientemente altera los tipos clásicos antedichos son las necesidades funcionales de iluminación.

Los lucernarios, en el mismo plano de cubierta, no alteran sensiblemente el tipo estructural; y cuando se prefiere establecerlos en planos verticales longitudinales, las disposiciones de la figura XII. 18, entre otras, ofrecen soluciones aceptables y satisfactorias. La misma, figura XII. 18c, se transforma en la de la figura XII. 19 sobre planta octogonal con mayor diafanidad.

Si los lucernarios han de ir orientados transversalmente a la nave y todos en un mismo sentido, se impone la cubierta en diente de sierra (fig. XII. 20), a pesar del inconveniente que siempre ofrecen las limahoyas interiores.

Ya se dijo que –dentro de ciertos límites, claro está– siempre interesa buscar el mayor canto para los elementos principales en flexión; y este principio queda bien utilizado en el caso del diente de sierra, porque permite utilizar los propios lucernarios para alojar las vigas trianguladas que constituyen las jácenas maestras; y, de jácena a jácena, se colocan las vigas que han de sostener las correas.

La latitud del lugar permite, generalmente, una cierta inclinación del plano del lucernario. La jácena queda, entonces, inclinada; y los pesos dan una componente, normal al plano de ésta, que puede, a su vez, absorberse económicamente triangulando los planos de faldones que constituyen, así, otras vigas de gran canto y poco coste.

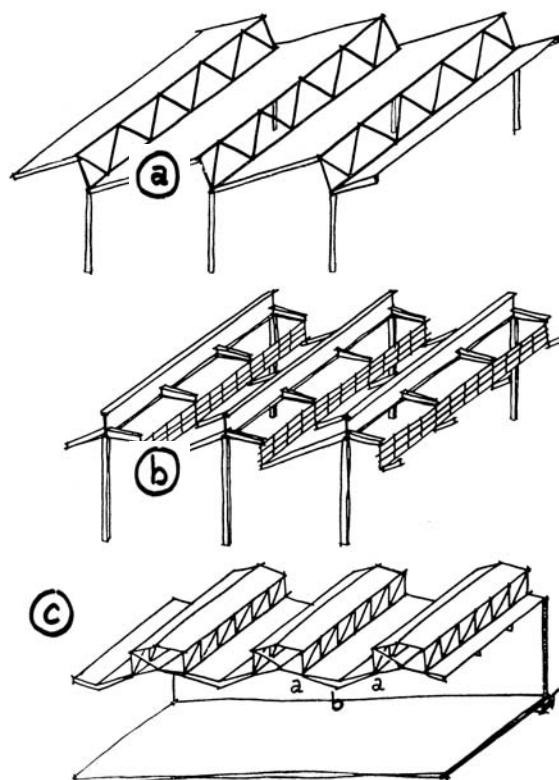


XII-19 Cubierta para quirófano apoyando solamente en un anillo exterior de soportes. Madrid. Arquitecto M. S. Arcas. Ingeniero E. Torroja.

En este tipo de estructura, la separación entre jácenas viene limitada por la conveniencia funcional de obtener una repartición de luz suficientemente uniforme, y por la conveniencia económica de reducir el vano de las cerchas o vigas entre dos lucernarios consecutivos. Por otro lado, de no dar mucha pendiente a los faldones, es necesario no aproximar excesivamente las jácenas, porque éstas quedarían de demasiada poca altura.

A los efectos de la iluminación, las diagonales de la jácena restan poco a la superficie útil del lucernario; pero, para algunos, resultan poco estéticas, y prefieren una viga Vierendeel por una extraña vivencia que les hace preferir las ventanas rectangulares. La solución es discutible, por cuanto resulta más costosa, y la mayor anchura de montantes y cabezas tapa más superficie que las diagonales ligeras.

Por ello, en algún caso, se ha preferido colocar la jácena por encima del lucernario, haciéndola de alma llena (fig. XII. 20b). Unos simples tirantes, ocultos en los montantes de los vidrios, cuelgan los otros extremos del faldón contiguo; y todo el espacio, bajo los planos de cubierta, queda diáfano y libre de cerchas y tirantes. Ahora bien, de hacerlo así, ya no hay razón para que estas jácenas coincidan con los planos de lucernarios. Es preferible colocarlas allí donde permitan una máxima reducción de las flexiones en las viguetas. Es la solución representada en la figura XII. 20b, que no presenta más inconvenientes que el de dejar las cerchas por encima de los planos



XII-20. Cubierta en diente de sierra.

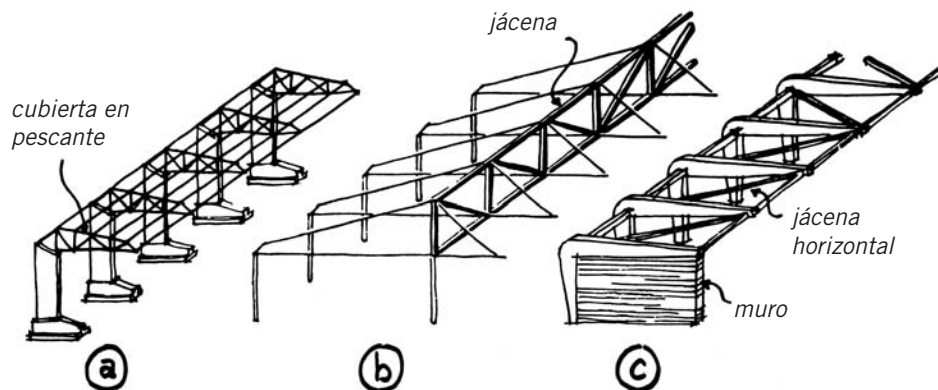
de cubierta, y el mal efecto que a muchos les produce el que los soportes vayan a coger la cubierta por cumbrera, dejando oculto el dintel. Efectivamente, con ello, la longitud y, por tanto, el peligro de pandeo de los soportes aumenta. Por otra parte, es interesante observar que, en esta solución la estabilidad al vuelco de cada elemento, entre lucernario y lucernario, está confiada a la presencia de los contiguos. Si los tirantes de un lucernario se rompieran, todo el conjunto se caería; lo que constituye un defecto grave para casos anormales, como los de bombardeos que tan exuberantemente brinda el actual progreso técnico. También es verdad que la eficaz intensidad de los que se prevén, ahorra al constructor estas pequeñas preocupaciones por uno u otro tipo de estructura; lo que siempre es de agradecer.

Análogas consideraciones podrían hacerse para el caso en que se desee dejar lucernarios con dos orientaciones opuestas, normalmente, a la longitud de la nave. Las jácenas piden alojarse, lógicamente, en los planos verticales de lucernario y quedan arriostradas por las barras, entre dos lucernarios (fig. XII. 20c). Los faldones cuelgan equilibradamente de ellos; su flexión es la debida solamente al ancho (a b) de un faldón; a este esfuerzo se superpone la pequeña tracción, debida al efecto de formar ambas alineaciones una cadena colgada (a, b, a). Basta triangular los dos faldones extremos de la nave, para que contrarresten los empujes que produce este efecto de cadena, y el conjunto puede resultar muy ligero y económico.

El problema cambia completamente cuando los soportes o el muro han de desaparecer, por razones funcionales, en uno de los lados largos del rectángulo, como sucede, por ejemplo, en el caso de hangares de aviación. Éste es un problema en el que las proporciones entre una y otra dimensión puede alterar totalmente el tipo de solución conveniente.

El sistema de cerchas transversales pierde su fundamento al faltar uno de sus apoyos; y es necesario, o bien sustituirlas por ménsulas empotradas en el otro muro o fila de soportes (fig. XII. 21a), o bien establecer una jácena longitudinal para soportar las cerchas (fig. XII. 21b) y llevar sus cargas a los muros extremos.

Las elección depende de la longitud de elementos en flexión que se requiera para llevar cada carga al cimiento, y del canto de que pueda disponerse para esos elementos; pues, en general, es preferible reunir los esfuerzos en unos pocos elementos de fuerte rigidez, mejor que en varios más ligeros.



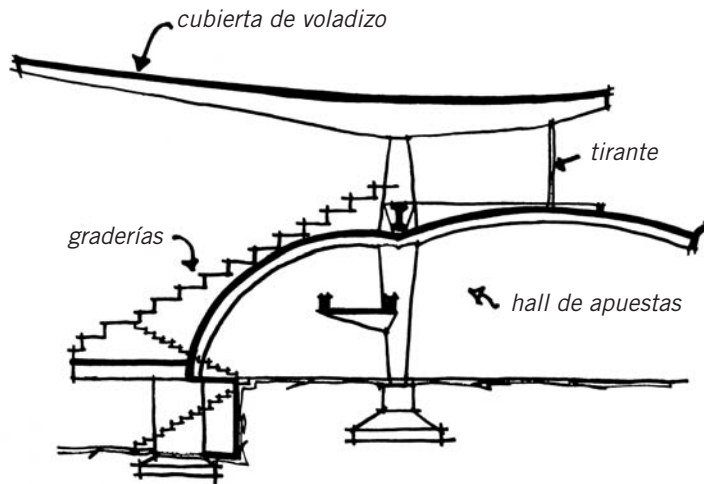
XII-21. Cubiertas en voladizo.

Por consiguiente, si el ancho de la nave es pequeño frente a la longitud, será preferible ir a la solución de ménsulas transversales en prolongación de los soportes empotrados en el suelo (a). Por el contrario, esta solución resulta demasiado costosa en cuanto el vuelo es un poco grande, porque se requieren fuertes secciones, no sólo en los soportes, sino en las ménsulas de los cimientos necesarios para equilibrar la estructura; hay casos, sin embargo, que no admiten otra solución.

Lógicamente, las ménsulas serán metálicas para aligerar todo lo posible el peso y la flexión, mientras que los soportes –y desde luego los cimientos– pueden resultar más económicos en hormigón, ya que su peso no es volcador, sino en todo caso estabilizante. La evidente conveniencia de dar un gran canto a estos soportes induce a establecer o a aprovechar otra nave lateral, o a combinar estos elementos y sus esfuerzos con los de otra estructura, como en la cubierta del Hipódromo de Madrid (fig. XII. 22). En ella, el voladizo de 12,60 metros, sobre las tribunas, se ancla y contrapeza con la cubierta, también en voladizo de la sala de apuestas inferior, quedando el conjunto arriostrado por los arcos sustentantes del graderío, a modo de arbotantes; pero, esto se sale ya del tema que se trata ahora.



XII-22. Hipódromo de Madrid. Arquitectos L. Domínguez y C. Arniches. Ingeniero E. Torroja. Fotografía: S. v. Kaskel.

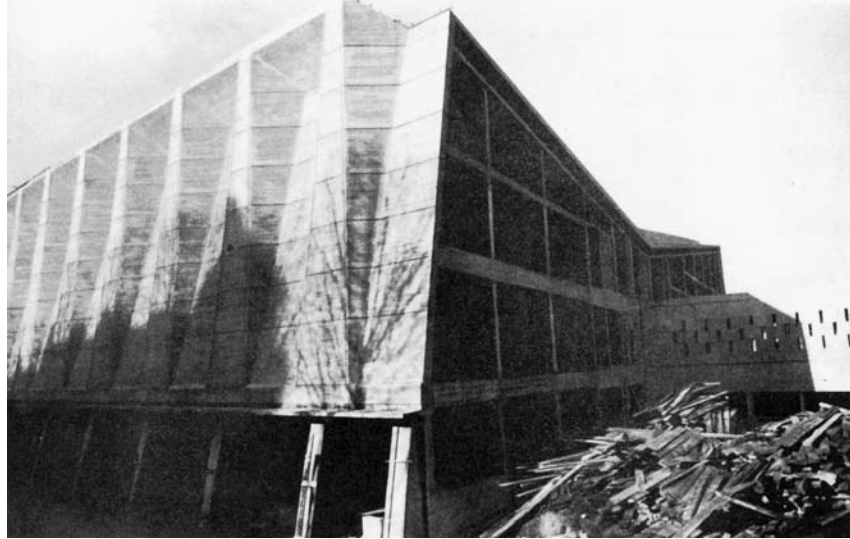


Cuando no hay muros transversales que cierren la superficie cubierta, como es el caso de la que acaba de citarse, la solución de ménsulas es obligada. Pero, habiendo muros laterales rígidos, puede obtenerse una buena economía, especialmente de cimentación, haciendo que la estructura de cubierta forme una gran viga horizontal (fig. XII. 21c) que impida el movimiento de las cabezas de los soportes. Con ello, no se disminuye la flexión en las cerchas; pero, sí se reduce a lo largo de los soportes y en el cimientó. Tanto, que pueden incluso articularse los soportes en su base sin que, por ello, se pierda la estabilidad del conjunto; pues, el momento volcador queda equilibrado por las reacciones horizontales que ofrecen los muros transversales de los extremos de la nave. La solución, bastante espectacular, puede resultar, así, económica en casos intermedios en los que, ni el acho es suficientemente pequeño para aconsejar la solución de ménsulas independientes, ni tan grande, en relación con la longitud de la nave, que compense el poner una jácena vertical longitudinal como en la solución que se comenta a continuación.

Efectivamente, cuando la planta no es excesivamente alargada, y esta jácena longitudinal puede establecerse con suficiente canto, se impone su utilización. En este caso (fig. XII. 21b), queda por decidir dónde conviene más colocar la jácena. Si se lleva a la línea de fachada —o de puertas del hangar—, resulta que la luz, que han de salvar las cerchas transversales, es máxima, y la reacción sobre la jácena se reduce a la mitad de la carga total de las cerchas (la otra mitad se transmite a los soportes del muro de fondo). A medida que la jácena se separa de la fachada, corriéndose paralelamente a sí misma hacia el interior de la nave, las cargas, sobre ella, aumentan; y si se llevase al centro, soportaría íntegramente el peso de la cubierta, sin que ésta diera ninguna carga sobre el muro. Las flexiones máximas, que sufren las cerchas, disminuyen, por este movimiento, hasta un cierto límite, para volver a aumentar, después, al mismo valor primitivo.

En el caso de la figura XVI. 7, el separar la cercha de la fachada se hizo, no sólo por estas razones, sino también para dar al faldón delantero una pendiente suficientemente fuerte para no detener la nieve, y no muy grande para evitar empujes demasiado

XII-23. Sala de Conferencias de la UNESCO, en París. Arquitectos Marcel Brener y Bernard Zehrffuss. Ingeniero P. L. Nervi. Fotografía: Lucien Hervé.



fuertes por efecto del viento. De este modo, la superficie total de cubierta y muro era mínima, y los frentes, ofrecidos al viento, también; y, al mismo tiempo, la jácena quedaba con un gran canto y bien arriostrada transversalmente (el soporte central era el único que se admitía funcionalmente y no debía quedar a menos de 37 metros del muro longitudinal de fondo).

En este hangar, los empujes horizontales de viento se llevaron al muro de fondo que permitía el establecimiento de jabalcones de hormigón armado. La cubierta apoya, en todo el largo de ese muro, por medio de rodillos que impiden los movimientos transversales de aquélla; pero, dejan libre su dilatación longitudinal. Un anclaje, en el punto medio del muro, es, así, el único punto fijo; y los tres soportes, a plomo de la jácena, están proyectados con suficiente flexibilidad para admitir las dilataciones de cubierta desde aquel punto fijo.

En definitiva, el problema estructural de la cubierta, análogamente al del piso, es el de salvar una luz estableciendo una superficie sobre un vano en dos direcciones; problema que, aquí, viene condicionado por la vertiente exigida por el desagüe y por las condiciones particulares del material de cobertura. El entramado ha de aprovechar, pues, las diferencias de altura, que funcionalmente se imponen, para disponer, con buen canto, los elementos de más importancia; y transmitir, así, las cargas, por flexión, a los elementos de apoyo.

Las condiciones específicas de la nieve y del viento, cuyos empujes varían con las formas y pendientes dadas a los distintos elementos superficiales, así como las exigencias funcionales de alturas y diafanidad interior, acaban de condicionar el problema; y son, todos ellos, los que han de intervenir en el planteamiento y en la selección del conjunto estructural.

XIII

El piso y el edificio

Desde que los hombres se contagiaron de la curiosa manía de amontonarse unos encima de otros, el piso se hizo necesario para multiplicar la superficie útil donde poder alojarse; y, cuando el ascensor ha permitido suprimir la incomodidad de la escalera, el número de pisos superpuestos se ha multiplicado hasta crear el rascacielos con rapidez y facilidad de crecimiento asombrosas.

Ello es perfectamente comprensible; porque sostener un piso encima de otro es, después de todo, un problema sencillo y hasta monótono.

Como siempre, cada material ofrece una solución elemental diferente, que las dimensiones, en planta, vienen luego a modificar y complicar. Pero, en el piso, estas variantes son menos numerosas y diferenciadas que en otros problemas. Con losas, placas, viguetas y cargaderos se compone la inmensa mayoría de los pisos; porque, ni estos elementos permiten grandes variaciones de dimensiones, ni el planteamiento general suele exigirlo.

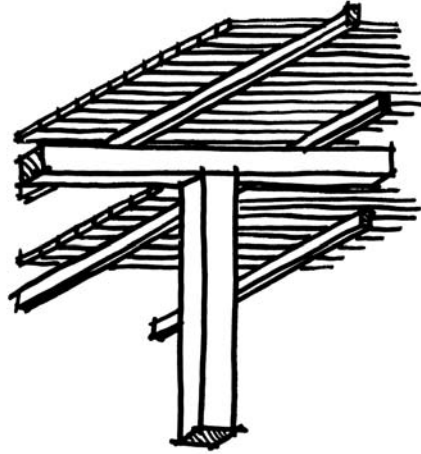
Los pisos de madera de los primeros palafitos debieron estar formados por troncos acostados unos al lado de los otros, insistiendo sobre otros dos atravesados y montados, a su vez, sobre los verticales de soporte, verdaderos pilotes hincados en el terreno. Probablemente, un relleno de arcilla hacia el pavimento; y, si no fue así, pudo serlo.

Al repetir el tipo otros artistas, capaces, ya, de serrar la madera, idearían sacar varias tablas delgadas de un mismo tronco para formar directamente el pavimento; y como éstas, por su escaso canto, no admitían más que pequeñas luces sin flectar demasiado, las apoyarían sobre vigas de madera escuadrada, colocadas de canto —para mejor aprovechar su momento de inercia, decimos hoy—, sobre otras que, más distanciadas, soportarían toda la carga de soporte a soporte (fig. XIII. 1).

Algún propietario grueso y pesado —fruto de los adelantos de su civilización— observaría con disgusto que, al pisar sobre una tabla, ésta flexaba más que las contiguas, sin que éstas viniesen a ayudarla; e inventó el machihembrado para obligarlas a ello. Después de este genial inventor, los pueblos madereros han tenido poca originalidad, y continúan, hasta nuestros días, utilizando el mismo sistema estructural; prueba de que lleva, en sí, virtudes dignas de considerar.

En primer lugar, se observa que, a medida que las dimensiones aumentan, interesa, más y más, descomponer el sistema en varios elementos, concentrando, en los principales, el máximo canto; porque, de este modo, se reduce el volumen total de material empleado sin disminuir la rigidez del conjunto y se aprovecha mejor el espacio inferior y las alturas libres.

Este aprovechamiento es aún mejor si los cargaderos, que sobresalen más por debajo del plano de piso, se alojan en fachadas o a plomo de tabiques interiores. Por otra parte, los planos verticales, que éstos ocupan, permiten alojar, en ellos, soportes, jabalcones u



otros elementos que reduzcan la luz libre de los cargaderos o, inclusive, permiten suprimir éstos utilizando, como elemento soportante, el propio muro continuo, a la vez que sirve de cerramiento.

El hierro ha seguido, en sus formas, los mismos principios de la estructura de madera, sin variar más que el tipo de enlace y el de entablado o forjado. Parece que su mayor resistencia ha de permitir sustituir las tablas de madera por chapas más delgadas; pero, aparte de su mayor coste, su peligro de oxidación y su poco agradable aspecto, la gran flexibilidad que presentan las chapas, con su reducido canto, las hacen impropias para ello. Por eso, cuando se ha tratado de utilizarlas en pavimento de puente, ha sido necesario darles forma bombeada para que puedan trabajar como verdaderas bóvedas en rincón de claustro invertidas, atadas por los cuatro lados del rectángulo; y cubrirlas con balasto para formar el pavimento y para repartir las cargas concentradas sobre una mayor superficie de chapa. Con ello, se evitan los peligros del punzonado y de la concentración de flexiones que las cargas aisladas fuertes producen siempre sobre elementos de espesor demasiado reducido.

Las dimensiones de estas placas, o sea, las separaciones entre las viguetas o los cargaderos que las bordean, vienen muy condicionadas por la intensidad y por el tipo de sobrecargas que han de soportar. Así, por ejemplo, en los pisos de puente, en los que las sobrecargas más fuertes son producidas por vehículos, éstas llevan sus ruedas y ejes a distancias más o menos determinadas; interesa, por consiguiente, que la separación, entre viguetas transversales a la dirección del tráfico, se aproxime a la distancia entre ejes, para que nunca cargue más de uno de éstos sobre cualquiera de aquéllas, ni sobre la luz de la placa. El reducir esa separación de viguetas, multiplica su número sin reducir la carga sobre cada una de ellas; y el sobrecosto consiguiente puede compensar y, aun sobrepasar, la economía que pudiera presentar la placa por la reducción de su vano.

El hormigón armado ofrece, ya, soluciones de mayor originalidad y eficacia. Por de pronto, aun repitiendo el mismo tipo de la madera, el embrochalado de viguetas y cargaderos se realiza, con este material, con muchas mayor facilidad o naturalidad que con el acero; pues éste requiere, para ello, cortes y soldaduras o roblonados ajustados

y costosos; y el embrochalado es el único modo de reducir la altura, funcionalmente perdida, del sistema de entrevigado.

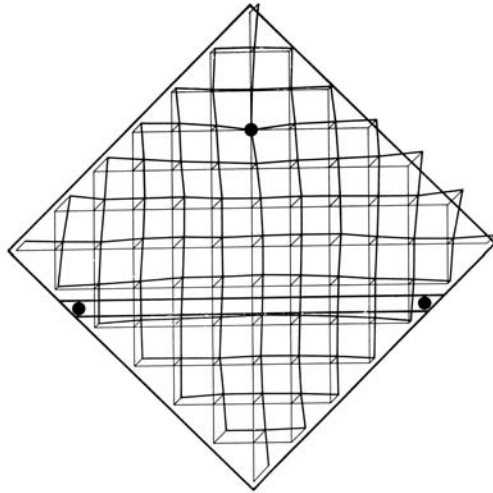
En segundo lugar, el monolitismo de la viga con la losa de piso, no sólo produce una reducción directa de la altura del sistema formado por ambas, sino que permite utilizar el mismo material de la losa, como cabeza de compresión de la viga, reduciendo, sensiblemente, el volumen de material empleado.

El mayor espesor, que admite económicamente la losa de hormigón, permite distanciar más las viguetas, con lo que los efectos de una posible carga concentrada se disminuyen; pues cada viga abarca mayor superficie de piso y, por tanto, es menor la influencia relativa de una carga concentrada cualquiera.

La viga en T, de hormigón armado, se presta muy bien, como ya se dijo, a trabajar como viga apoyada; pero, para reducir el área de flexiones sobre ella, interesa aprovechar sus posibilidades de empotramiento y de continuidad sobre varias luces. Los momentos negativos en arranques, que de ello resultan, hicieron nacer el cartabón. Por cierto que nunca ha acabado de aclararse por qué el cartabón repugna tanto, hoy, a la sensibilidad estética del artista, después de haberse recreado durante tantos siglos



XIII-2. Placas de solarío,
Madrid. Arquitecto M. S.
Arcas. Ingeniero E. Torroja.
Fotografía: S. v. Kaskel.



en las formas de sus talladas almojayas (fig. IX. 8) o de las ménsulas de piedra que, bajo los arranques de las vigas, engalanó siempre de maravillosos perifollos con dádiosa complacencia. Quizá fuera para disimular la fealdad intrínseca que encontrarse, en ellas, al no poder fundirlas con la viga a la que trataban de ayudar.

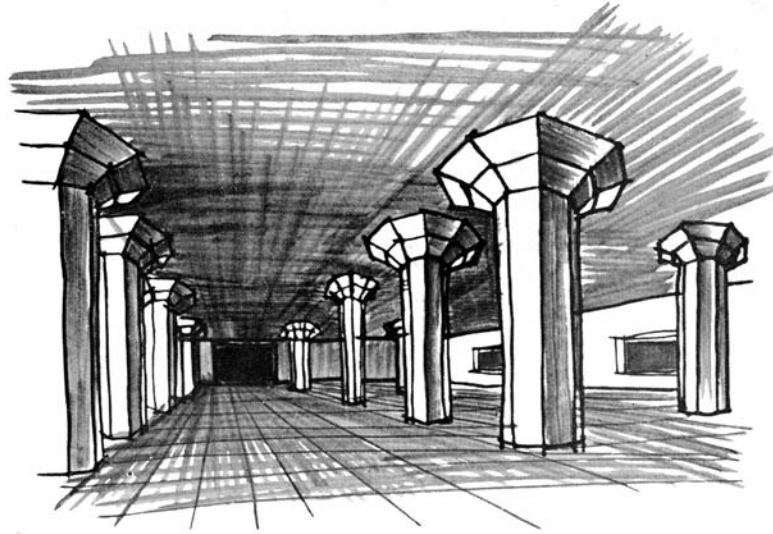
Pero, volviendo al tan vilipendiado hormigón, ha sido necesario esperar su nacimiento para mejorar las ideas del gordo y comodón inventor maderero. La continuidad del hormigón y su posibilidad de armado, en varias direcciones, permiten hacer intervenir un ancho de losa mucho mayor en el fenómeno resistente, bajo la acción de una carga concentrada, y asegurarla oportunamente con la armadura de repartición.

La misma idea, como se comentó al hablar de placas, se desenvuelve y se resuelve en un elemento específicamente distinto, cual es la placa rectangular trabajando, simultánea y primariamente, en las dos direcciones, como un entrecruzado de tablas soldadas entre sí y fundidas en un solo elemento.

La placa de armaduras cruzadas permite, de este modo, cubrir espacios rectangulares mayores, con un canto aceptable y con un máximo aprovechamiento de la altura libre, no sólo porque el momento flector se reparte entre las dos direcciones, sino porque la suma de ambos resulta francamente menor que el momento correspondiente a la losa simple trabajando en una sola dirección según el lado menor.

El hormigón ofrece, en fin, la solución, totalmente específica, de la placa continua sobre soportes aislados sin más intermedio que el capitel. Desgraciadamente, el tamaño de éste resulta difícil de aceptar estéticamente y de disimular en edificios de vivienda si la placa es de poco espesor; pero, en almacenes y naves industriales (fig. XIII. 3), el tipo estructural es de gran interés por el reducido espesor que requiere, por la sencillez de encofrado que ofrece y por la superficie lisa de techo que presenta sin necesidad de cielos rasos ni revestimientos inferiores. Alojarse en su masa las conducciones eléctricas y las tuberías de calefacción para hacer toda su superficie radiante a baja temperatura, es la solución más simple de todas; placa y columna con capiteles forman la estructura entera con o sin muros de cierre.

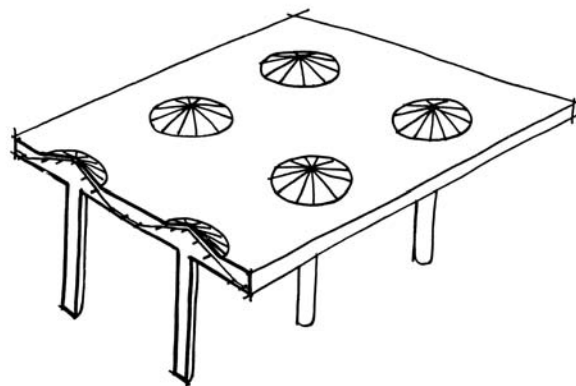
XIII-3. Piso fungiforme de Langerhouse.



Su posibilidad de adaptarse económicamente a distribuciones de soportes en triángulo, o a tresbolillo, facilita la circulación para garajes y otros usos; y hace, de este tipo estructural, uno de los más interesantes, sencillos y convincentes como estructura de piso.

Incluso es posible, invirtiendo los capiteles para colocarlos por encima de la placa, dejar los techos lisos sin capitel aparente y ocultar éste entre la placa y el piso, propiamente dicho, montando sobre ella, con lo que queda una cámara revisable desde el propio piso. La solución es posible y puede realizarse sin dificultad. En la figura XIII. 4 se representa su utilización como cubierta de un depósito que soportaba una gruesa capa de tierra para aislamiento térmico, y en el que se utilizó este tipo para obtener la economía que representaba la supresión de los encofrados de capitel. Estos se formaban vertiendo directamente el hormigón y apisonándolo de costado sin necesidad de encofrar.

Esta necesidad de reducir el coste de los encofrados, ha desarrollado mucho el empleo de viguetas prefabricadas; y el hormigón pretensado ha encontrado, en ellas,



XIII-4. Placa con capiteles por encima de ella.

uno de los más productivos campos de aplicación. Evidentemente, en este tipo de construcción padece el monolitismo, típico del hormigón armado; pero, poco a poco, se han ido ideando tipos de junta cuyo enclave y rejuntado permiten recuperar, en buena parte, las ventajas de la continuidad.

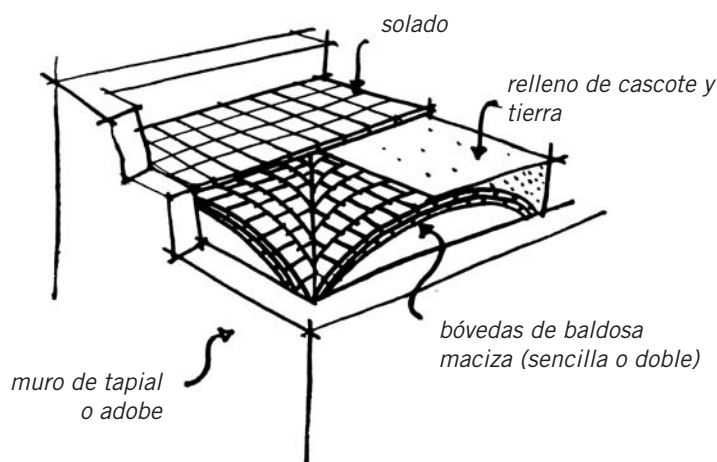
Y, por último, el sistema se ha completado con el empleo de bloques huecos, también prefabricados, para formar el forjado entre viguetas y, simultáneamente, el cielo raso o superficie lisa del techo. La arquitectura de estos días, está tan encariñada con esta disposición que no necesita explicación ni comentario.

Fuera de la madera, el acero y el hormigón, sólo quedan por considerar las aportaciones que la piedra o el ladrillo pueden brindar al tema del piso. El ladrillo, también exageradamente menospreciado, empezó a aportar sus bovedillas entre viguetas para soportar un rellano que sirve, simultáneamente, de asiento al pavimento y de amortiguador a ruidos y vibraciones.

Ciertamente, esta solución aumenta el peso muerto; pero, como las luces no son grandes, ello ofrece sus ventajas, pues los pisos ligeros de hoy se asemejan demasiado frecuentemente a un pandero.

Pero, con ser ese de las pequeñas bovedillas, uno de los empleos clásicos de ladrillo, no es, ni con mucho, el límite de sus posibilidades. Él ha creado ese eficaz invento constructivo que es la bóveda tabicada; porque, con rasillas y yeso o cemento rápido, un albañil avezado es capaz de hacer, en pocas horas, las más variadas formas resistentes, sin otro herramental que gaveta y paleta. Ciertos pisos extremeños son simples bóvedas rebajadas en rincón de claustro (fig. XIII. 5), cubiertas de tierra hasta el nivel del piso, y estribadas sobre gruesos muros, de ladrillo o de adobe, que la dureza del clima y la naturaleza del suelo aconsejan en aquellas regiones.

Evidentemente, estas soluciones no sirven para hacer rascacielos precisamente; pero, en países de determinadas condiciones climatológicas y económicas, producen rascasuelos mucho más cómodos, confortables y duraderos que las supertécnicas casas de cartón, más o menos prefabricadas.



XIII-5. Bóveda de piso.

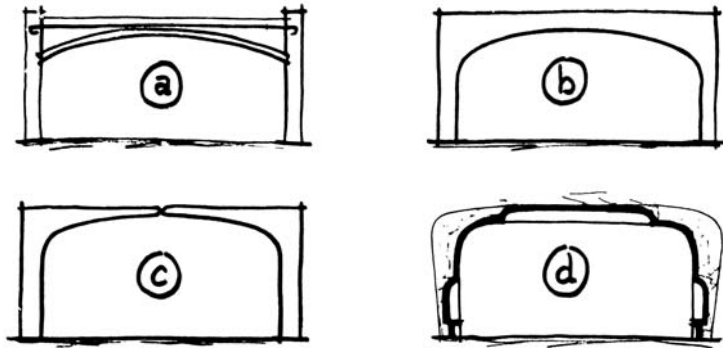
XIII-6. Bóvedas tabicadas de una escalera a montacaballo. Fotografía: M. García Moya.



Y puesto que, al fin y al cabo, pisos son las escaleras, no está fuera de lugar citar la bóveda catalana (fig. XIII. 6), tan congénita en su tierra como el algarrobo de sus campos, y tan maravillosa, en sus realizaciones, que difícilmente alcanzan los actuales conocimientos teóricos a explicar y medir su fenómeno resistente, genialmente intuido por constructores desaparecidos bajo la tierra con que fabricaron sus ladrillos hace siglos.

La bóveda rebajada, sobre muros, como elemento sustentante de un piso, presenta dos inconvenientes: los empujes que da sobre los muros y la pérdida de altura que impone en sus arranques. El primer problema sólo puede resolverse parcialmente estableciendo tirantes, por encima de la bóveda (fig. XII. 7a), tangentes a su clave, y hacer que la estructura de los muros resista la flexión que produce el par de fuerzas tirante-empuje; flexión que varía poco con el rebajamiento de la bóveda. Pero, entre esta solución y la del pórtico, no hay gran diferencia desde un punto de vista resistente-estructural; y, en definitiva, no parece ser tipo que permita un desarrollo mayor que el del pórtico o unión monolítica de viga y soportes.

Lo que sí interesa señalar es que la solución abovedada, o de pórtico, permite sacrificar la altura libre junto a los muros, en beneficio de la del centro del pórtico; pues, en último extremo, dos ménsulas, empotradas en los muros, permiten llegar, al centro del vano, con canto teóricamente nulo (fig. XIII. 7c). Ello puede representar, en ciertos casos, una ventaja funcional, aun a trueque de perder espacio en planta, por efecto del mayor espesor de los elementos verticales que entran, con su flexión, a ayudar a los elementos horizontales.

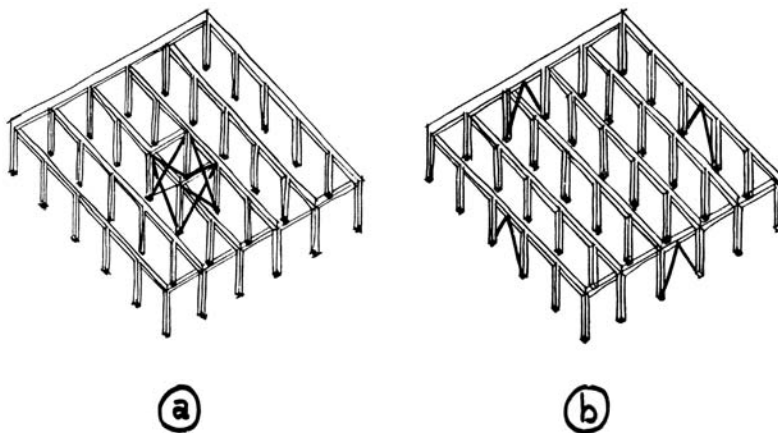


XIII-7. Bóvedas rebajadas.

Sin necesidad de llegar a esta solución de momento nulo en el centro de la luz, el pórtico de hormigón armado permite y hasta aconseja (fig. XIII. 7d) llevar la cabeza de compresión, que es la losa, por el trasdós del pórtico en la parte central de la viga y partes bajas de los soportes o muros; y por el intradós, junto a los ángulos superiores del pórtico, siguiendo los cambios de signo del momento flector. Esto permite un mayor desahogo y mejor aprovechamiento, tanto de la altura como del ancho de la sala.

Esta cuestión del aprovechamiento de alturas, por reducción de los cantos en el entramado horizontal de piso, es el caballo de batalla que se plantea frecuentemente en los edificios de pisos superpuestos, con altura total limitada; porque el hombre quiere, sobre su cabeza, una altura libre, tanto más grande cuanto mayor es la importancia, el cargo o la vanidad de la persona que lo desaprovecha. La desaparición de la chistera y de la araña de cristal ha coincidido con una disminución de esta tendencia; y todo ello hace pensar en la conveniencia de sopesar bien los pros y los contras, en cada caso, antes de exagerar la esbeltez del entramado de piso en perjuicio de la economía, de la resistencia y de la rigidez del conjunto.

Porque la estructura horizontal no es solamente el elemento sustentante del piso, sino también la encargada de arriostrar los elementos verticales sustentantes y dar estabilidad al conjunto, impidiendo el deslizamiento horizontal de un piso respecto a otro, o respecto a la cimentación. En cuanto el edificio es un poco alto, los muros

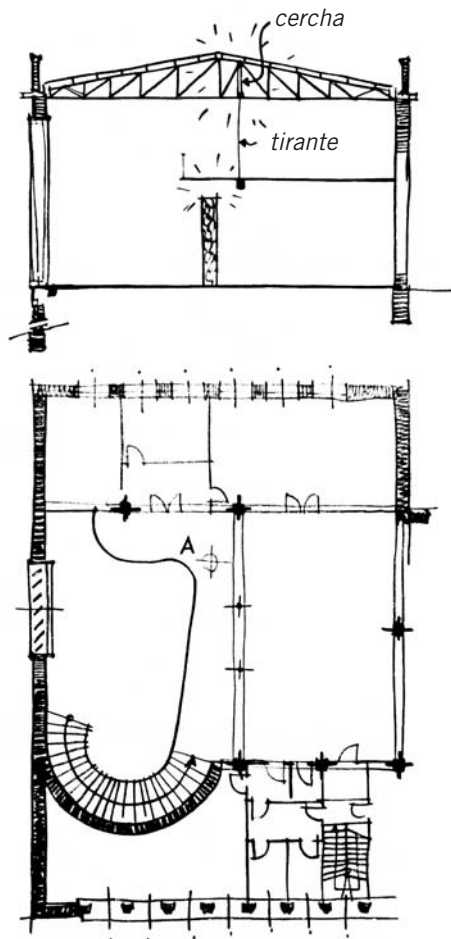


XIII-8. Rigidización de pórticos.

de crujía son incapaces, por sí solos, de asegurar esta estabilidad, pues requerirían, para ello, espesores inaceptables económica y funcionalmente.

En edificios de cuatro fachadas, la estabilidad se logra económicamente utilizando la placa del piso como elemento transmisor de los empujes de viento, que recibe una fachada, a los muros perpendiculares a ella, y que tienen, en general, estabilidad y rigidez sobradas para ello. Con grandes alturas de edificio, cada piso puede servir también para arriostrar los muros, actuando de diafragmas y rigidizadores del tubo vertical, de poco espesor, que forman las fachadas.

Si faltan los muros continuos o si están formados por materiales no estructurales, sino sostenidos por un entramado vertical independiente, es necesario que éste se complete monolíticamente con el entramado horizontal para resistir los empujes de viento, etc. En este caso, los efectos, debidos a estas acciones, se suman a la flexión propia del piso y pueden condicionar la estructura de éste. Las flexiones pueden resultar tan fuertes, en las vigas o en los soportes, que sea necesario establecer triangulaciones en planos verticales para hacer la estructura suficientemente resistente y rígida; pero, sin que esta rigidez pueda llegar a producir esfuerzos térmicos demasiado



XIII-9. Vestíbulo del I.T.C.C.

fuertes. Así, por ejemplo (fig. XIII. 8a), se pueden triangular las filas centrales de soportes y, en cambio, articular las extremas para lograr el efecto deseado; o mejor (fig. XIII. 8b), triangular las partes centrales de cada fachada, y dejar articulaciones en los soportes, que permitan la dilatación radial desde el centro de la planta.

Mayor dificultad que estas cuestiones y mayor desgracia suele ser, para el técnico estructural, la exigencia del funcionalista de suprimir soportes en las plantas bajas, dejando cortados los que vienen de arriba; cuando aquél lo que desearía es justamente lo contrario: disponer de más soportes abajo que arriba o, por lo menos, que ninguno se quedase cortado, por su base, antes de llegar al cimiento. Las grandes salas y vanos, en planta baja, obligan a disponer robustos cargaderos para soportar las cargas del edificio que queda por encima. Con grandes luces y fuertes cargas, los cantos de estos cargaderos también resultan grandes y van en contra de la exigencia antedicha de altura libre sobre la cabeza de los usuarios de la sala; altura que aumenta con el número de ellos como si tuvieran que montarse unos encima de otros, porque la sala necesita, efectivamente, unas ciertas proporciones.

El hombre estructural –de esta exigente e intransigente raza a la que pertenece el autor– pide que le dejen colocar los soportes en algún sitio en que sirvan para soportar algo, asegurando que, con suprimirlos, sólo se logrará que el usuario coloque en su lugar una estantería o un jarrón, seguramente de mal gusto; pero, el artista insiste en que las columnas, en medio de la sala, son antiestéticas; y que, en fachada, necesita grandes dinteles para poder alojar, bajo ellos, los montantes de los batientes de las muchas puertas, cuyo ancho, por inadvertida excepción, sigue estando a escala con las personas.

En algún caso de éstos, el técnico ha terminado por irse con su estructura sustentante a la planta de encima o huir escaleras arriba a esconderla en el desván de la cubierta, donde irá a acompañarla, algún día, el cursi jarrón de la planta baja.

Esta paradoja tiene, sin embargo, una perfecta justificación estructural. Toda estructura, que haya de resistir a flexión, necesita canto; casi puede decirse que cuanto más, mejor; y bajo las cubiertas a dos aguas es donde suele encontrarse en mayor abundancia, precisamente porque el artista no suele subir allí con su lapicero. En la estructura de vestíbulo, representada en la figura XIII. 9, el piso intermedio, al que se exigía un canto reducido, había de quedar con todo su borde curvo al aire y no se le permitía apoyarse más que en un soporte situado en A. En vista de ello, el autor propuso que el soporte se convirtiese en cualquier otra cosa que no llegase al techo, para no engañar a nadie; y colgar, todo el piso de las vigas de la cubierta que disponen de gran canto. Los tirantes quedan vistos en la planta alta, a plomo de la mesa central, y pueden engalanarse o distraerse, según quieran, sustentando lámparas o anaqueles.

La solución, aparte de su racionalidad y economía, dentro de las condiciones funcionales y estéticas impuestas a esta planta, tiene la ventaja de servir de intrigante diversión al visitante, al que, de ese modo, se le hace más corta su espera en el vestíbulo.

Claro está que, si la cubierta se encuentra muy lejos del piso colgado, los alargamientos de los tirantes, los acortamientos de los soportes desde el piso hasta la viga de cubierta, y las flechas de ésta, suman sus efectos y pueden dar al piso una flecha

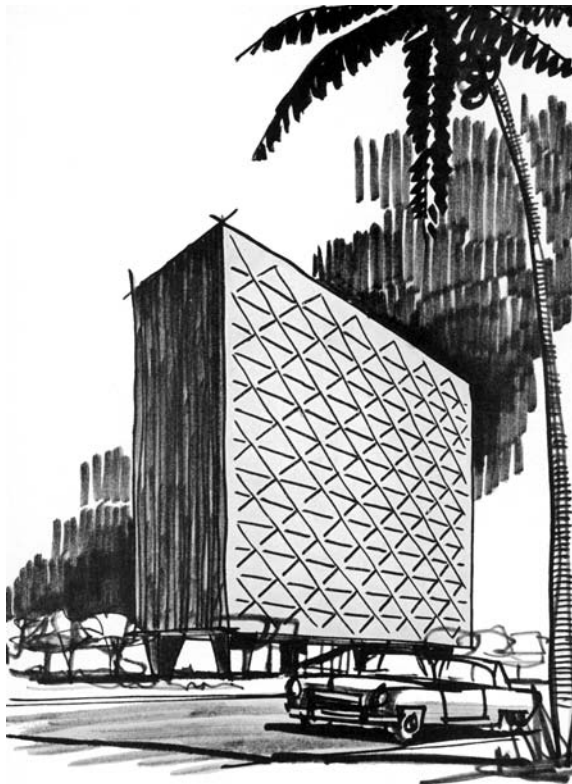
excesiva que produzca, en él, flexiones anormales. Pero, si las sobrecargas vivas, simultáneamente posibles, no son grandes, puede corregirse el defecto estableciendo tensores en los tirantes para corregir totalmente el efecto debido al peso muerto; e inclusive, para dar una buena contraflecha al piso, que no debe ser, en este caso, demasiado rígido.

La supresión de soportes interiores es siempre motivo de complicación y encarecimiento. No así en la fachada; pues, ésta ofrece corrientemente la posibilidad de alojar, en ellas, vigas de gran canto. Por de pronto, hay bastante altura entre los dinteles de las ventanas de un piso y los vierteaguas de las de encima; pero, cabe también el utilizar la altura entera, de piso a piso, para formar una viga Vierendeel, aligerada solamente por los huecos de la ventana (fig. V. 2).

Incluso podría considerarse todo el muro como una especie de Vierendeel múltiple en altura, contorneando los huecos de las ventanas de las distintas plantas. Su cálculo es complicado; pero, si el muro es de hormigón armado, la armadura que resulta no es excesiva y el aprovechamiento de material y de espacio es integral.

Mucho más sencillo es triangular totalmente la fachada formando una celosía de huecos triangulares. Con esa o análoga disposición (fig. XIII. 10), se puede lograr la máxima diafanidad y amplitud de huecos en primera planta.

En definitiva, es el mismo principio utilizado en la construcción de silos elevados, en los que las cubas, que forman el fondo, cuelgan de las paredes laterales. La única



XIII-10. Fachada triangulada.

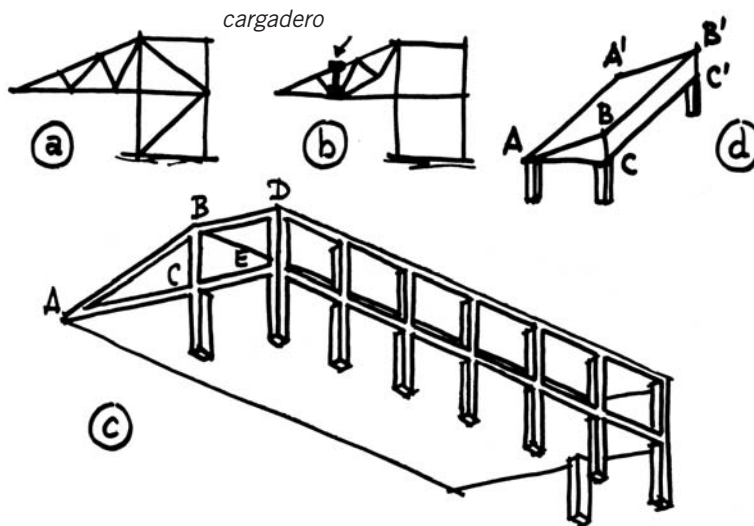
diferencia está en sustituir la continuidad superficial de la pared, por una triangulación capaz de producir parecida resistencia y rigidez en su plano, análogamente a lo que se dijo, a este respecto, al tratar de la bóveda y de la cúpula.

Los pisos no tienen siempre un contorno completo o cerrado sobre el que apoyar. Los anfiteatros, por ejemplo, apoyan solamente en tres lados, y presentan, con frecuencia, el borde libre con acusada curvatura en planta. La viga curva de antepecho puede utilizarse como elemento sustentante, siempre que las viguetas, o el forjado del piso, la arriostren e impidan su torsión; pero, siendo los anfiteatros escalonados, suele ser preferible disponer ménsulas trianguladas en el espacio (fig. XIII. 11) que queda entre el escalonado y el cielo raso inferior. Estas ménsulas pueden ir, bien empotradas en la estructura contigua del resto del edificio (a), o bien apoyadas sobre cargaderos longitudinales retranqueados (b), respecto al borde libre, lo necesario para que puedan disponer de suficiente canto sin interferir con las escaleras y pasillos de acceso.

Pero, éstas no son las únicas soluciones. Si el anfiteatro (fig. XIII. 11c) va empotrado, por ambos extremos, en los muros laterales de la sala, las ménsulas trianguladas ABC producen, no sólo cargas verticales sobre la viga BC, sino también reacciones horizontales sobre los entramados de los pisos BD y AE. Si éstos son capaces de resistirlas a flexión, transmitiéndolas a los muros laterales de la sala, permitirán asegurar el equilibrio sin dificultad y con relativa economía.

Incluso el cajón triangular, formado por los tres planos ABA'B', BCB'C' y ACA'C' (fig. XIII. 11d), podría presentar suficiente resistencia y rigidez torsional, por sí solo, si los tres planos fuesen macizos o bien triangulados.

Se ve, pues, que el piso, como cualquier otro elemento, puede exigir soluciones complejas y nuevas en cuanto sus condiciones o necesidades se salen de las normales; y que el ingenio del proyectista tiene todavía amplio campo en el desenvolvimiento de nuevos tipos para su estructura sustentante.



XIII-11. Solución de anfiteatros.

XIV

Puentes y acueductos

El Golden Gate Bridge, con sus 1.280 metros (fig. XIV. 1) de luz, entre ejes de pilas, es el mayor vano salvado hasta la fecha; porque, el puente colgante es el que permite la máxima ligereza y el mínimo peso muerto, que es lo que interesa cuando de tan grandes luces se trata.

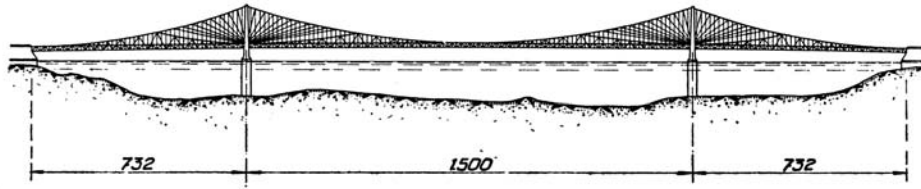
Bien se comprende, aun sin necesidad de llegar a estos extremos, que el puente plantea un problema serio y tan estructuralmente dominante que no se presta a tratarlo como el piso. Es un tema que se expresa en acordes mayores; como dice F. Stüssi:

«El problema de las grandes luces siempre ha fascinado, tanto a los especialistas como a los que no lo son. El construir un puente de una luz superior a la mayor anteriormente alcanzada, no sólo requiere gran conocimiento técnico y capacidad, sino también intuición y audacia creadora, ya que ello significa un triunfo sobre las fuerzas de la naturaleza y un progreso en la batalla contra la insuficiencia humana».

En estas grandes luces colgantes, por muy ligeras que quieran hacerse, la sobrecarga representa muy poco frente al peso muerto. La viga de rigidez puede, pues, ser relativamente esbelta, ya que sólo ha de resistir las flexiones que se produzcan por las posibles desigualdades de la sobrecarga a lo largo de la luz; y, en el caso extremo, si se tratase de una sobrecarga totalmente uniforme, de lado a lado, como en el caso de un acueducto, la rigidez teóricamente necesaria sería nula. De todos modos, en cuanto exista la sobrecarga, los alargamientos del cable dan lugar a flexiones, tanto más grandes,



XIV-1. Puente de Golden Gate. Ingeniero Jefe J. B. Strauss. Fotografía: de la Publ. del Golden Gate Bridge.



XIV-2. Proyecto de puente sobre el Estrecho de Messina. Ingeniero D. B. Steinman.

en la viga, cuanto mayor sea la rigidez de ésta; por lo que interesa no exagerar tampoco inútilmente esta rigidez.

Aparte de ella, la práctica ha enseñado que se requiere también una cierta rigidez torsional del tablero para resistir los efectos dinámicos del viento.

El puente colgante es un arco invertido, formado por un cable de alambres de alta calidad, cuyo coeficiente económico-resistente es mayor que el de los aceros de construcción; y en ello radica una de las principales ventajas de este tipo.

Como todo arco, necesita transmitir reacciones horizontales al terreno, a no ser que se trate de tres luces proporcionadas y dispuestas de forma que los cables vayan a anclarse sobre los extremos de la propia viga de rigidez. La estructura es, en cierto modo, la invertida del arco atirantado; el arco-cable trabaja a tracción, y la viga de rigidez soporta, en compresión, las componentes horizontales que le transmite aquél por las puntas.

Partiendo de estos tipos estructurales, es interesante seguir la evolución que van sufriendo a medida que disminuyen las dimensiones de la obra y, especialmente, la luz; porque, contrariamente a lo que ocurría en el piso, en el puente el tipo estructural cambia totalmente, no sólo con el material, sino principalmente con la luz y, también, con la altura de la rasante sobre el fondo del valle y con las condiciones del terreno de cimentación, ligadas a la presencia del agua bajo el puente. Cada tipo acusa netamente sus ventajas e inconvenientes específicos, y cada valle encuentra, en uno de ellos, el puente que le viene como anillo al dedo y que el técnico ha de escoger y ajustar.

A medida que disminuye la luz y, consecuentemente, las secciones y pesos muertos de los diferentes elementos, la sobrecarga viva va aumentando su importancia relativa y, por consiguiente, el fenómeno resistente de flexión, que corresponde a la viga de rigidez, va dominando sobre el del arco; la esbeltez de la viga no puede mantenerse, su canto baja mucho más lentamente que la flecha del cable, y su cabeza superior se eleva, tendiendo a fundirse con éste.

El tipo (fig. XIV. 2) de puente colgante Florianópolis, caracterizado por la fusión de ambos elementos –cable y cabeza superior de viga– en la parte central de la luz, y por el atirantamiento, en cierto modo triangulante, de las partes laterales del cable, desde la pila (a la altura del tablero), es el resultado de la tendencia antedicha. Ciertamente, este tipo se ha propuesto para el puente de Messina con 1.500 metros de luz, pero se ha utilizado más en puentes colgantes de dimensiones menores.

La forma de la viga se amolda bien al reparto de flexiones que ha de sufrir. Los tirantes completan el efecto de viga; pero solamente pueden trabajar en tracción y con excesiva oblicuidad, por lo que, al reducirse la luz, llega a ser preferible la viga

rígida, de triangulación normal, siguiendo más o menos el mismo perfil del cable (fig. X. 2). De este modo, la viga tiene un máximo canto, sobre soportes, donde los momentos son mayores, y aunque las grandes piezas en compresión son siempre un inconveniente, como las dimensiones generales han disminuido, el peligro deja de ser prohibitivo.

Con la viga rígida, el reparto de luces puede hacerse más libremente amoldándose a las exigencias del valle y de la cimentación. Estas grandes vigas continuas requieren libre dilatación para permitir sus movimientos térmicos, lo que implica costosos aparatos de apoyo, dadas las grandes cargas que han de soportar.

Cabe también fijar los puntos de inflexión, o de momento nulo, mediante bielas que, al mismo tiempo, permitan la libre dilatación. La viga continua se transforma, de este modo, en grandes ménsulas equilibradas que sostienen tramos relativamente pequeños entre ellas, bien sea anclando o contrapesando los extremos exteriores de las ménsulas, como en Québec (fig. IV. 5), bien haciendo estable cada par de ménsulas contiguas sobre un doble apoyo, como en el Firth of Forth (fig. XIV. 3). Son estas soluciones y estos tipos de puentes los que ostentan hoy el récord de luz sin empujes horizontales, con valores mucho mayores que la viga continua.

Sin embargo, la ventaja se inclina hacia esta última en cuanto la luz se reduce, y aún se puede obtener mayor simplificación haciendo la viga de canto constante —aunque con barras de secciones diferentes—, para facilitar el movimiento de los elementos auxiliares de montaje y unificar el tipo de operaciones.

Si la luz sigue reduciéndose, el aligeramiento, que puede representar la triangulación respecto a la viga de alma llena, va desapareciendo, y ésta acaba de imponerse por su mayor rigidez, por su mejor efecto estético y por las facilidades constructivas que ofrece, tanto para su fabricación como para su montaje.



XIV-3. Puente del Firth of Forth. De «Ossature Métalique».

La simplificación mayor se obtiene cuando la luz y las flexiones son tan pequeñas que pueden utilizarse perfiles de laminación o formados simplemente por tres palastros soldados.

El empleo de vigas de alma llena en luces cortas sobre palizadas metálicas altas, para formar viaductos en valles anchos, se ha defendido, durante muchos años, de sus defectos estéticos, gracias a su sencillez y rapidez de montaje, especialmente allí donde faltan materiales para fabricar las pilas con mamposterías y hormigones en masa económicos, o donde la gran altura de rasante haría esas pilas excesivamente costosas.

La viga metálica de alma llena tiene su campo óptimo de aplicación en luces ni demasiado grandes ni demasiado pequeñas. Los puentes de viga carril se han ido sustituyendo por estructuras de hormigón con tablero continuo de más masa, capaces de establecer el balasto para la vía por conveniencias de explotación. Por el lado de las grandes luces, su campo de aplicación ha aumentado con el empleo de la soldadura, habiéndose llegado a alcanzar el «récord» actual en el puente de Düsseldorf.

Pero estas luces se defienden más por razones estéticas y de otros tipos que por ventajas constructivas o económicas. La soldadura de sus grandes almas resulta costosa y delicada; y para poder establecer las enormes secciones de acero que necesitan sus cabezas, se ha requerido utilizar toda la estructura de piso, repetirla en la cabeza inferior y forzar los rigidizadores de todas las paredes del cajón. En definitiva, la viga de alma llena requiere rigidizaciones y pesos excesivos respecto de la triangulada, a partir de una cierta luz; solamente por debajo de ella se encuentra su campo óptimo de aplicación.

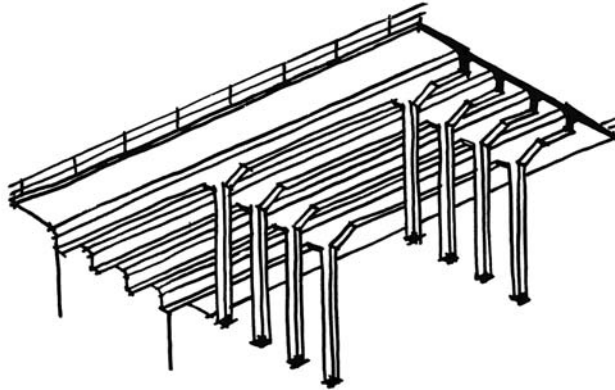
Ese campo queda limitado inferiormente por el hormigón. La necesidad de establecer el balasto o el firme del piso sobre chapas bombeadas, y los peligros de su oxidación y de los efectos dinámicos en su reducida masa hacen que, por bajo de cierta luz, la solución de hormigón sea más satisfactoria que la metálica, e incluso más económica, si bien esto último depende, en cada caso, del coste de los materiales en la localidad.

Sobre todo, si el piso sobre las vigas ha de ser de hormigón armado, es lógico aprovecharle como cabeza de compresión de la viga —dejando aparte las estructuras mixtas, poco desarrolladas hasta la fecha— y hacer de hormigón el alma de ésta. Su peso muerto llega a ser beneficioso, en luces pequeñas, con objeto de dar a la obra la masa necesaria para disminuir el efecto perjudicial de las vibraciones. Resultan, así, las luces comprendidas, por ejemplo, entre los ocho y los veinticinco metros, como las más apropiadas para vigas de hormigón de alma llena y tablero superior.

En puentes estrechos, la sección en pi es la clásica por el perfecto aprovechamiento de sus escasos elementos; con anchos de calzada mayores, el número de almas se aumenta (fig. XIV. 4) según las exigencias de la losa que ha de trabajar a flexión entre aquéllas, pero las características fundamentales del tipo permanecen inalteradas.

Este tipo de puente se presta muy bien a resistir, con su cabeza superior de compresión, los momentos positivos correspondientes a viga apoyada. Cuando la anchura del valle exige varios tramos, unos a continuación de otros, su apoyo sobre pilas intermedias resuelve el problema muy sencilla y económicamente. Incluso estos soportes pueden ser la prolongación de los pilotes, si este es el tipo de cimentación, intercalando simplemente una carrera enterrada para absorber errores de alineación de éstos o

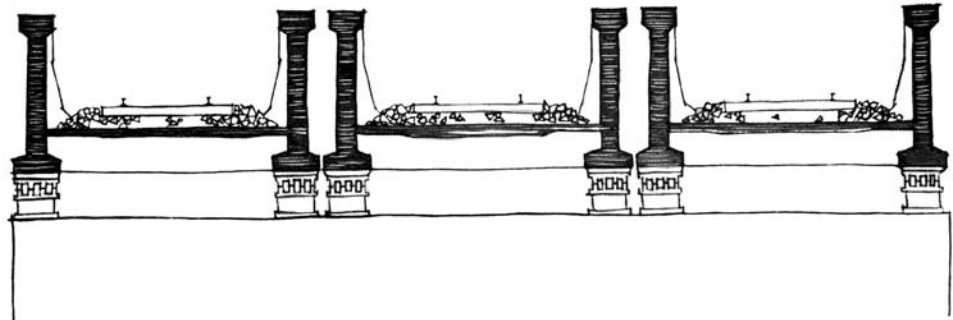
XIV-4. Puente de sección en «π».



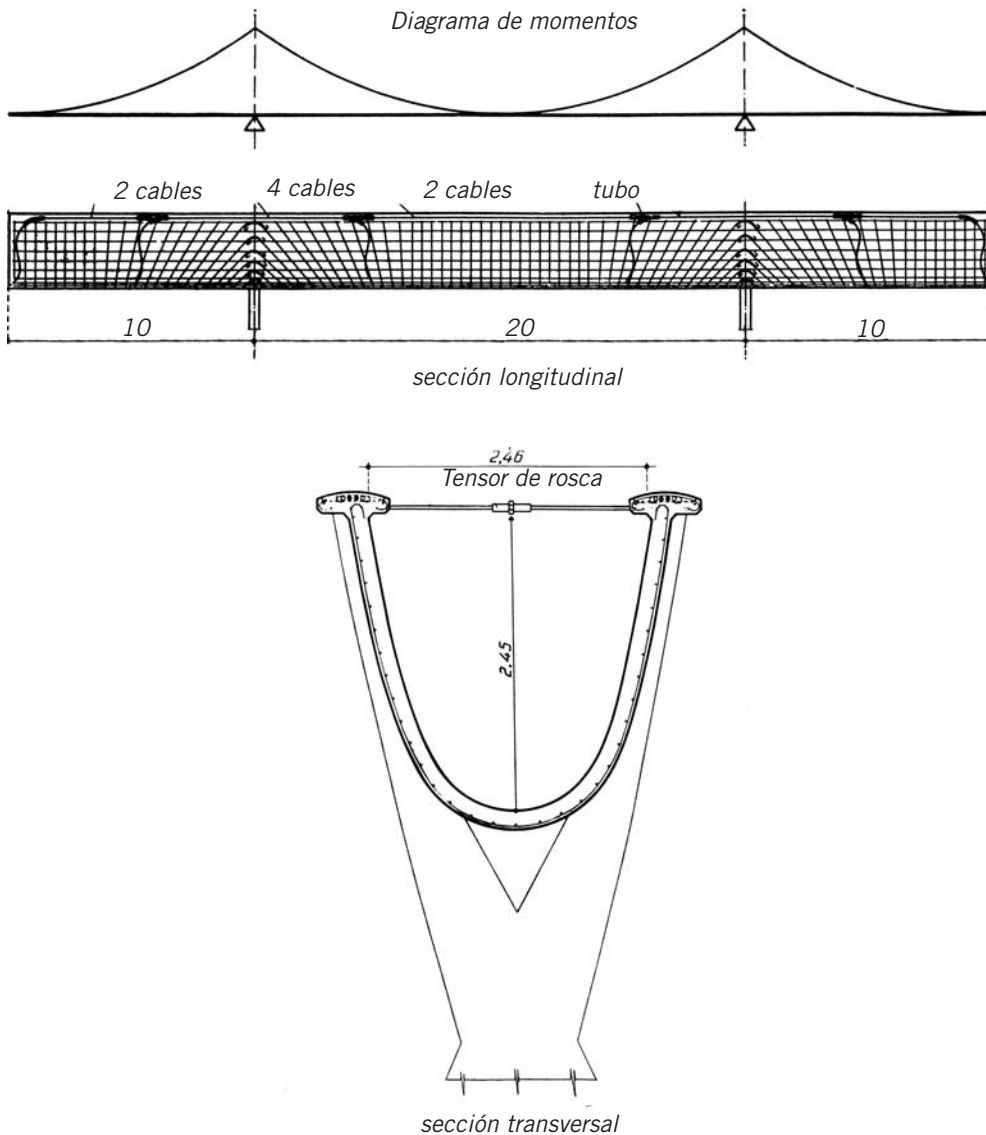
para repartir la carga sobre mayor número de ellos. De este modo, la estructura es isostática y acepta, sin inconveniente, cualquier asiento parcial de un cimiento.

No cabe duda que la viga continua permite reducir el área de momentos y los valores máximos de éstos. La reducción es muy grande para los efectos del peso propio; y bien sensible, aunque no tanto, para los de la sobrecarga viva. Pero, en esta forma, aparecen momentos negativos, sobre arranques, que obligan a acartabonar las vigas o a proveerlas de una cabeza inferior. Como esta cabeza se requiere solamente en las proximidades del arranque, su peso apenas representa aumento de flexión, y solamente una ligera complicación de encofrados.

Esto enseña que, si la altura libre bajo la rasante fuese tan pequeña que obligase a colocar las vigas por encima del tablero, éste volvería a quedar bien aprovechado en una parte de su longitud. De todos modos, ni esta solución resulta agradable a la vista, ni es económica, por cuanto obliga a separar las vigas en perjuicio de la resistencia transversal del tablero y a desaprovechar éste como cabeza de compresión en la mayor parte de la longitud de cada tramo. Es difícil que la losa del piso pueda bastar, por sí sola y sin viguetas transversales, para salvar la gran anchura que ha de quedar entre las vigas maestras. En consecuencia, la losa, al requerir viguetas por debajo, queda más alta que la cabeza inferior de las vigas. En la figura XIV. 4 se aprecia claramente este defecto.



XIV-5. Sección de puente de ferrocarril, en Zaragoza. Ingeniero E. Torroja.



XIV-6. Acueducto de Alloz.
Ingeniero E. Torroja.

Por el contrario, si de acueductos se trata, la solución es mucho más fácil y tiene más interés porque, al ser la carga siempre uniforme en todas las luces, los momentos máximos positivos se reducen a la mitad de los negativos. Y, por su parte, la sección hidráulica o funcional se amolda perfectamente a este tipo de estructura.

Como caso particular de ella se puede presentar el ejemplo de la figura XIV. 6 en el que, precisamente para lograr que todos los momentos fuesen negativos, se acudió al recurso de cortar, por el centro, una luz sí y otra no, estableciendo las juntas de dilatación en los centros de las luces cortadas. La exigencia funcional de impermeabilidad de la pared se aseguró mediante el postesado de las armaduras de tracción en la cabeza superior, complementado por otro transversal, de cabeza a cabeza, para producir también compresiones en esta dirección sobre toda la pared interior, especialmente en la parte inferior donde las presiones del agua son mayores.

Volviendo a los puentes, se observa que el hormigón postensado trata de superar, en puentes de alma llena, las luces que alcanza económicamente el hormigón armado.

Es verdad que existe el puente de Lafayette (fig. X. 6) con sus vigas en doble celosía de hormigón armado, de 70 metros de luz; pero, el ser una obra excepcional que no ha encontrado imitadores o continuadores, a pesar del mérito indudable que encierra, la coloca ahora un poco al margen de esta revista comparativa de tipos. Porque el hormigón armado no se presta a las estructuras trianguladas tan naturalmente como el acero, y tiende a la viga de alma llena, con la que difícilmente resulta económico sobrepasar los 25 metros de luz.

En cambio, el postensado ha logrado ya luces de 74 metros y se ha atrevido con proyectos hasta de 260 metros en competencia económica, al parecer, con el alma llena metálica. Si en la adopción del postensado, en estas obras, han intervenido otros imponderables diferentes de la objetividad económica, es cuestión delicada de enjuiciar.

Esta técnica se desarrolla con elementos de menos espesor y mayor ligereza que el hormigón armado corriente, para admitir mayores luces. El menor volumen de sus armaduras permite reducir los espesores y aumentar los esfuerzos que han de resistir. En contrapartida, presenta el mayor coste y delicadeza de las operaciones propias de esa armadura.

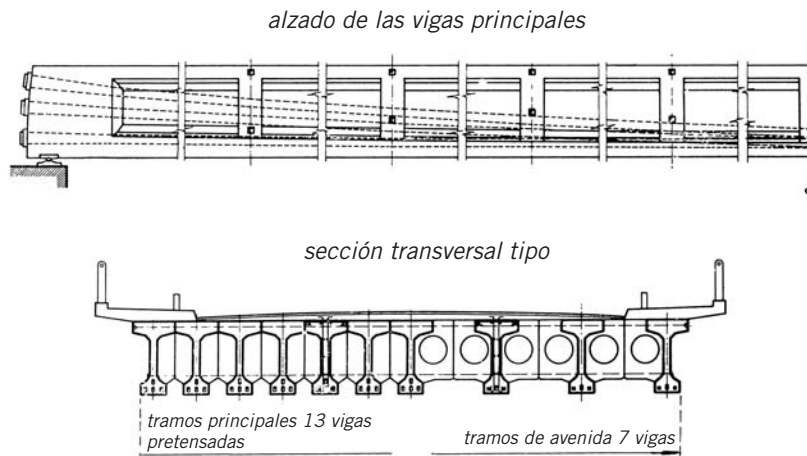
La prefabricación, tan valientemente iniciada en combinación con el postensado, permite nuevos aligeramientos al lograr hormigones que pueden ser mucho más cuidados de fabricación en taller y, por consiguiente, más resistentes.

Por otra parte, a los efectos del tipo estructural, estas vigas de alma llena adoptan, frecuentemente, la forma en cajón o de doble cabeza (fig. XIV. 7) por la necesidad de soportar, en buenas condiciones resistentes, las compresiones que produce la armadura excéntrica postesada y los momentos que ella produce en sentido opuesto a los de la sobrecarga.

La solución de los puentes de l'Esbly, que aprovecha en buena parte el efecto del arco (fig. V. 4), sólo es posible gracias a las ingeniosas soluciones dadas al proceso



XIV-6. Acueducto de Alloz.
Fotografía: Langhorst.



XIV-7. Puente de Fairmount Park, Filadelfia. Ingeniero M. Fornerot. Consultor Ingeniero G. Magnel.

constructivo, de ensamble a tope de los sucesivos cajones que forman las vigas, y al lanzamiento de éstas; pero, este es tema más apropiado para el capítulo referente al proceso de construcción.

Cuando la luz se reduce más, las vigas enteras se fabrican, entonces, en taller y pueden formar el puente por simple yuxtaposición, unas al lado de las otras o solidarizándose después, entre sí, por un postesado transversal. Sus relativamente reducidas dimensiones hacen posible económicamente las operaciones de transporte y montaje que completan su cuidada fabricación en serie dentro del taller.

Por último, y para apurar el tema hasta el límite, si las luces se reducen todavía más, la losa, por sí sola, basta para cubrirlas, y entran en el campo de las soluciones plausibles de placas fungiformes y las losas sencillas, simplemente apoyadas o empotradas en los estribos o en las pilas. Como este monolitismo reduce las flexiones en la losa, transmitiéndoselas a estos otros elementos, la conveniencia, o no, de establecer el porticado, dependerá del canto que pueda darse a la losa y de la existencia, o no, de otras flexiones que hayan de soportar las pantallas de estribo como elementos de contención.

Así se llega, en el caso de una sola luz, al trilito; y si todavía se reduce más la luz, pueden las zapatas de los cimientos aproximarse tanto que sea preferible establecer una solera continua formando una sección cerrada en cajón. Pero entonces, la forma cerrada que resulta se resuelve más económicamente colocando un tubo circular, prefabricado, enterrado en el terraplén de la carretera.

Por el escalonado discurrir seguido, desde la impresionante estructura del Golden Gate hasta este simple tubo, no queda más camino que andar, como no sea quitar también el tubo y terminar el diálogo.

Será, pues, necesario desandar lo andado, volviendo por otro camino; porque el tubo es, al fin y al cabo, una bóveda cerrada sobre sí misma; y quedaron de lado, al venir, las formas abovedadas y en arco, tan clásicas y satisfactorias en la solución de los puentes. El tubo podría considerarse como el embrión del puente abovedado; el huevo que, por crecimiento y sucesivas evoluciones, llega a las máximas luces.

Imagínese, pues, que el modesto tubo va aumentando de diámetro. Pronto su solera resultará inútil, e inadecuada su forma circular y continua. Mientras la bóveda

quede embutida en el terraplén, su directriz buscará el funicular medio de las presiones que éste le transmita bajo la acción de las posibles sobrecargas actuando sobre el pavimento. Pronto requerirá nervios rigidizadores o arcos perpiaños, que pueden ir en su trasdós para mantener liso el intradós si han de bañarlo las aguas. Pero en cuanto las dimensiones se agranden más y el terraplén, por su mayor altura y volumen resultante, requiera ser sustituido más económicamente por la estructura del puente, aparecerá el arco con tablero superior y tímpano macizo o aligerado.

Mientras las alturas entre el arco y el tablero sean reducidas, la complicación, que lleva consigo el aligeramiento del tímpano, no compensa la pequeña economía de volumen que puede representar. Por eso la bóveda, sobremontada por tímpanos macizos hasta la altura del pavimento, es la solución clásica de casi todos los puentes en arco construido repetidamente hasta el siglo pasado; solución que se presta perfectamente al empleo de materiales frangibles (fig. VII. 2).

Mientras la altura del tímpano era pequeña frente al ancho de la bóveda, resultaba preferible hacer un relleno de tierra o piedra suelta entre los muros de tímpano. Cuando la altura fue grande, estos muros se hicieron tan gruesos que se juntaron para formar un macizo único limitado por la bóveda, el plano de pavimento y los dos planos verticales de paramento. Es el caso, por ejemplo, del viaducto que cruza y casi ciega el tajo de Ronda (fig. XIV. 8).



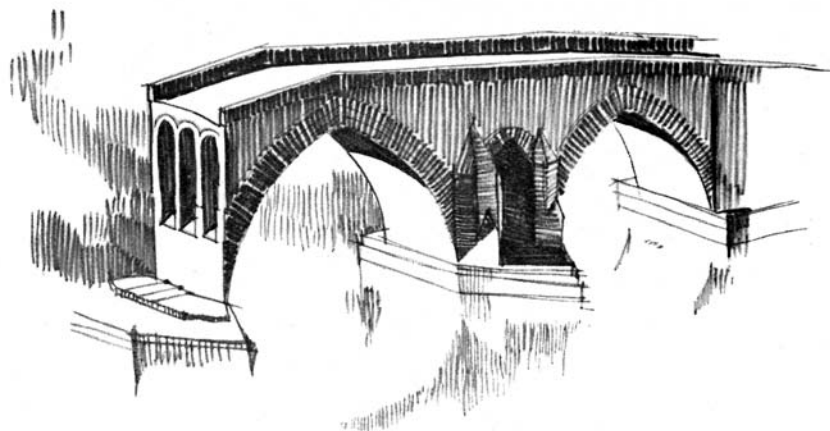
XIV-8. Viaducto de Ronda.
De «España», J. Ortiz
Echagüe.

Se comprende que, al aumentar las dimensiones, interesa aligerar ese macizo para disminuir su volumen y para descargar la bóveda. Para lograrlo, unos, como los romanos, atibaron el relleno con grandes vasijas huecas de cerámica; otros, como los aqueménides o sasánidas del Oriente Medio, se atrevieron a establecer aligeramientos longitudinales volteando estrechas bovedillas en cañón sobre muretes de tímpano paralelos insistiendo sobre la bóveda (fig. XIV. 9). Pero, los empujes no contrarrestados, de esas bovedillas, tienden a hacer volcar los tímpanos exteriores y no permiten, por consiguiente, ni grandes amplitudes de aligeramiento, ni grandes alturas de tímpano.

Por otra parte, la rigidez, en los grandes planos de tímpano, produce fuertes tensiones por la coacción que impone a las dilataciones y contracciones térmicas. Y cuando se quiere sustituir la piedra o el ladrillo por hormigón, la retracción agrava el efecto e impide alcanzar grandes dimensiones; o hay que triarticular la bóveda o hay que tratar de darle algo más de elasticidad y deformabilidad bajo esos efectos.

La solución lógica, sin articular, es el establecimiento de aligeramientos transversales, mucho más inofensivos y fáciles de contrarrestar sobre los estribos del puente. El arco exento sobremontado de pequeñas arquerías, o el más moderno y simple con pilarcillos sosteniendo las vigas del tablero, se ha repetido cientos de veces con más o menos elegancia (fig. XIV. 10). El ritmo de las arquerías puede prolongarse por las laderas del valle; los muretes transversales pueden reducirse a soportes exentos sosteniendo el entrevigado del tablero, o terminar en capiteles que sostengan directamente la placa del pavimento; y el aligeramiento puede completarse, más todavía, descomponiendo la bóveda continua en arcos gemelos arriostrados entre sí.

Sin embargo, mientras las posibles variaciones de la sobrecarga viva, a lo largo del arco, no sean pequeñas respecto al peso muerto de la estructura —lo que, en puentes, sólo se logra cuando la luz del arco alcanza cierta importancia—, el arco no puede aligerarse más allá de un cierto límite impuesto por la flexión que en él producen esas desigualdades de sobrecarga. La única forma de evitarlo sería triangular el tímpano desdoblado e inclinando los pilarcillos (fig. XIV. 11) y articulando el arco, al mismo



XIV-9. Puente de la Joven, sobre el Taurus.

XIV-10. Viaducto del Aire, en Madrid. Ingeniero E. Torroja. Fotografía: M. García Moya.



tiempo, para evitar los efectos térmicos demasiado perjudiciales. Esta solución puede resultar económica e interesante mientras quepa el establecimiento de articulaciones capaces de soportar las compresiones del arco. El tipo es más propio de una estructura metálica que de una de hormigón; pero, aun con este material, es perfectamente factible, dentro de ciertos límites de luz, empleando rótulas plásticas.

El tipo de tímpano, como el de arco, varía naturalmente con las proporciones de éste. Cuando es muy rebajado y las alturas del tablero sobre él son pequeñas, es natural fundir ambos elementos, aumentando fuertemente el canto del arco en riñones para disminuirle en las articulaciones de clave y arranques y formar el tipo ideado por Maillart, tan racional como económico (fig. XIV. 12).

A igualdad de luz, el empuje aumenta con el rebajamiento y los efectos térmicos también; por consiguiente, no conviene forzar el rebajamiento; y cuando las condiciones de la rasante, en relación con el valle, obligan a reducir demasiado la altura del arco por debajo del tablero, éste ha de subir su clave por encima de ese plano



XIV-11. Viaducto de Viaur. Soc. Const. Batignolles. De «Arch of Bridges», E. Mock.

(fig. XIV. 13), a pesar de las complicaciones que representa el tener que aumentar la separación de los arcos para dar paso a la calzada entre ellos, y la necesidad de arriostrarlos por encima del gálibo de circulación.

Los pendolones, que cuelgan el tablero del arco superior, pueden desdoblarse e inclinarse para formar una triangulación.

Mientras las dimensiones no sean tan grandes que el peso muerto domine totalmente sobre las posibles desigualdades de la sobrecarga, la sección del arco viene dominada por la necesidad de presentar un momento de inercia relativamente fuerte. Parece, por consiguiente, que si los elementos de colgado del tablero inferior facilitan el establecimiento de una triangulación, es lógico colocar ésta para centrar el funicular de fuerzas sobre el arco y poder aligerarlo.

Pero, no hay que olvidar que al introducir esta triangulación se coarta la deformación del arco y, por tanto, los efectos térmicos no encuentran, en la flexibilidad de éste, el amortiguador necesario para ser soportados sin grandes esfuerzos. Para evitarlo, el arco ha de convertirse en uno con libre dilatación, cuyos empujes, en lugar de ir al terreno, estén contrarrestados por un tirante alojado en el tablero.

Como, por otra parte, en cuanto la luz es grande, las longitudes de las diagonales son excesivas para trabajar en compresión, el tipo estructural sólo puede presentar ventajas para luces relativamente pequeñas o medias y, aun así, sin clara ventaja sobre la viga triangulada de cabezas paralelas o semiparabólicas.

A subvenir estos inconvenientes viene el arco Nielsen (fig. XIV. 13a) con su falsa triangulación de simples tirantes, bien con tres articulaciones, bien con el tablero cortado para dejarle libre dilatación sin actuar como tirante. Ni siquiera se requiere que las diagonales formen verdadera triangulación y solamente se les pide una ayuda al trabajo del arco que le descargue en lo posible de su flexión; pero sin pretender anularle como trabajo fundamental o primario.

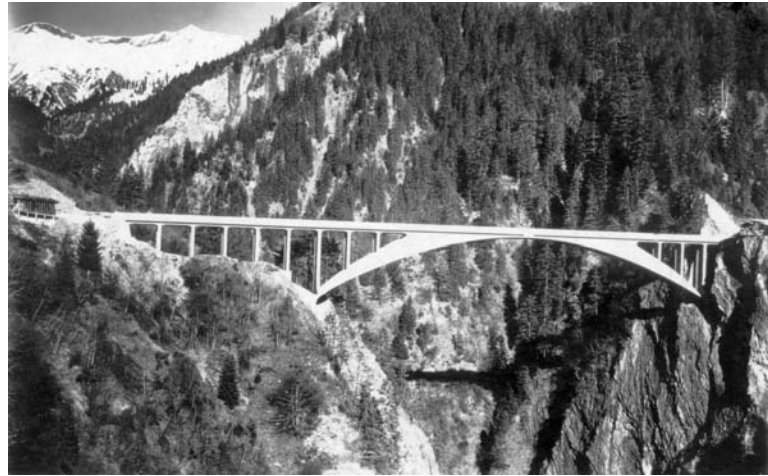
Las ventajas de la estructura dependen mucho de la relación entre el peso muerto —especialmente de tablero— y el de las posibles desigualdades de la sobrecarga viva. Por eso, este tipo estructural ha encontrado sus aplicaciones, escasas hasta la fecha, en luces relativamente grandes para arcos de hormigón.

Evidentemente, el técnico, siempre que pueda, preferirá el arco bajo el tablero, que sobre él; porque el tablero reduce su anchura entre apoyos, y el arco puede quedar arriostrado hacia el centro de la luz. Así se han hecho los mayores puentes de hormigón armado: Plougastel, Tranneberg, Esla, Sandö.

Pero, mientras el cimientto no obliga al gran vano, puede decirse que las luces bastante más pequeñas son siempre más económicas. Del mismo modo que se requiere una gran altura de rasante para que la solución de vigas cortas sobre palizadas no represente una ventaja económica sobre la gran viga —que la solución sea estética, o no, es cuestión aparte—, la arcada múltiple de fábrica, sobre pilas del mismo material, compite, frecuentemente, con ventaja, con el arco grande, entre otras razones por los sobrecostos de cimbra que éste suele exigir.

Al disponer, entonces, varios arcos, unos a continuación de otros, resulta que, si la sobrecarga no actúa por igual en todos ellos, los empujes de los más cargados no quedan equilibrados por los de los contiguos descargados. Esta diferencia de empujes

XVI-12. Puente de Salgina-Tobel. Ingeniero R. Maillart. Del Bericht 99 E. M. P. A.



XVI-13a. Puente tipo Nielsen, Estocolmo. Constr. Christiani-Nielsen.



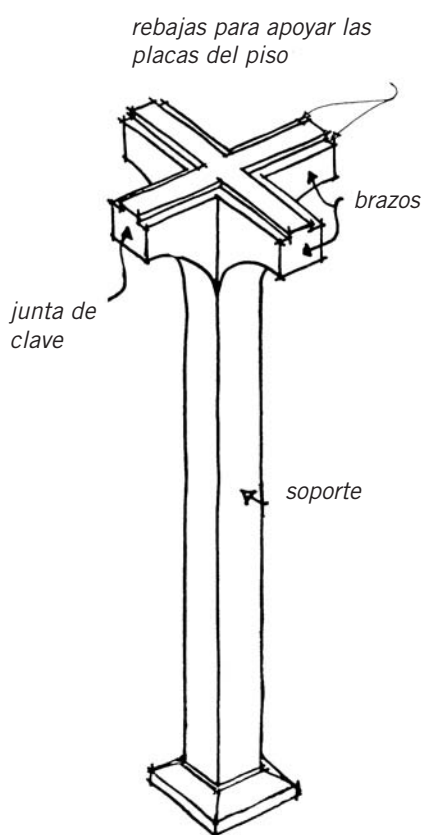
XVI-13b. Puente de Bayonne, Nueva York. Ingeniero O. H. Amann. Fotografía de «Arch. of Bridges», E. B. Mock.



tiene que ser soportada por las pilas, con unas flexiones tanto mayores cuanto mayor es su altura. Por eso, a medida que aumenta ésta, la luz de los arcos tiende a disminuir. Pero, al mismo tiempo, se aumenta, con ello, el número de pilas. Así, pues, la elección de la luz óptima se hace un poco difícil de fijar y suele requerir tanteos en cada caso particular. Si las posibles desigualdades de la sobrecarga viva, de un tramo a otro, son pequeñas, las luces podrán ser grandes; tal es el caso de los acueductos, en los que las flexiones de las pilas son nulas.

En viaductos altos, las arquerías múltiples, con tímpanos macizos, muy propias de la piedra, presentan el inconveniente de su gran rigidez, lo que provoca fácilmente su agrietamiento si quieren repetirse en hormigón. Tanto es así que el viaducto de la figura XIV. 14 y III. 3 en el que, por diferentes razones, se adoptó este tipo con luces pequeñas, el proyectista prefirió cortar todos los arcos en clave y convertir la obra en una serie de pilastras con cuatro ménsulas sobre las que apoyan placas cuadradas de hormigón armado. En otro caso (fig. VII. 7), se triarticulaban las bóvedas rigidizadas por los tímpanos, independizando éstos entre sí del resto del muro.

Todas estas dificultades, y los encarecimientos que llevan consigo, han hecho que la arquería múltiple de mampostería, que se reprodujo mucho en el siglo pasado, haya ido sustituyéndose, con el hormigón, por series de arcos más elásticos y de mayor luz, arrancando del terreno (fig. XIV. 15).



XVI-14. Viaducto de Cantarranas, en Madrid. Arquitecto A. Aguirre. Ingeniero E. Torroja. Fotografía S. v. Kaskel.

XVI-15. Viaducto de Squirrel Hill, Pittsburg De la «Tech. des Travaux».



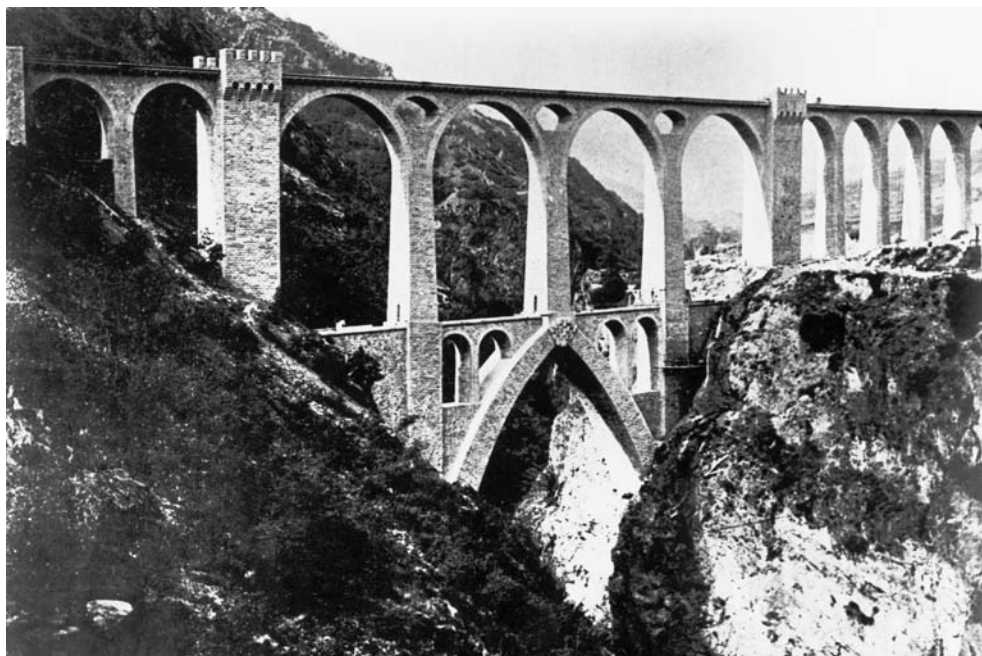
Pero, cuando la mampostería resulta económica, la clásica arquería múltiple vuelve por sus fueros.

Los nobles y serenos ejemplos de este tipo, desde los acueductos romanos (fig. I. 1) con sus pisos de bóvedas intermedios para arriostrar las pilas y ahorrar andamiajes, hasta los grandes y eternamente satisfactorios de Séjourné, siguen pregonando la lógica perfección del tipo. Otros materiales han venido a superarlos hoy en atrevimiento y en economía; pero, siempre que las condiciones locales permitan económicamente el empleo de estos materiales, el ingeniero volverá a repetir los mismo tipos.

El viaducto de Font Pedrouse (fig. XIV. 16) con su gran arco apuntado, para salvar la profundidad del valle, siguiendo, con sus dos brazos, el funicular que produce la carga de la pila que apoya en clave, y los pesos de los propios brazos, unido al conjunto de arcos menores sobre el ritmo de pilastras verticales subiendo por las laderas, podría servir de razonado y sazonado emblema de toda la técnica constructiva de una época que ha sabido vivir con dignidad y a la que los técnicos de hoy deben más de lo que muchos de ellos creen.

Los materiales, los medios y la técnica actuales son diferentes y sus posibilidades mayores ciertamente. La ligereza del puente colgante de San Francisco con sus aceros especiales, la grandiosidad del arco de hormigón armado de Sandö (fig. VII. 3), la fuerza de la gran viga soldada de alma llena de Colonia y las sutilezas del hormigón armado en Esbly que inician un nuevo camino a la prefabricación, son éxitos de los que puede enorgullecerse la generación actual, pero que el proyectista ha de mirar con cuidado de no vender a la vanidad las sencillas ventajas de otros tipos clásicos, más modesto, que continúan y continuarán mucho tiempo compitiendo con los otros en los problemas de cada día, que siguen, con mucho, siendo los más.

Ahora bien, cuando las condiciones particulares exijan y permitan la gran luz, habrán de utilizarse las posibilidades del hormigón armado con sus grandes arcos; e igual que ocurría con las vigas, es solamente la razón económica la que limita sus luces, inclinando la balanza hacia el arco metálico por su menor peso muerto y su mayor facilidad de montaje y ahorro de cimbra. Sus tipos esenciales no se diferencian mucho de los de hormigón armado, aparte de su natural tendencia a la triangulación. Con



XVI-16. Viaducto de Font Pedrouse. Ingeniero P. Séjourné De «Grandes Voûtes».

ellos, se han construido ejemplos como los de Sídney y Bayonne, en New York, llegando a los 510 metros de luz (fig. XIV. 13b).

Y, en fin, cuando se alcanza o se trata de sobrepasar estas luces, las secciones resultantes, con sus grandes pesos en montaje y las esbelteces de las piezas en compresión, vuelven a ir limitando, complicando y encareciendo la solución. Las influencias del pandeo empiezan a proscribir la compresión en los grandes elementos fundamentales; y, ante la exigencia de aprovechar al máximo el material y de utilizar las ventajas de afinamiento que ofrecen las barras en tracción, el proyectista se ve obligado a dar la vuelta al arco y pasar al puente colgante para alcanzar las máximas luces. Por eso el Golden Gate...

El lector puede seguir la lectura del texto en la página 199, mientras el autor pasa al capítulo siguiente.

Funcionalismo estático-resistente

Visto, así, el panorama de las estructuras, en tan rapidísima ojeada que sólo permite apreciar las agrupaciones fundamentales de los elementos y conjuntos estructurales y las razones intrínsecas que les han hecho nacer y evolucionar, bueno será, antes de considerar cuestiones de otros órdenes, como el proceso de ejecución o la expresión estética, espigar en ese campo lo que la función estática y resistente, aplicada a cada material, imprime a la estructura. Porque, principalmente en ello tiene que fundar el proyectista su elección del tipo de estructura y el trazado completo de ésta.

A lo largo de los capítulos anteriores han ido apareciendo ideas, observaciones y tendencias, como dispersas y encontradas al azar, pero que responden, en realidad, a unas leyes y direcciones generales que esperan el genio capaz de organizarlas y sintetizarlas en una teoría general. Su complejidad es tan grande y su heterogeneidad tan diversa que habrán de esperar probablemente mucho tiempo antes de que eso ocurra. Sólo se puede ahora dar opiniones sueltas y vagas que, sin ninguna ambición de unidad sincrética ni de valor apodíctico, sirvan, tan sólo, para destacar y fijar algunas ideas fundamentales, nada nuevas ciertamente, pero sí menospreciadas a veces; por lo que, traídas a primer plano, son siempre interesantes de reconsiderar, aunque sólo sea para sentir la satisfacción con que se adhiere a ellas el espíritu y el hábito técnico del proyectista que rara vez se para a reflexionar sobre las causas y leyes generales que han guiado y modelado su propio hábito.

En primer lugar, no ha de olvidarse que la estructura, en definitiva, ha de ir a buscar en el terreno su firmeza, obligándole a reaccionar de forma que equilibre el conjunto de pesos y empujes que obren sobre aquélla. Y en cuanto hay empujes, esto requiere un peso y un brazo estabilizante sobre la sustentación, pues, el anclaje en el terreno, es, en general, más difícil y costoso de lograr.

En cuanto a la resistencia, el problema consiste en transmitir las fuerzas actuantes, hasta equilibrarlas con las reacciones de la sustentación, a través de los esfuerzos internos que se produzcan en los diferentes elementos de la estructura; y ha de lograrse esto, con la máxima economía, sin interferir las exigencias funcionales o, mejor dicho, coadyuvando a ellas lo más posible.

Prescindiendo, ahora, de razones constructivas, estéticas y funcionales, parece que, en principio, podría decirse que la estructura debe lograr esa transmisión de esfuerzos con el mínimo de material a igualdad de los valores de las tensiones; o bien lograr, con el mismo material, reducir las tensiones aumentando, así, la seguridad y tranquilidad de la obra.

Esto ha de lograrse teniendo en cuenta que, muchas veces, por razones funcionales, aparecen determinados elementos que, utilizados en el fenómeno resistente, pueden permitir una ventaja o una economía mayor que si esos elementos se dejan de

relleno, sobrepuestos a los de la propia estructura que, en sí sola, pudiera ser más económica, pero que no lo resultaría sumada al costo de los otros elementos.

Las estructuras pueden agruparse en lineales, superficiales, o de macizos de tres dimensiones relativamente comparables entre sí.

Entre las primeras, deben distinguirse las trianguladas, en las que el elemento fundamental es la barra recta trabajando en tracción o compresión simple. Aun cuando en ella aparezcan flexiones por efecto de la rigidez de los nudos, este fenómeno es secundario; y conviene reducirlo al mínimo porque, si bien ayuda al fenómeno resistente, esta ayuda es pequeña respecto a la resistencia y rigidez que establecen los esfuerzos axiales; y produce concentraciones de tensión demasiado elevadas para el beneficio que reportan.

En grupo aparte están las estructuras porticadas, formadas de pórticos simples, múltiples y superpuestos, típicas de la edificación, que se imponen por la necesidad funcional de aprovechar al máximo el espacio libre entre los pisos horizontales y los muros de fachada o los tabiques interiores de relleno.

En estas estructuras —llamadas también trapeciales—, la transmisión de esfuerzos, que requiere el equilibrio, no puede hacerse, ya, por componentes axiales solamente; se requiere el trabajo de flexión, dando lugar, en general, a estructuras hiperestáticas por efecto de sus múltiples anastomosis.

Los arcos, o los pórticos poligonales que se les asemejan, son estructuras de tipo intermedio en las que el trabajo de flexión se superpone al de compresión, en proporción variable con la excentricidad de su directriz respecto a los funiculares de las cargas que han de soportar. Cuanto más se aproximen estos funiculares a la directriz, tanto menor será la flexión y tanto más justificado estará el empleo del arco.

Entre las estructuras superficiales, cuyo elemento fundamental o general es la lámina, interesa distinguir los dos fenómenos tensionales, el de flexión por una parte o el de tipo de laja por otra, cuyo comentario es esencial para obtener las grandes ventajas que estos elementos ofrecen con los materiales modernos adecuados-resistentes, como es el hormigón armado.

La placa es el elemento superficial cuyo trabajo fundamental es el de flexión. Es el caso de las placas circulares o rectangulares sustentadas sobre el contorno y soportando cargas normales a su plano. Estas placas requieren el espesor necesario para soportar la flexión análogamente al trabajo de una viga.

Por el lado opuesto, están las membranas y, como caso particular más sencillo de componer, la laja; por ejemplo, la pared vertical, de gran altura respecto a la separación de apoyos, soportando su peso propio y los sobrepuestos a ella. El trabajo típico de la viga, de pequeño canto respecto a la luz, queda aquí totalmente alterado y sustituido por el representado por otro plexo tensional totalmente diferente. Son, pues, elementos de gran rigidez que permiten soportar grandes cargas con pequeñas tensiones y reducidas armaduras.

El mismo fenómeno resistente se produce en ciertas membranas curvas, capaces de establecer un equilibrio isostático con esfuerzos situados sobre la propia superficie de la membrana; los cuales, en consecuencia, ofrecen la misma ventaja de rigidez y buen reparto de tensiones, con lo que el espesor y la armadura resultan, en general, pequeños.

El caso intermedio es el general de la lámina en la que, a los esfuerzos primarios situados en el plano tangente a la misma, han de superponerse los de la flexión de ésta —como en una placa—, para poder asegurar un equilibrio de carácter endo-hiperestático.

Es evidente que el equilibrio de la membrana es más económico, en cuanto a las cantidades de material empleado, que el de la lámina; pero, rara vez es posible disponer la estructura de modo que aquél se alcance. Y, por otra parte, lo mismo que en la estructura triangulada (no perfectamente articulada) no pueden hacerse desaparecer totalmente las flexiones, tampoco en la membrana dejan de producirse deformaciones acompañadas de ligeras flexiones secundarias.

Las láminas no tienen por qué formar un esqueleto revestido por los elementos de relleno que la función utilitaria o estética requiera establecer y sostener; sino que, con su superficie continua, pueden sustituir o propiamente constituir esos elementos; y su utilización interesa, al menos en principio, siempre que esto pueda ser así. Sin embargo, hay casos en los que es preferible sustituir la lámina continua, normalmente de hormigón armado, por una celosía triangulada (figs. VIII. 8 y 16) más ligera y económica en estructura metálica, y sobre la cual insista el material de cierre e impermeabilización como elemento superpuesto.

Por último, el macizo de tres dimensiones —que comporta siempre el gran volumen a que conduce el producto de éstas—, encontrará utilización económica cuando interese fundamentalmente obtener una estabilidad ponderal, difícil de alcanzar de otro modo; tal es el caso de las presas de gravedad.

Volviendo a las estructuras lineales, sean tridimensionales, en las que la discusión es más fácil, se observa que el trabajo de una pieza siempre puede descomponerse en tracción, compresión, flexión o torsión.

Solamente en el caso de un tirante, o de una pieza corta en compresión, puede lograrse que todos los elementos diferenciales, que forman su masa, estén aprovechados al máximo trabajando todos por igual. En cuanto la esbeltez de la pieza en compresión es algo grande, su aprovechamiento resistente viene limitado por el peligro de pandeo que aumenta con el cuadrado de esa esbeltez. Interesa, por consiguiente, mantenerla dentro de límites convenientes, reduciendo la longitud libre, entre puntos de arriostamiento de estas piezas comprimidas; y aumentar el momento de inercia de la sección, a igualdad de área, con secciones huecas y rígidas.

En la flexión, salvo casos muy particulares, se superponen necesariamente dos fenómenos diferentes: el de la flexión propiamente dicha, que produce las tensiones longitudinales máximas en las fibras extremas y nulas en la neutra; y el esfuerzo cortante, cuyas tensiones son máximas en ésta y nulas en aquéllas, y cuyo valor absoluto es corrientemente mucho menor. Ambas varían también a lo largo de la pieza, llegando a anularse en ciertos puntos de la directriz.

No es posible, por consiguiente, aprovechar totalmente la resistencia de una pieza de sección rectangular; y, aun con las ventajas que en este sentido ofrece la sección en I, tampoco el aprovechamiento es completo a todo lo largo de la pieza; por otra parte, las tensiones longitudinales, al tener que equilibrar las fuerzas exteriores con un brazo mucho menor que el que presentan éstas, resultan elevadas; y tanto más cuanto mayor

es la esbeltez de la pieza. Por eso, en cuanto se trata de grandes esfuerzos, la viga tiende a descomponer y diferenciar sus elementos resistentes para convertirse en una viga triangulada. Por último, no hay que olvidar que también las zonas comprimidas pueden producir el pandeo de la pieza.

Puede, pues, decirse, con cierto carácter de generalidad, que el trabajo de flexión es más caro que el de compresión y éste más que el de tracción, y que el encarecimiento es tanto más grande cuanto mayor es la esbeltez de la pieza. Precisamente por esto último, la influencia perjudicial del pandeo se acusa más con materiales de alta resistencia, como el acero.

Realmente, en las estructuras modernas, con materiales aptos para resistir cualquier género de esfuerzo, no se emplean más piezas en tracción que en compresión porque de lo que se trata, generalmente, es de equilibrar pesos o fuerzas dirigidas, desde puntos elevados, hacia el terreno inferior y, en ese caso, los soportes en compresión o sus análogos resultan imprescindibles.

Pero, si en una viga triangulada han de ir diagonales y montantes a tracción y a compresión, es preferible que los montantes más cortos sean los encargados de la compresión, y las diagonales más largas queden a tracción. Y del mismo modo, cuando de luces muy grandes se trata, el acero comprimido deja el paso al cable colgante, aunque éste requiera dos torres en compresión, porque éstas son de longitud mucho más corta. No es sólo el aligeramiento, que permite el cambio de material, lo que decide la cuestión, sino también la influencia del pandeo, entre otras cosas más.

En cuanto a la torsión, tampoco este tipo de esfuerzo aprovecha bien el material ni es económico, por lo que se procura evitarla. Sólo las formas huecas y, en especial, la sección circular, de pequeño espesor frente al diámetro, permite el aprovechamiento integral del material a torsión.

Pero, no es sólo este factor económico el que aconseja, en principio, una u otra forma de trabajo y uno u otro tipo de estructura; influye también su diferente deformabilidad. No es sólo resistencia, sino también fijeza, lo que piden, a la mayoría de



XV-1 Refrigeradores de la Wolsall Power Station, Staffs. Fotografía Craftsmen, Ltd.

las construcciones, quienes, no siendo aviadores ni marinos, prefieren andar por tierra firme. Pero, aparte de esta condición que limita, por ejemplo, la esbeltez de las vigas de piso por la flecha máxima aceptable, hay que tener siempre en cuenta que la función resistente tiende a ser absorbida, más que por las piezas que ofrecen más resistencia, por las que ofrecen mayor rigidez; porque las tensiones no pueden producirse sin las deformaciones consiguientes. Así, se comprende que, si dos vigas cruzadas han de soportar una carga, ésta es absorbida, en su mayor parte, por la más rígida de aquéllas; porque la otra necesitaría, para ello, tomar mucha más flecha.

Del mismo modo, en una viga de dos tramos, una carga, concentrada a plomo del soporte central, es absorbida por éste en su totalidad, porque la elongabilidad del soporte le proporciona mucho menor corrimiento que el que tomaría la viga en flexión bajando sola sin la coacción de este soporte.

Análogas consideraciones pueden hacerse con las láminas, si bien, en ellas, los tipos de esfuerzo son más complejos. Bajo la acción de compresiones según el plano tangente, aparece el mismo peligro de pandeo lateral que exige, para contenerle, nervios de rigidez; lo mismo que el alma de una gran viga metálica —que es una lámina plana— exige rigidizadores para no pandear en pliegues, por efecto de las compresiones producidas por el esfuerzo cortante.

Las láminas, en las que se superponen los esfuerzos tangentes o de laja con los de flexión transversal, requieren frecuentemente mayores espesores (o la ayuda de nervios), para soportar éstos, que para resistir aquéllos; y su rigidez es mucho mayor tangencialmente a su superficie que normalmente a ella.

Por todo ello, conviene aprovechar siempre las láminas o las vigas de gran canto, que funcionalmente se ofrezcan, para transmitir económicamente, a través de ellas, las cargas que se presenten.

Asimismo es, en general, más económica y más rígida una estructura o una viga triangulada, con pocos secundarios, cuyas barras trabajan todas a tracción o compresión, que una porticada o una Vierendeel en las que el trabajo de flexión de sus piezas es necesariamente importante. Y por eso, estas últimas soluciones suelen reservarse para aquellos casos en los que las exigencias funcionales proscriben la triangulación.

Una estructura rígida es, en general, más recomendable que otra más deformable; no sólo por lo que se acaba de decir, sino también porque la deformabilidad excesiva resulta, en muchos casos, incómoda de utilización, tanto por sus movimientos bajo el efecto de cargas móviles o accidentales como por su tendencia a tomar períodos bajos de resonancia con efectos dinámicos perjudiciales; y también porque la deformabilidad conduce frecuentemente a esfuerzos secundarios importantes.

El efecto secundario —por ejemplo, el que se produce en una viga triangulada como consecuencia de los acortamientos y alargamientos elásticos de las barras que forman cada triángulo, con nudos no articulados—, viene siempre a realizar un trabajo resistente que descarga la estructura de los esfuerzos primarios; pero, la disminución de tensión primaria es mucho más pequeña que el aumento de las tensiones que introducen los secundarios. Por consiguiente, interesan tipos de triangulación, proporciones y disposiciones en los que estos secundarios sean los menores posibles. Triangulaciones, con

ángulos muy agudos o muy obtusos, piezas pequeñas y cortas empotrando en otras grandes y deformables, etc., son casi siempre causa de fuertes concentraciones de tensión.

Toda concentración local de tensiones es peligrosa y acusa un defecto de concepción, porque el trabajo resistente es función del cuadrado del esfuerzo por la longitud en que actúa; y, por consiguiente, una tensión fuerte, en una zona corta, tiene muy poco valor en el conjunto resistente, mientras que el peligro de fallo, que lleva consigo, puede arrastrar el de todo el conjunto estructural. Dice un proverbio inglés, tan viejo como las cadenas –que deben serlo mucho–, que éstas no tienen más resistencia que la de su eslabón más débil; y hay que evitar, por consiguiente, que la estructura presente puntos francamente débiles en proporción con los otros.

Precisamente por eso, el estudio de los enlaces tiene una importancia primordial, porque es, en ellos, donde es más fácil encontrar concentraciones peligrosas de tensión al alterar fuertemente el estado tensional; y poco recomendables son, igualmente, muchas de las disposiciones que, a veces, se adoptan por economía y facilidad de construcción y que dejan la posibilidad de huelgos o movimientos de unas piezas respecto a otras bajo la acción de ciertas cargas, aunque sean anormales. Porque, lo grave, más que la rigidez o la deformabilidad conjunta homogénea de todos los elementos de la estructura, es la coyunda de unos elementos rígidos con otros muy deformables.

La rigidez presenta, sin embargo, inconvenientes que hay que sopesar en cada caso, y que proceden de la mayor dificultad de adaptación que impone respecto a las deformaciones térmicas, de retracción, etc.; pues, las tensiones producidas por estos fenómenos, aumentan con la rigidez. Ellos tienden a producir una deformación, y la tensión se produce por la coacción que a ese movimiento le impone la propia rigidez de la estructura. Entre dos empotramientos firmes es fácil montar un arco; pero, es prácticamente imposible establecer una viga recta, porque su gran rigidez produce, por efecto térmico, tensiones y empujes demasiado fuertes.

Por eso, es necesario multiplicar las juntas de dilatación y contracción, tanto más cuanto más rígida es la estructura y más indeformable sobre sus apoyos. Los arcos de hormigón armado pueden alcanzar cientos de metros de luz sin junta; mientras que un muro macizo, empotrado sobre el terreno en toda su longitud, las pide a muy pocos metros una de otra.

Relacionado con este tema de la deformabilidad y de las juntas y articulaciones, está el del isostatismo o hiperestatismo. Mucho se ha hablado de las ventajas y desventajas del isostatismo frente al hiperestatismo de las estructuras. Hoy día, la mayor parte de éstas son, en realidad, hiperestáticas, sin que esto quiera decir que las de la antigüedad no lo fuesen también.

La estructura hiperestática tiene, en principio, la ventaja, sobre la isostática, de que una pieza cargada se ayuda más, en su trabajo, por el de las contiguas. Cada una de ellas puede, por consiguiente, ser menor que si tuviese que soportar, por así decir, por sí sola, las cargas que sobre ella insisten directamente. Por ejemplo, una viga de puente grúa, de varios tamos independientes, es isostática; cada una de las vigas, al pasar la carga rodante sobre ella, soporta íntegramente la flexión consiguiente; por el contrario, si la viga es continua, las contiguas y siguientes sufren también flexiones

que tienen por efecto disminuir las máximas del tramo cargado. La sinergia del conjunto es mayor; y esto, en general, es una ventaja.

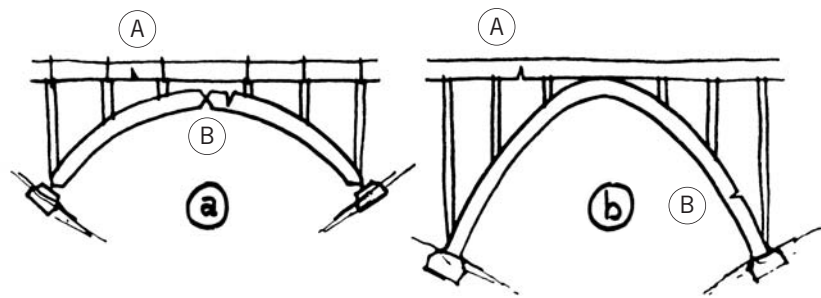
Por tanto, mientras el hiperestatismo permita el aprovechamiento más integral de los elementos necesariamente existentes, conduce a una mayor rigidez y a una mayor economía del conjunto.

Ahora bien, la estructura hiperestática, que proporciona estas ventajas, es más exigente que la isostática en cuanto a las condiciones de sustentación y de enlace. Un falso movimiento de un apoyo no altera sensiblemente el equilibrio de la estructura isostática, mientras que puede dar lugar a la rotura en la hiperestática.

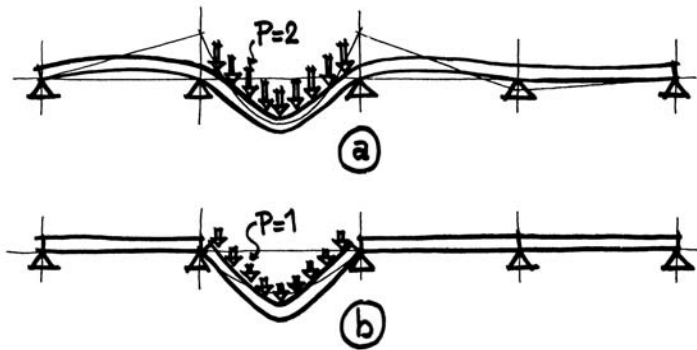
En cambio, esta última suele adaptarse mejor a soportar efectos anormales para los que no estuviese proyectada. En caso de rotura de un elemento dentro de una estructura isostática, pueden darse dos casos: que la rotura sólo interese a ese elemento cuya desaparición no pone en peligro el resto de la estructura (una vigueta A en fig. XV. 2a); o que la rotura arrastre consigo otros elementos (una de las piezas B del arco). Si la estructura es continua o hiperestática (fig. XV. 2b), la rotura A cambia el trabajo de la viga continua, la cual sufrirá, en otros puntos, flexiones mayores que antes de la rotura de A. Pero estos aumentos de flexión, por lo general, quedan dentro del margen reservado al coeficiente de seguridad, indicando, con ello, una clara ventaja a favor del hiperestatismo.

Igualmente la rotura en B puede producir aumento de esfuerzos en el resto del arco que lleguen a causar el hundimiento total de éste, si la rotura B fuese completa; pero, probablemente, no se producirá si la rotura es incompleta y deja el arco como articulado en B. Los aumentos de esfuerzo, producidos en el resto de la estructura, le permiten continuar resistiendo y dar tiempo a la reparación. Es decir, el hundimiento no es obligado e inevitable como en el caso del arco isostático.

La diferencia puede acusarse todavía más cuando la estructura y el material acepten deformaciones plásticas. Por ejemplo, una viga continua metálica de alma llena (fig. XV. 3a); en ella, un exceso de carga puede producir la deformación de las secciones de arranque donde la flexión es máxima y, con ello, obtener un reajuste de esfuerzos con un aumento aceptable del momento flector en el centro de esa luz; el hundimiento no se producirá hasta que las tres secciones hayan agotado su resistencia. Por el contrario, si la viga es apoyada (b), la deformación plástica se inicia en el centro sin que el resto de la viga encuentre forma de evitar, con mayores esfuerzos, la continuación del movimiento hasta el hundimiento. Por consiguiente, el valor del coeficiente de seguridad deberá ser marcadamente diferente en un caso y otro.



XV-2. Rotura de arcos isostático e hiperestático.



XV-3. Deformaciones de viga isostática e hiperestática.

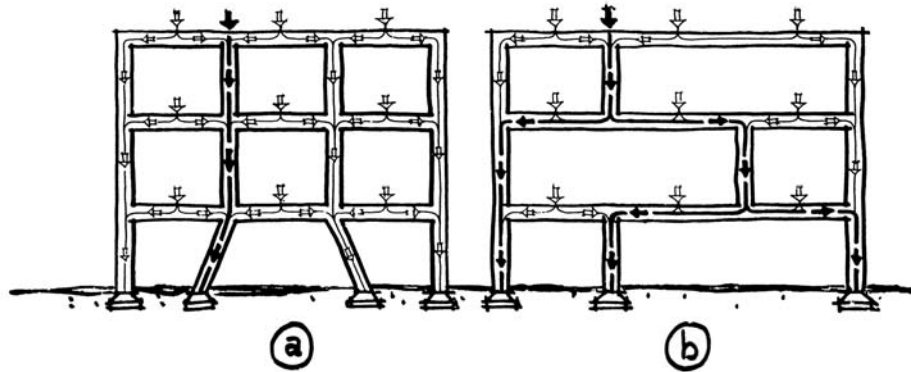
Para elegir entre iso e hiperestatismo, es necesario analizar cuáles son los peligros, qué es lo anormal que cabe prever, y cuáles son los defectos, malos o peores, que de ello se derivarían, en cada caso.

Isostática o hiperestática, la estructura debe estar bien enlazada; es decir, organizada en forma tal que quede suficientemente asegurada contra posibles eventos. Las estructuras no se construyen para ser bombardeadas ni para que Plutón se divierta en sacudir sus cimientos; pero, aun sin llegar a extremos tan drásticos, hay que contar con que otros, más fáciles, se pueden producir; y la estructura ha de poder soportarlos localizando los daños lo más posible. La estructura de edificación para vivienda en varios pisos, formada por unos muros paralelos de crujía, sobre los que apoyan, simplemente o con escaso empotramiento, las viguetas de los pisos, es una estructura poco o nada atada; le falta monolitismo y arriostramiento. Carece, por así decir, de tenacidad para resistir los esfuerzos y deformaciones a que puede estar sometida por efectos anormales: desiguales asientos de un muro con tendencia al vuelco, succiones de viento sobre la fachada, etc. Se imagina la facilidad con que puede desarmarse y caerse como un castillo de naipes, frente a otra en que la unión de viguetas y muros se verifique con buenos anclajes mediante carreras, de hormigón armado por ejemplo, ligeras, pero bien atadas con las viguetas y formando pórtico con los muros; y mejor todavía, si se añaden algunos muros, normales a los anteriores, que cierren la planta y hagan de llaves entre los de crujía. Una carrera de contorno, a modo de arrocabe, enlazando todos los elementos verticales que lleguen a la última planta de un edificio, es siempre un seguro contra veinte mil causas y efectos de los que el cálculo no sabe nada.

En fin, lo que interesa, funcionalmente, es que la transmisión de esfuerzos —que desde los puntos de aplicación de las cargas hasta los de reacción, hace posible el equilibrio— sea sencilla, clara, sin retorcimientos; pudiera decirse sin incomodidad. Esta es una propiedad que se acusa en toda estructura verdaderamente satisfactoria y en todos los tipos clásicos de lógico funcionalismo resistente.

La estructura a) (fig. XV. 4) siempre será, resistentemente, mejor que la b). Los movimientos tensionales son menores, los esfuerzos también, y el trabajo de flexión menor, lo cual siempre es una ventaja; pues, como se ha dicho, los trabajos de compresión o tracción axial dan, en general, piezas más económicas que los de flexión. Se comprende que la estructura a) resiste mucho más cómodamente y ha de quedar más

XV-4. Estructuras cómoda e incómoda.



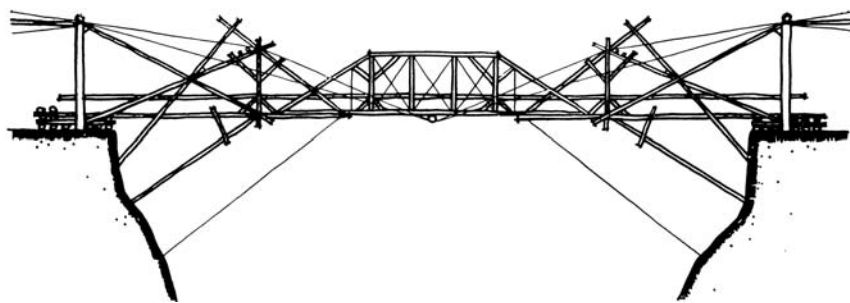
agradecida a su procreador que la b), que presentará, respecto a la a), las mismas características de retorcimiento que un jorobado respecto a un hombre normal.

Una estructura clara o limpia, constituida por un corto número de tipos de elementos, con función resistente bien definida en cada uno de ellos, acusa claramente, al ojo de un técnico experimentado, el fenómeno tensional del conjunto de la estructura y de cada uno de los elementos dentro de ella.

Esto no quiere decir que un mismo elemento no pueda tener dos funciones resistentes simultáneas, como, por ejemplo, en hormigón armado, el forjado que, al mismo tiempo que trabaja a flexión entre viguetas, constituye la cabeza de compresión de éstas. Ello, por el contrario, es siempre ventajoso, al menos en principio, porque permite un doble aprovechamiento del material.

Pero, aquellas estructuras en las que los elementos se acumulan, dando la sensación de que ha sido necesario ir añadiéndolos a medida que se temía la insuficiencia de los otros, como albarda sobre albarda (fig. XV. 5), acusan siempre una intranquilidad y un defecto de sinergia estructural, que conviene evitar por todos los medios.

Siempre, una estructura con pocos elementos y robustos da una sensación de seguridad y de tranquilidad —de cosa bien lograda—, mejor que otra formada por una multitud de elementos y elementitos empalmándose y cruzándose para formar la estructura. Claro está que el material manda, más que nada, sobre esta escasez o multiplicidad de elementos; pero, dentro de cada tipo estructural propio de un material, el principio es válido con caracteres de generalidad.



XV-5. Puente de Ahwillgate, India.

Y para terminar este capítulo, bueno será recordar una vez más, que el material es esencial en la estructura y uno de los más acusados determinantes de toda su morfología. Así, la piedra o el ladrillo son indicadísimos para ser utilizados en elementos a compresión, muros, gruesas pilastras, contrafuertes, arcos, etc., que permiten o requieren constructivamente espesores grandes.

Estos materiales inducen, por consiguiente, hacia estructuras macizas de apoyos continuos, o a las soluciones de arcos, bóvedas o cúpulas con las que tantas obras maestras se hicieron en casi todos los estilos arquitectónicos.

El técnico actual, y en especial el ingeniero, menosprecian excesivamente el ladrillo, tan propio de ciertas regiones, y en el que tanta perfección pusieron los artífices de siglos pasados.

Si, por el contrario, la naturaleza brinda las gravas y arenas, o la piedra oportuna para obtenerlas económicamente, llevará probablemente ventaja el sustituir los macizos y las superficies continuas, de ladrillo o de piedra, por otras de hormigón, salvo en espesores demasiado pequeños en los que el doble encofrado haga encarecer excesivamente la unidad.

El hormigón armado y la misma rasilla son los materiales indicados para las estructuras laminares, placas y membranas. Para cubiertas con luces no demasiado grandes, las membranas de rasilla o bóvedas tabicadas, sin tracciones, son muy económicas por no requerir encofrados (fig. XIII. 5); y con ligera armadura, admiten también estas tracciones.

Con el hormigón, es preferible ir a cuantías bajas que altas. Una estructura con cuantías de armadura demasiado elevadas, está, salvo casos excepcionales, señalando la conveniencia de transformarla en estructura metálica. En hormigón armado, las armaduras simétricas para fuertes flexiones con escaso canto, las cuantías altas en piezas comprimidas, los zunchos, etc., son recursos a los que hay que acudir localmente, en caso necesario, dentro de la estructura general de hormigón, cuando ésta, en su conjunto, está bien justificada; pero, no son más que recursos excepcionales de cuyo uso, corriente o extendido en la estructura, conviene huir.

El hormigón es apto para resistir compresiones solamente, y aun tracciones pequeñas o concentraciones en zonas reducidas. Cuando hay tracciones importantes, pero siguen siendo francamente dominantes las compresiones, el hormigón armado se presenta como el material más indicado. Su ventaja principal está en que sus armaduras pueden colocarse allí donde las tracciones las pidan, y orientarse y dosificarse justamente según sus exigencias.

Si el trabajo ha de ser principalmente de tracción, o si la flexión es alternada y obliga a armaduras de tracción por ambas caras, las ventajas del hormigón armado, respecto del acero, vienen muy disminuidas, si no son totalmente falsas.

El hormigón es un material de masa que está pidiendo, para sus piezas, secciones robustas para ser económicas; pues, el aumento de armaduras y el costo de encofrados, cimbras y andamios, borra frecuentemente la economía que, a primera vista, parece que debería obtenerse con la disminución de sus escuadrías. Su heterogeneidad, en fin, le hace también más delicado en espesores pequeños.

Se presta mal a tipos estructurales de gran complicación de encofrado, como, por ejemplo, el de las vigas trianguladas, sobre todo si la malla es pequeña. En ella, la escasa esbeltez de las piezas provoca esfuerzos secundarios que obligan a aumentar los espesores y a agravar el mal.

En fin, el hormigón en tracción tiene siempre tendencia a agrietarse; y, si está sometido a esfuerzos alternativos de tracción y compresión, el peligro es mucho mayor.

El acero, por el contrario, forma estructuras de poca masa, de las que se han llamado «tendinosas», en contraposición con las de masa o «formáceas» del hormigón. Del mismo modo que no puede pensarse en hacer una presa de 100 metros en acero, no se puede tampoco, al menos hoy, pensar en hacer una viga de puente de 300 metros de luz de hormigón armado. Su peso muerto se suma a la sobrecarga, en la determinación de los esfuerzos, y el aumento consiguiente de secciones agrava el defecto en círculo vicioso. Por el contrario, en una presa de gravedad, el peso es el elemento activamente estabilizante; y se busca, por eso, precisamente, un hormigón del mayor peso específico posible.

Algo semejante sucede con las estructuras laminares cuando se requiere una superficie continua por razones funcionales, como en los casos de cerramientos, cubiertas, pisos, etc. El hormigón puede, no sólo formar la estructura sustentante del forjado continuo, sino formar, al mismo tiempo, el propio forjado.

Por otra parte, la facilidad que presenta para trabajar en dos direcciones con el mismo hormigón y dos armaduras cruzadas, como en las placas rectangulares, y la aptitud para soportar todo género de esfuerzos, amoldando su espesor y su cuantía al tipo e intensidad del esfuerzo en cada punto, son ventajas típicas del hormigón armado que aconsejan su empleo cuando el problema planteado se presta a obtener todas esas ventajas económicamente.

Si el hormigón tiende, por su proceso de fabricación, al monolitismo estructural y al enlace empotrado, las estructuras metálicas, en especial las roblonadas, se prestan a enlaces de simple apoyo, como el de las viguetas simplemente puestas sobre los cargaderos. Y los mismos enlaces roblonados presentan frecuentemente cierta deformabilidad, que muchos consideran ventajosa, y que disminuye, en gran parte, la rigidez del enlace, dando lugar a estados intermedios entre los que corresponderían a la estructura monolítica y a la articulada; esta indeterminación, cuyas discutibles ventajas son difíciles de apreciar, puede ciertamente dar lugar a reducciones de esfuerzos secundarios y parásitos en proporciones desconocidas.

Pero todas estas diferencias son, en cierto modo, secundarias y no hay que tener sobre ellas criterios demasiado simplistas. Las rótulas entre piezas de hormigón, con giro relativo pequeño, son fáciles y económicas; la prefabricación se presta igualmente a construir con enlaces de simple apoyo o ligera costura, como en la estructura metálica; y la soldadura, permite, en general, asegurar, con facilidad, la rigidez del enlace y el monolitismo si así se desea.

La diferencia esencial entre el hormigón y el acero está en la masa y la posibilidad del moldeo del uno, y en la ligereza y alta resistencia a compresión y a tracción del

otro, junto a su procedencia laminada. Por eso, el hormigón pretensado y prefabricado se sitúa entre los dos, pretendiendo ganarles a dos manos.

El hormigón será el material de las grandes estructuras que encuentran en su peso la razón de su estabilidad, como es el caso de una presa; y el acero será el de los entramados y triangulaciones para salvar las grandes luces en las que interesa ahorrar peso. De hormigón se hicieron las pirámides de Egipto que, como todos los monumentos funerarios, piden la perdurabilidad lítica y la estabilidad inmovible de las grandes masas, porque nada hay aquí abajo más fijo y duradero que la muerte. Y de hierro se hizo la torre Eiffel en aquellos años del siglo XIX, de optimista florecimiento técnico; porque con nada como el hierro se podía expresar la juvenil pujanza que quiso representar aquella obra, nacida para un día de fiesta y de exhibición, con la misma rapidez y fuerza con que crece el tallo de la pita para culminar en flor.

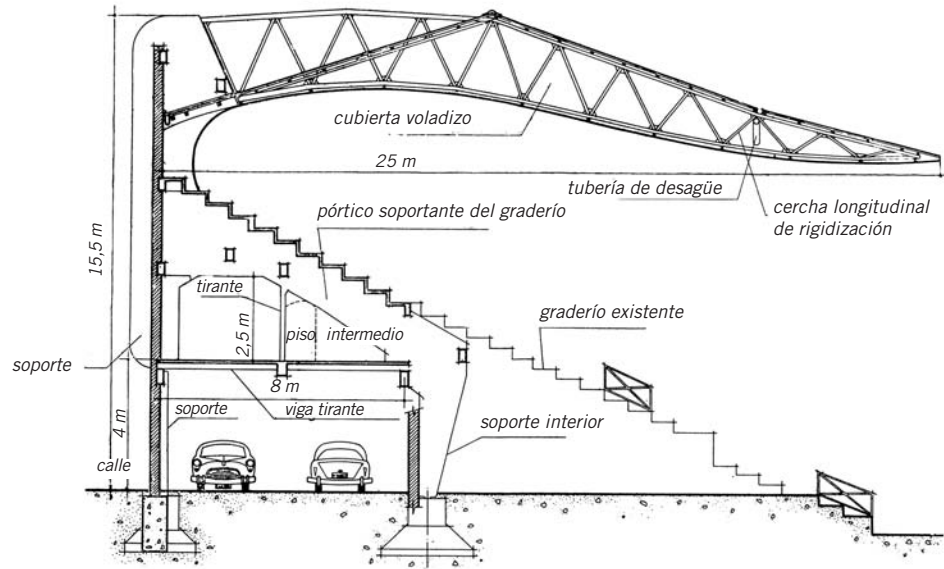
Por eso, cuando se llega a las luces máximas, entran, ya, los aceros de alta calidad para los cables de los puentes colgantes y los metales ligeros para los elementos del tablero. Y si, en general, en cualquier estructura de hormigón, es preferible emplear pocos elementos, robustos y ligeramente armados, el acero, por el contrario, gusta de permitirse el lujo de complicar la malla de sus elementos para lograr, con economía, la máxima ligereza.

No es necesario, sin embargo, elegir un solo material para cada estructura. Puede ser conveniente combinar varios, precisamente como consecuencia de las ideas que se acaban de comentar. Así, por ejemplo (fig. XV. 6), en un puente de viga apoyada con su triangulación bajo el tablero, la cabeza superior está trabajando a compresión, la inferior a tracción y las diagonales alternativamente a una cosa y otra. Por otra parte, la razón funcional, o finalidad de la obra, exige el establecimiento de un piso continuo en el plano de la cabeza superior. El hormigón es el material indicado para este piso, en forma de placa con viguetas y largueros o de simple forjado sobre las



XV-6. Puente de Tordera.
Ingenieros G. Andreu y E.
Torroja. Fotografía: M.
García Moya.

XV-7. Campo de fútbol de Las Corts, en Barcelona.



cabezas de las jácenas principales. Esto lleva, pues, de la mano a utilizar esta estructura de tablero, al mismo tiempo, como cabeza de compresión de la viga, reservando la estructura metálica para la cabeza inferior y para las diagonales.

La cosa, como toda novedad, ha de mirarse con cuidado; pero, no cabe duda que hay una razón clara y lógica que, en este caso, induce a la estructura mixta, parte de estructura metálica y parte de hormigón armado.

Del mismo modo, si en una estructura de tribuna (fig. XV. 7) hay una parte de ménsula de gran vuelo, convendrá utilizar, en ella, materiales ligeros, como pueden ser las planchas onduladas de fibrocemento sobre correas y ménsulas trianguladas metálicas. Pero, el resto de la estructura, con sus forjados de público, escaleras, zonas de circulación y estancia, puede muy bien ser de hormigón; obteniéndose, con esta combinación, una buena economía.



XV-7. Campo de fútbol de Las Corts, en Barcelona.
Arquitecto J. Sagner.
Ingeniero E. Torroja.
Fotografía: M. García Moya.

Procesos de ejecución

El proceso de construcción interesa aquí, especialmente, en cuanto influye en el tipo estructural.

Ya se ha visto la influencia que los sistemas y materiales de prefabricación pueden ejercer en la cuestión, y no es necesario volver sobre ello.

En obras como las de edificación, las exigencias y modalidades del proceso de construcción pueden no influir más que en los detalles de ensamble y cosas análogas; pero, en la gran obra de ingeniería, y especialmente en el gran vano o en la gran superficie por cubrir, las cuestiones de montaje pueden influir fundamentalmente en la definición del tipo óptimo que convenga emplear.

Como no es fácil hacer la taxonomía general de los procesos de ejecución, y lo que interesa es el comentario que ambiente las iniciativas en la mente del proyectista, hay que reducirse a casos o grupos de casos específicos.

Esta vez no se puede cogerlo desde la antigüedad, como en anteriores capítulos, porque faltan datos que serían ciertamente muy interesantes. Siempre se siente curiosidad por saber cómo lograrían los antiguos constructores, sin técnica ni medios mecánicos, manejar monolitos como los de las murallas de Sacsayhuaman o el de la cúpula de Ravena, de 12 metros de diámetro por 2 metros de espesor, traída del otro lado del mar Adriático con sus 300 toneladas de peso; o cómo tallaban y encajaban los artífices góticos una clave entre sus nervios; o cómo pudo hacerse el propio Templo de Salomón, maravilla de organización y de prefabricación, que no requirió, en obra, martillo, ni cincel, ni instrumento de hierro alguno. Aun imaginando formidables masas de esclavos, como los que podían utilizar los reyes mesopotámicos, parece difícil, a los ingenieros de hoy, realizar sus construcciones con los escasos medios técnicos que muestran los bajorrelieves asirios que atraen las miradas de los técnicos en el British Museum.

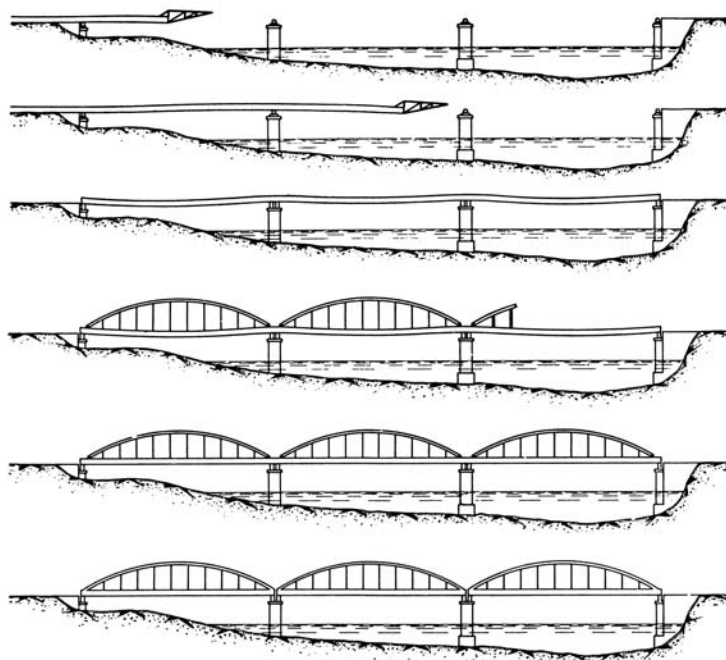
Uno de los casos generales, en que el proceso de ejecución puede influir más sobre la elección del propio tipo estructural, es el puente de grande o mediana luz. En acero, el problema es, en general, más fácil que en arcos de fábrica; porque, para una edificación o incluso para una cercha de nave industrial, no es necesario, en el proyecto, preocuparse de la influencia del proceso en el tipo estructural. Pues se cuenta con que el constructor siempre tiene las grúas, cabrestantes, etc., necesarios para subir esos elementos.

Los medios actuales de transporte, elevación y montaje permiten —y así conviene hacerlo siempre que se pueda— fijar, en el proyecto el tamaño de las piezas más convenientes para combinar económicamente su transporte con los medios auxiliares de que va a disponerse (camiones, grúas, etc.), engranando los tiempos de sus operaciones de forma que todas ellas vayan al unísono con el máximo rendimiento de la maquinaria y de la mano de obra.

Pero, cuando la luz es relativamente grande, la consideración del proyecto de ejecución, en relación con los medios auxiliares que exige, se hace fundamental. Se han construido, ya, puentes con aleaciones ligeras de forma que la estructura completa pudiera elevarse con grúas de regular potencia, reduciendo al mínimo la mano de obra del montaje, siempre más cara que la de taller. El sobrecosto del nuevo material, respecto al acero clásico, puede muy bien quedar compensado de sobra con esta economía de montaje, que, naturalmente, será tanto más apreciable cuanto mayor sea el número de tramos iguales para permitir el trabajo en serie dentro del taller y en la obra misma.

Sin llegar a estos extremos, es corriente, para evitar el coste de la cimbra, hacer los tramos sobre la vía de acceso, según el eje del puente, y lanzarlos longitudinalmente, sobre bicicletas, a su posición definitiva (los corrimientos transversales se emplean corrientemente, más que por razones de economía, para poder hacer el paso, a la vía definitiva, en pocos minutos, sin interrumpir el tráfico en puentes de ferrocarril). En el caso de lanzamiento longitudinal es, ya, necesario, en el proyecto, tener en cuenta cómo va a hacerse ese lanzamiento y cómo va a resistir la estructura en todas y cada una de las posiciones intermedias; es decir, con tramo descargado y con un pescante tal que permita alcanzar, en voladizo, la pila siguiente sin exceso de flexión.

Todos éstos, como se ha dicho antes, son métodos clásicos y bien conocidos; pero, pueden citarse casos especiales, como el del puente de la figura XVI. 1. En él, la estructura más conveniente se consideró ser un arco atirantado con pendolones verticales sin diagonales, por razones que no son del caso ahora. Pues bien, como es sabido, la rigidez que se requiere para soportar la flexión por desigualdad de sobrecarga, se puede



XVI-1. Construcción de un puente de varios tramos.

obtener en el arco o en el tirante indistintamente. Aquí, para evitar la cimbra, se hizo rígido el tirante, que formaba una viga continua de tres tramos en doble T soldada. Con ello y con un ligero pescante se logró hacer la viga en trozos, de largo conveniente, empalmados en la alineación definitiva sobre el terraplén de avenida y se fue haciendo el lanzamiento de la pareja de vigas solas, con unas pocas traviesas para rigidizar el conjunto. Una vez hecho el lanzamiento completo, la viga tenía la rigidez necesaria, como viga continua, para montar sobre ella los arcos, también de palastros soldados y, por tato, relativamente ligeros. Aun así, el peso propio de la viga y el de los arcos daba lugar a flechas en la primera, que era necesario corregir. Por ello se dejaron los arcos con articulaciones provisionales sobre las vigas tirantes, y los pendolones llevaban tensores de rosca. La simple maniobra de éstos llevó las vigas a su posición exacta, sin flexión, colgando de los arcos. Una vez logrado esto, bastó soldar arco y viga y cortar con soplete la continuidad de las vigas sobre las pilas, para que cada tramo trabajase independientemente.

Se ha citado esta obra, entre otras, por ser un ejemplo claro de cómo el proceso de ejecución permite abaratar la obra cuando la estructura está pensada de acuerdo con él y para soportar todos los esfuerzos de la operación. Si en vez de dar la rigidez al tirante se le hubiese dado al arco, nada de esto hubiera sido posible.

Estos tipos de proceso y facilidades de montaje, obtenidos gracias a una apropiada elección del tipo estructural y de sus detalles, son de fundamental interés.

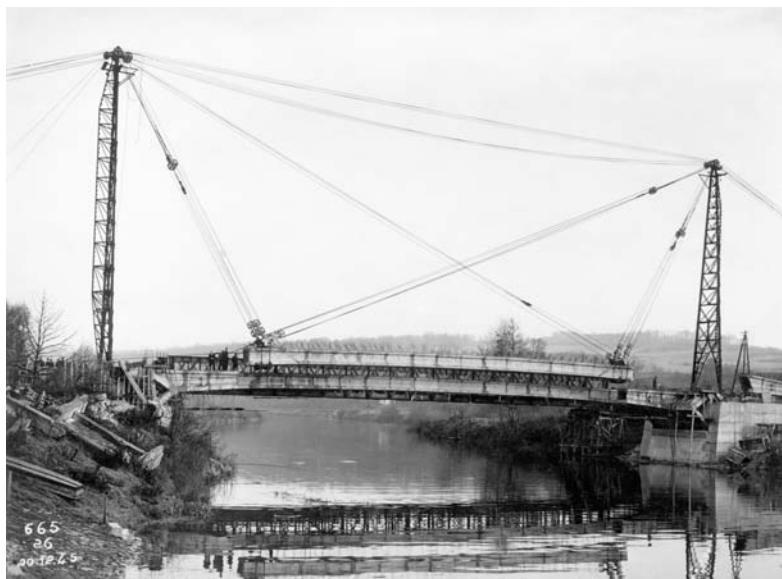
La posibilidad, cada día mayor, de mover grandes elementos, si bien presenta dificultades y peligros, tiene la ventaja de evitar cimbras y andamiajes y de permitir la fabricación de grandes elementos, en taller, con mano de obra más cuidada y económica.

Las tendencias actuales de la técnica del hormigón se orientan cada vez más hacia la prefabricación, en taller, de grandes piezas de hormigón pretensado, y montaje posterior, por ensamble de estas piezas en obra, con postesados que aseguren el enlace y monolitismo del conjunto; esta técnica ofrece indudablemente gran desarrollo para un próximo porvenir.

Freyssinet, con medios ingeniosos y geniales, hizo el lanzamiento de la viga (fig. XVI. 2) de 54 metros de longitud, en Luzancy, formada de elementos iguales prefabricados y ensamblados a tope mediante un postesado longitudinal. A pesar del peso relativamente grande del conjunto, la maniobra se hizo con facilidad gracias al dispositivo indicado en la figura y al empleo de un tambor especial de arrollamiento del cable; el radio de éste, variable de una espira a otra, seguía una ley estudiada de antemano para que, a medida que la viga iba avanzando, sus dos puntos de sustentación se mantuviesen continuamente en horizontal. De este modo, la potencia de los mecanismos se redujo a un verdadero mínimo y el lanzamiento fue posible económicamente.

Igualmente interesante de citar es la cubierta de la figura XVI. 12, formada de piezas prefabricadas montadas sobre cables colgantes con gran sencillez y rapidez de ejecución.

En el caso de arcos metálicos, es relativamente frecuente ir montándolos en voladizo sin cimbra; pero pueden, también, montarse por trozos colgaos de un cable y corregir su posición como se hizo en el arco metálico que había de constituir la armadura rígida del gran arco de hormigón sobre el Esla; cada trozo tenía resistencia para



XVI-2. Puente de Luzancy.
Ingeniero E. Freyssinet.
Fotografía: H. Baranger.

avanzar en voladizo hasta el pendolón siguiente (fig. XVI. 3), y el conjunto quedaba formando un arco de nueve articulaciones, hasta que, una vez corregida su posición exacta, se soldaban las cabezas para formar el arco triarticulado final.

En otros casos, los dos medios arcos, construidos sobre castilletes, se han abatido para formar el arco triarticulado.

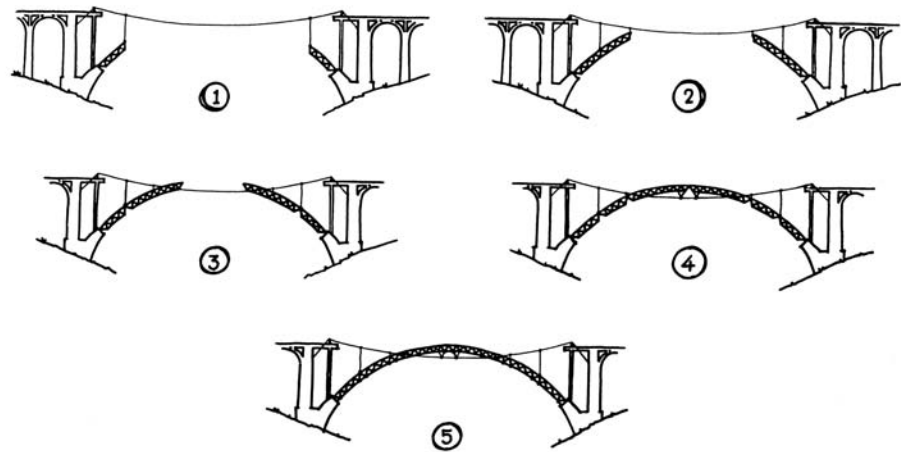
El gran arco de fábrica se ha construido, en la antigüedad, sobre cimbra completa de madera y, aun hoy, es frecuente el hacerlo así. Pero el problema ha ido complicándose con la mayor importancia de las luces actuales y con el especial comportamiento del hormigón. En efecto, es necesario tener en cuenta que, a medida que se va colocando el hormigón que ha de formar el arco definitivo, la cimbra se deforma bajo la acción de las sucesivas cargas que se le imponen.

Si todo el hormigón del arco se pudiera verter en pocos minutos y fraguase todo él simultáneamente cuando la cimbra ha tomado su deformación total, no habría problema, aparte del de retracción. Lo mismo sucedería si el hormigón se colocase por bloques o dovelas independientes, cuyo rejuntado se hiciese después de colocadas todas. Pero, esto no se hace así, porque los enormes pesos, que produciría sobre la cimbra, la encarecerían excesivamente.

Para evitarlo, se ideó el ir construyendo el arco por roscas, y hacer que las primeiramente vertidas y endurecidas trabajasen conjuntamente con la cimbra para soportar los pesos de las siguientes. En este caso, los esfuerzos que sufre la cimbra y el hormigón de las distintas roscas son diferentes según el sentido de la marcha del hormigonado en cada rosca, según los espesores que se den a éstas, e incluso, según que la velocidad de hormigonado sea mayor o menor y dé tiempo, o no, para que una cierta zona esté ya endurecida al verter el hormigón de las siguientes, o para que su resistencia y sus características elásticas sean unas u otras.

La repartición de tensiones depende fundamentalmente del proceso de hormigonado y de la deformabilidad de la cimbra. Los últimos volúmenes de hormigón vertido

XVI-3. Armadura rígida del arco de hormigón sobre el Esla.



quedan sin trabajar cuando los primeros pueden estar tomando una parte muy importante en el trabajo resistente del arco por peso propio.

Es necesario, pues, pensar en todo ello, no ya al calcular el arco, sino antes, al diseñarlo y fijar su ley de espesores, teniendo en cuenta, al mismo tiempo, los esfuerzos de retracción, que también varían con el proceso de hormigonado.

Estas alteraciones de esfuerzos toman especial importancia cuando es necesario recurrir a cimbras recogidas de madera, muy deformables, tales como las empleadas con éxito en Plougastel.

La dificultad de dar a estas cimbras la directriz adecuada, manteniendo su trasdós en la curva del intradós del arco de hormigón, y el deseo de utilizar el material de la cimbra como elemento resistente de la obra definitiva, ha llevado a los proyectistas a idear las llamadas autocimbras metálicas recogidas, que actúan, como tales, durante los primeros momentos del hormigonado del arco para convertirse, después, en la armadura definitiva interior de éste.

En este caso, la primera rosca de hormigón carga sobre la cimbra sola; la segunda, sobre el sistema mixto que forma la estructura metálica con unos elementos de hormigón armado; y así sucesivamente, aplicando la teoría de las estructuras mixtas. Un ejemplo típico, y quizá único, de ello, es el arco sobre el Esla, de 210 metros de luz, del Viaducto Martín Gil. Al arco metálico (fig. XVI. 4), después de macizar sus cabezas (rosca 0 en la figura), se le hormigonó la superior en una parte de su sección (rosca 1). Para evitar que las variaciones térmicas, diferentes de la cabeza superior hormigonada a la inferior metálica, pudiesen producir flexiones importantes en el arco, se había hecho la cimbra con tres articulaciones (fig. XVI. 4) en la cabeza superior, dos en arranques y una en clave.

La estructura metálica, por sí sola, no era capaz de soportar más que el peso de esta rosca. Una vez hormigonada, el conjunto tenía resistencia para soportar el hormigonado de otra rosca (2) en la cabeza inferior, la cual quedaba sin trabajar, colgando, por así decir, de la rosca (1) superior. En este momento se comprimió la cabeza inferior, hasta una cierta carga prevista, mediante gatos hidráulicos colocados en clave según el eje de la cabeza inferior ya hormigonada; con ello, la rosca superior (1) quedó



XVI-4. Arco del viaducto Martín Gil, sobre el Esla, Zamora. Fotografía: Heptener.

casi totalmente descargada. A partir de este momento, las cuatro cabezas de la cimbra metálica se deformaban por igual bajo la acción de las variaciones de temperatura; por consiguiente, se enclavaron las articulaciones de modo que el conjunto resistiera como arco empotrado.

En estas condiciones, la estructura permitiría continuar el hormigonado sucesivo de las roscas siguientes hasta la (8), según el orden indicado en la figura. Las diagonales no hacían más que arriostrar las cabezas y soportar los esfuerzos cortantes producidos por efecto del diferente peso de las dovelas, que se iban hormigonando a lo largo de la directriz, repartidas de forma que nunca el funicular se separase demasiado de esa directriz.

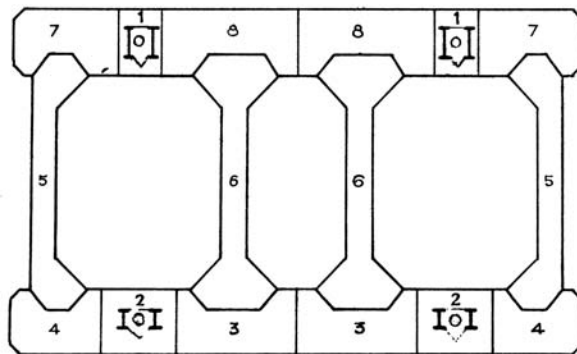
Este proceso de construcción es lento, pero permite cimbras muy ligeras; y así, en el Esla bastó una con 500 kg/m. l. de acero.

En esta obra se tuvieron en cuenta no sólo las deformaciones elásticas de cada rosca, sino también las deformaciones lentas, diferentes de unas roscas a otras; deformaciones que podían ser importantes por cargarse el hormigón joven a cargas relativamente altas. Los esfuerzos de retracción parcial, por el contrario, eran relativamente reducidos, porque las dovelas, que formaban cada rosca, se dejaban retraer libremente poco antes de verter el hormigón de la rosca siguiente; momento en el cual, se rellenaban las juntas entre dovelas.

La construcción del arco se terminó haciendo una apertura de 8 centímetros en clave bajo la acción de gatos hidráulicos, produciendo una carga total de apertura de 7.000 toneladas, desigualmente repartida entre la cabeza superior y la inferior, para igualar todo lo posible las tensiones entre ellas.

Se ve, pues, cómo, en este tipo de obras, el proceso de ejecución ha de tener forzosamente gran influencia en el proyecto. El arco y sus armaduras habrían sido diferentes si el hormigonado se hubiese podido hacer sobre cimbra llena.

XVI-4. Arco del viaducto Martín Gil, sobre el Esla, Zamora. Ingenieros C. Villalba, A. Salazar y E. Torroja.



En el caso de grandes naves industriales con cubierta de hormigón armado, el problema es diferente. Las cimbras pueden resultar mucho más económicas si se reutilizan sin desmontar; y ello obliga a tener en cuenta, en el tipo estructural, la posibilidad de descimbrar fácilmente, sin desmontar la cimbra, y de trasladarla a su nueva ubicación para ajustarla allí nuevamente. Un ejemplo clásico es el de Orly (fig. XVI. 5 y fig. XII. 3), en el que la sección de las bóvedas estaba estudiada conjuntamente con la cimbra para facilitar el despegado de ésta, su descenso, su corrimiento y su nueva elevación a la posición siguiente de hormigonado, sin falsas maniobras.

De este modo, bastará recoger, por abatimiento, los encofrados de los faldones, bajar el conjunto lo justo para pasar por debajo del arco construido, correr la cimbra y volver a elevarla a su nueva posición. La cimbra montada sobre vías, por intermedio de gatos, resolvió eficazmente el problema.

En otros casos de luces no tan grandes, puede ser mejor adoptar un perfil en T invertida, con los nervios por encima del encofrado cilíndrico, liso por el intradós (fig. XVI. 6). Con ello, la cimbra apenas ha de bajar y la maniobra es más sencilla.



XVI-5. Hangar de dirigibles, en Orly. Ingeniero E. Freyssinet.

Basta descentrar la directriz un poco, para concentrar la compresión sobre la cabeza de esta T, descargando el borde opuesto del nervio y disminuyendo, por consiguiente, la cuantía de la armadura.

Pero al proyectar hay que tener siempre presentes los detalles de estas operaciones. Así, por ejemplo, en el caso anterior, los arranques no pueden ser muy inclinados, o hay que pensar que los faldones despeguen en otra forma; por ejemplo, por giro alrededor de los riñones.

Si se trata de una cubierta con tirantes, puede todavía pensarse en hacerse la cimbra permeable; es decir (fig. XVI. 6), disponerla de forma que los apoyos de la parte superior al tirante sobre la inferior estén constituidos por unas dobles cuñas para que, quitando las de delante, llegue el tirante hasta la mitad del plano de montantes de la cimbra; y, volviendo a colocar estas cuñas, quitar las de atrás y pasar totalmente el tirante a través de la cimbra de modo que ésta pueda seguir avanzando libremente hasta su nueva posición.

Más sencilla y económica es la solución cuando la superficie interior de la cubierta presenta generatrices o formas inclinadas que permiten correr la cimbra, en un determinado sentido, sin tropiezo ninguno. Es el caso de la cubierta en hiperboloide citada anteriormente (fig. XII. 5). Gracias a la forma de doble curvatura de la lámina, se logra darle suficiente rigidez para sostenerse sin pandear mientras se despega y se corre la cimbra hasta el elemento contiguo que se ha de hormigonar. Una vez la cimbra en esta nueva posición, se colocan las barras que, en el lucernario, forman la triangulación que une un hiperboloide con el siguiente, y que presten al conjunto la resistencia y rigidez necesarias para soportar los empujes accidentales de viento, etc. Se trata, pues, de un caso en el que el proceso de construcción ha influido claramente en la forma de la superficie elegida, lo mismo que ocurría en el ejemplo de Orly anteriormente citado.

XVI-5. Hangar de dirigibles, en Orly.

El diagrama muestra un hangar de dirigibles con una estructura de arco. La parte superior del arco está etiquetada como 'hormigón armado' y la estructura interna que lo sostiene como 'cimbra deslizante'. El hangar está soportado por dos pilas y tiene un espacio abierto en el interior. Se puede ver un pequeño vehículo o estructura dentro del hangar.

En fin, cada ejemplo es un caso diferente; y consideraciones análogas pueden hacerse en cualquier otro tipo de estructura, tanto de hormigón como metálica, y en otros procesos de ejecución.

El que las estructuras sean capaces, o no, de sostenerse por sí solas durante el proceso de montaje, tiene gran importancia por cuanto permite, o no, suprimir la cimbra. Así, por ejemplo, la cúpula es construible por anillos estables, desde arranques a clave, siempre que el borde provisional interior no pandee. La cúpula del lucernario, que se ve en la figura VIII. 15, fue construible sin cimbra, montando los triángulos o rombos por anillos, con lo que cada aro resulta estable; y esto es, precisamente, lo que da mayor valor constructivo a la cúpula, en especial para grandes luces.

Por el contrario, también es frecuente que estos estadios parciales de la construcción, aun siendo estables, lo sean provocando empujes y alteraciones en la carga sobre otros elementos de la construcción, de modo que los ponga en peores condiciones que una vez terminada la obra. Por ejemplo, una viga, que ha de dar cargas verticales sobre las pilas, las da inclinadas durante el montaje si la cimbra es ajabalconada; un arco, que se construya avanzando en doble ménsula desde los arranques, da, sobre éstos, flexiones importantes que no se anulan después, a no ser que se haga una apertura posterior de clave con gatos hidráulicos para establecer el esfuerzo de compresión propio del arco; una serie de arcos sobre pilas cuyos empujes, una vez construidos todos, han de equilibrarse sobre éstas, quedan sin equilibrar cuando se ha construido un arco y no el siguiente. El número y los tipos de ejemplos pueden prolongarse indefinidamente.

Otras mil formas pueden citarse, de mutua influencia del proceso en el esquema estructural. Sólo a título de ejemplo, y para acusar la gran variedad de influencias que pueden aparecer, se citarán las siguientes:

El hormigonado no puede ser continuo; requiere juntas que son zonas débiles a la tracción; es, pues, necesario proyectarlas y, a veces, variar la estructura para permitir el hormigonado entre junta y junta con la velocidad posible que se prevé en la obra.

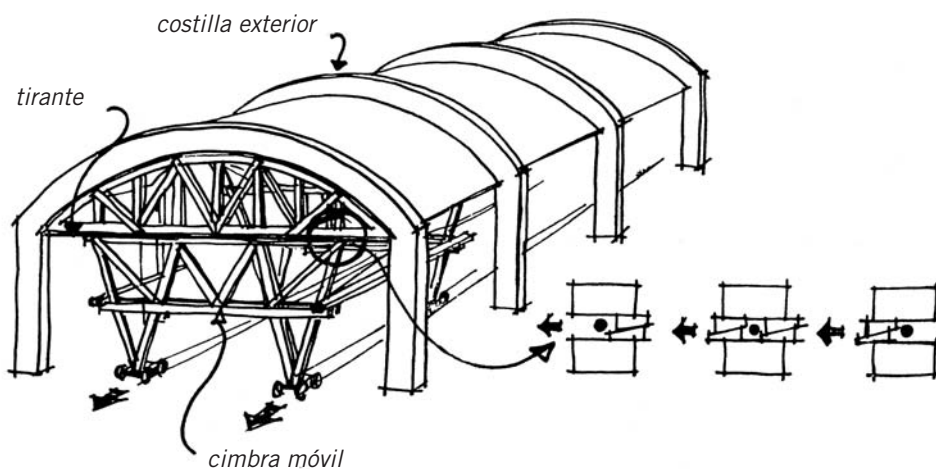
239

La conveniencia de repetir los mismos encofrados aconseja frecuentemente mantener secciones o luces iguales a trueque de mayor volumen de hormigón.

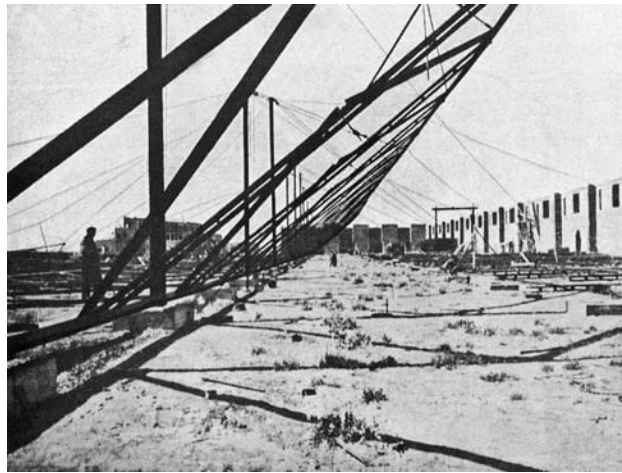
Los técnicos proyectistas de estructuras soldadas saben de sobra hasta qué punto la necesidad de poder soldar en buena posición les obliga a alterar la forma de sus piezas compuestas, a fijar cuidadosamente el orden posible de las soldaduras e, inclusive, a abandonar tipos estructurales que, de otro modo o con mejores y más costosos medios, serían perfectamente realizables.

Por ejemplo, no es posible económicamente hacer tambores con los que una estructura de 181 metros de longitud se pueda poner en cualquier postura para que el soldador trabaje con eficacia. Este era el caso de la viga maestra del hangar que se ve en la figura XVI. 7. El problema se resolvió formando la jácena de dos partes gemelas que se construyeron abatidas sobre el suelo, para levantarlas y enfrentarlas después. Las piezas estaban dispuestas de modo que la soldadura completa pudiera hacerse en esas dos posturas, horizontal y vertical. Sobre esta jácena, una vez terminada, se soldaron las cerchas transversales y las correas de cubiertas con todos los elementos secundarios de arriostramiento; y, una vez terminada la estructura total con 450 toneladas, se elevó, mediante gatos, a su posición definitiva y se colocaron los soportes de sustentación. De este modo, se evitaron totalmente los andamios y cimbras, y toda la ejecución, hecha al nivel del suelo, resultó mucho más económica.

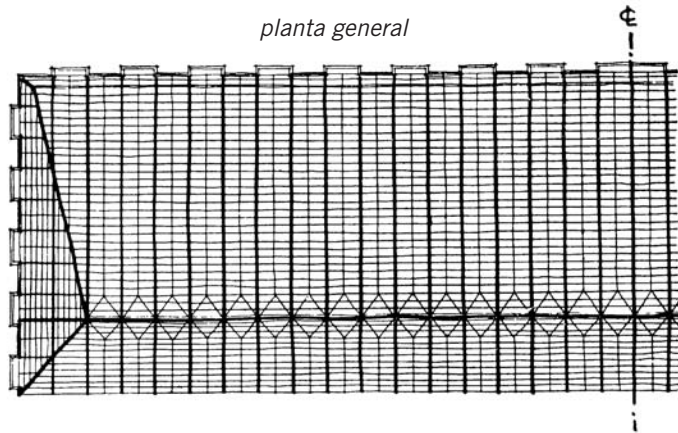
La longitud de las barras, en hormigón armado, produce cuestiones análogas. Cierro que, hoy, la soldadura facilita enormemente el problema; pero, si se acepta la utilización, como armadura, de cables de hilos delgados, se pueden alcanzar grandes longitudes en forma cómoda de transporte y manipulación. Todo se reduce a buscar el medio económico de tesarlos para recoger su gran deformación inicial; y ello conduce a soluciones totalmente diferentes de las clásicas de hormigón armado, como es el



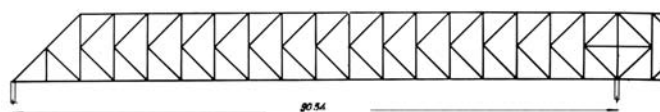
XVI-6. Cimbra permeable.



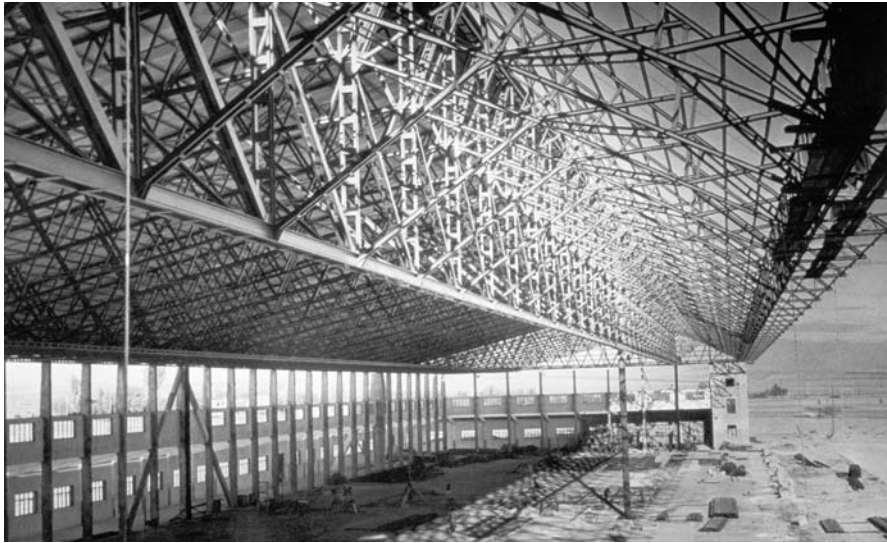
planta general



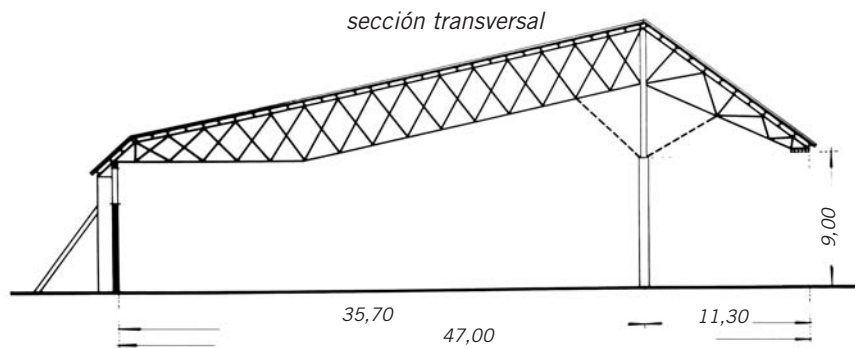
semialzado de Jazena



XVI-7. Hangar de aviones,
en Torrejón. Ingeniero
E.Torroja. Fotografía: Joya.



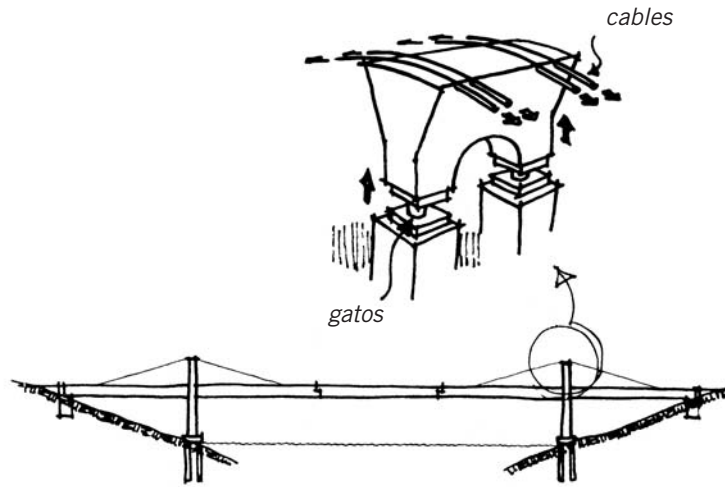
XVI-7. Hangar de aviones, en Torrejón.



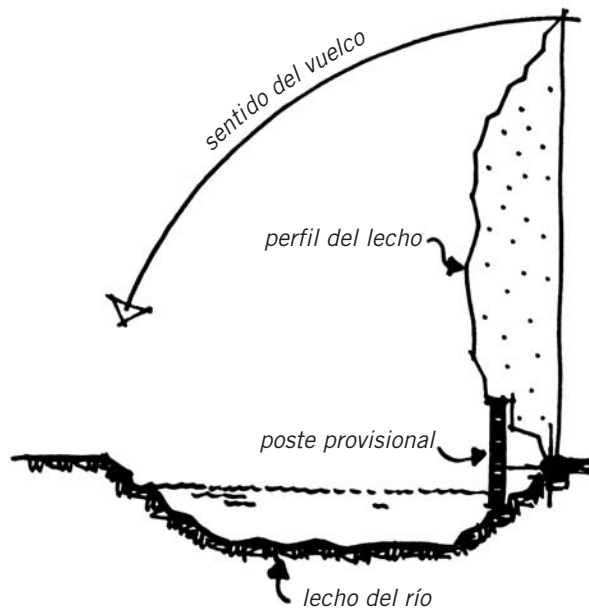
caso del Acueducto de Tempul (figs. XVI. 8 y IX. 9). La armadura principal de tracción, de las ménsulas equilibradas, se separa del resto de la estructura para permitir, por simple elevación de las cabezas de las pilas, no sólo el tesado previo, sino el definitivo, con el descimbramiento seguro y fácil del conjunto. Los cables se hormigonaron después, para defenderlos de la oxidación. El miedo a la diferente deformabilidad de unos y otros elementos y la dificultad de un reglado hiperestático, aconsejaron al autor a adoptar articulaciones que, en una estructura de viga continua, hubieran sido innecesarias. Ciertamente que, hoy, quizá no tuviese este miedo; pero, entonces lo tenía, por ser la primera vez que lo hacía y, en cierto modo, la primera obra en que se utilizaba, en grande, el sistema de postesado de la armadura (año 1926).

En otros casos de elementos de mayor masa y menos complejidad estructural, tales como presas, muros, etc., el proceso suele influir menos en el tipo estructural. Aunque una presa de gravedad, un poco grande, requiere enormes instalaciones auxiliares para la extracción de los productos de la excavación y para la fabricación y transporte del hormigón, todo esto no influye en el tipo estructural; lo que influye es la forma del valle y las características mecánicas del terreno, para determinar, por ejemplo, si ha de ser de gravedad o bóveda.

XVI-8. Acueducto de Tempul.



Sin embargo, puede citarse, como ejemplo de ingenio y de las posibilidades e influencias insospechadas que puede tener el método de ejecución, el caso de una presa (fig. XVI. 9) que había de cortar el cauce de un río de gran pendiente con 25 metros de anchura, 5 metros de altura y 5 m/seg. de velocidad de agua en estiaje. La presa había de quedar sumergida para producir el resalto correspondiente de las aguas y embocarlas hacia el canal de toma. La desviación, mediante un túnel y dos ataguías, no era admisible, puesto que cada ataguía presentaba el mismo problema que la propia presa en sí; la ejecución del resalto, aun con escollera, era imposible dada la velocidad del agua.



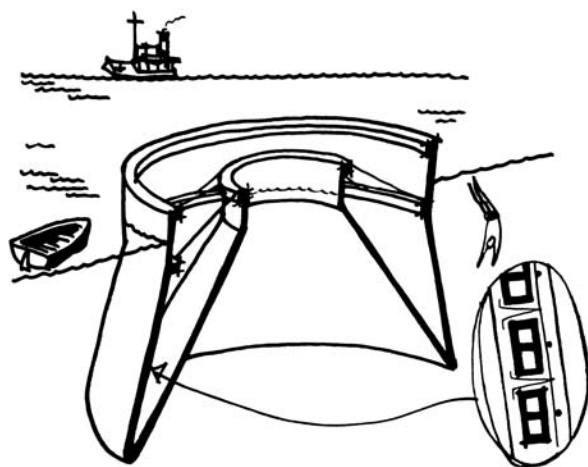
XVI-9. Colocación de presa por voladura.

La solución pudo consistir en hacer el macizo entero de la presa, girando 90° sobre una de las laderas, con la forma exacta del lecho, de tal modo que, mediante la simple voladura de un taco de dinamita, se verificase el vuelco del macizo entero sobre el lugar definitivo de su ubicación. Los defectos de asiento que presentase, o la misma rotura del macizo, no tenían demasiada importancia; pues, aun con ello, se lograba, casi totalmente, el efecto que se buscaba; y, además, la presa podía llevar taladros para hacer inyecciones con cemento de fraguado instantáneo, en las juntas de rotura, igual que entre la presa y la roca del fondo.

También en muros de diques y muelles, la elección, entre un perfil de escollera y uno de muro vertical, es un problema de tal magnitud económica que supera, en general, el de los medios auxiliares que se requieran. En el caso de monolitos artificiales grandes para soportar fuertes empujes de ola, su tamaño y peso final viene dado por la altura máxima de ésta; pero de los medios de transporte de que se disponga depende el tipo de bloque que resulte más económico y conveniente. Si la grúa no es suficientemente robusta para el peso total del bloque, quizá pueda valer para llevar los bloques sumergidos; y, en caso contrario, puede recurrirse a hacerse cajones de hormigón armado que permitan ser rellenos de hormigón en buenas condiciones, después de remolcados y fondeados.

Igual ocurre con los cajones de aire comprimido que han de ejecutarse con un gran calado y no permiten el establecimiento de una isla artificial para su hormigonado «in situ» por encima del nivel del agua. El tipo estructural del cajón es, entonces, totalmente diferente, puesto que ha de ser barco durante un cierto tiempo, y cimiento el resto de su vida. En un caso de éstos (fig. XVI. 10), para un puente sobre un brazo de mar, se consideró preferible hacer el cajón en una ladera; excavar, después, el terreno hasta la altura de la bajamar, e, inyectando aire al cajón para disminuir su calado, llevarlo flotando hasta el lugar de su ubicación, para fondearlo allí, con lastre de agua, y continuar después su hinca por aire comprimido.

Pues bien, para que todo esto fuera posible y para que el cajón resultase económico, era necesario reducir al mínimo el peso del cajón flotante. Ello obligó a sustituir

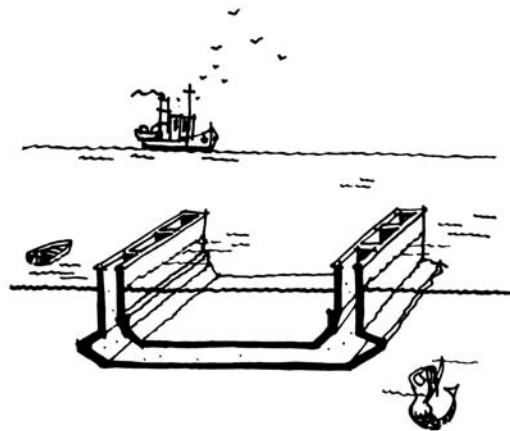


XVI-10. Cajón flotante para la cimentación del puente de Sancti Petri, Cádiz.

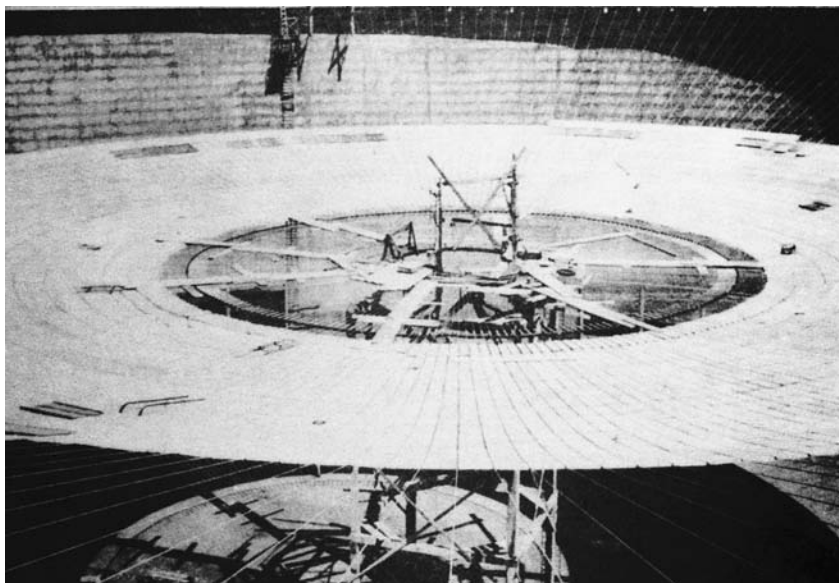
la planta rectangular por otra circular de igual área; pues, tratándose de presiones uniformes de agua, la forma circular resultaba la más apropiada y la que permite resistir esos empujes con el mínimo material. Tanto la pared exterior como la interior estaban formadas por hiperboloides de revolución —como se ve en la figura—, constituidos por sencillos tabiques de rasilla ligeramente armada, y enfoscados con un espesor total de siete centímetros solamente. El anillo interior de unión de ambas paredes y los radios metálicos, que se ven en la parte alta, daban la necesaria rigidez contra el pandeo de la pared exterior. Gracias a esta disposición, los cajones resultaron sumamente económicos, no siendo necesario ningún encofrado, y todas las operaciones se hicieron felizmente con toda facilidad.

Por cierto, que uno de ellos tuvo que resistir, no solamente los empujes del agua, sino también los imprevistos del abordaje, de una embarcación que casi había perdido el mando bajo un súbito ciclón; y que dejó el cajón —y al autor de estas líneas, que iba dentro— dando vueltas como una graciosa perinola, aunque entonces no le pareciese nada gracioso.

Algo parecido, pero más clásico, se hizo para el dique seco de Cádiz, que está formado por cajones flotantes sumergibles de doble pared de 53 x 17 metros en planta (fig. XVI. 11).



XVI-11. Cajones flotantes para el dique seco de Cádiz. Fotografía: Reymundo.



XVI-12. Palacio de Deportes, en Montevideo. Ingenieros Mondino y Viera.

Después de todo lo dicho, se comprende lo difícil que ha de ser ordenar estas ideas y mutuas influencias del proceso de construcción y del tipo estructural, en una teoría general; pero, quizá haya quedado suficientemente destacado hasta qué punto debe evitarse el proyectar sin pensar en cómo se va a construir y qué va a pasar durante la construcción; es decir, cómo se va a sostener y cómo va a trabajar el conjunto en cada uno de sus períodos intermedios, y qué alteraciones se deben introducir, en las disposiciones de la estructura, para que se comporte debidamente durante toda la construcción, y que ésta resulte verdaderamente económica; y en fin, no olvidar que, para el mejor estado tensional definitivo, puede interesar establecer estados previos de tensiones internas o aprovechar bien los que hayan de producirse durante la construcción.

En resumen: la morfología de la estructura va íntimamente ligada a su proceso de construcción, como lo va el material de que ha de hacerse; y, en el proyecto, no debe separarse nunca la una de los otros. El acierto en el conjunto de todos estos factores, durante la concepción y el primer trazado de la estructura, determina el éxito de la misma y la razón de ser de un proyecto y hasta de un proyectista; porque el ingenio, para resolver cada problema, ha sido y seguirá siendo la característica esencial del verdadero ingeniero de todos los tiempos.

La expresión estética

Difíciles de evitar son, en este tema, los errores a que suele conducir la deformación profesional, porque los defectos del proyecto estructural suelen proceder de una visión parcial del problema; del fallo de una o varias formas de enfocarlo. Por otra parte, es raro tratar esta cuestión de la valoración estética de una construcción, refiriéndola a sus relaciones recíprocas con la estructura, como aquí corresponde.

No se trata, pues, de entrar en teorías de filosofía general del arte, ni de escudriñar las razones íntimas de la expresión y de la impresión estéticas, ni las raíces de que arranca el acto creador en la mente del proyectista, ni tan siquiera de comentar lo que pueda haber de objetivo y de subjetivo en el valor final, resultado de una idea del artista, de una emoción, de un estado de espíritu, en fin.

Se trata, ahora, solamente de comentar sus valores objetivos en relación con lo que tiene de estructural, dentro de las tendencias de la sociedad actual.

Unas veces, esta estructura estará a la vista o constituirá la obra misma y necesitará ser estética; otras veces, quedará oculta. Pero, aun en este último caso, rara vez el valor estético de la obra aparente dejará de estar influenciado por las formas resistentes de la estructura interior, del mismo modo que en la obra más perfecta y atractiva de la Naturaleza –que, al menos, para el autor, es la mujer por excelencia– influye la perfección de su esqueleto, sin pretender que éste, por sí solo, sea atractivo, sino que presta al conjunto la material perfección que refleja con sus medios de expresividad.

Por eso, se requiere tanto el sentimiento artístico como la preparación técnica, si no se quiere que los productos de la imaginación queden en el aire, como aquellas estatuas del *Gog*, de Papini, que el artista tallaba en humo y cuyo mejor encanto nacía de la brevedad inconsistente de su existencia.

Aquí se trata forzosamente de obras materiales –de cal y canto–, que se sostengan y perduren; y para ello, se requiere una preparación técnica larga y penosa, que frecuentemente deforma malhadadamente el espíritu; por eso, habrá que referirse al proyectista con sus virtudes y defectos, con sus conocimientos y sus ignorancias, como sujeto del proceso imaginativo creador.

El proyectista tendrá, en unos casos, que elegir entre tal o cual solución posible imaginada, ponderando sus posibilidades estéticas; en otros casos, deberá pensar solamente si, corrigiendo sus formas, puede perfeccionar y sobrevalorar la expresión estética, sin forzar excesivamente las otras condiciones funcionales, resistentes, constructivas y económicas.

Tanto en un caso como en otro, el proyectista tendrá que guiarse por su instinto y su educación artística más que por reglas concretas; porque, en lo estético, es mucho más difícil que en lo técnico, dar reglas generales que no queden en las nubes de la

filosofía general del arte, sin aplicación y contactos directos con el problema particular que ocupa.

Pues bien, para el técnico que quiera documentarse y profundizar en estas cuestiones, el primer tropiezo que encuentra, al leer obras de esas que se llaman críticas de arte —y que frecuentemente, para el que las lee, se convierten en crítica del autor—, es la vaguedad o la inconsistencia de su léxico.

De su lectura, más que un poso cristalizado, parece quedar un gel difuso, inconsistente y escurridizo; porque, acostumbrados los técnicos a un relativo —sólo relativo—, rigor lógico matemático, no pueden por menos de sonreír, con aires de suficiencia, cuando oyen hablar de «variables constantes» en el Arte, de «planos curvos» en la pintura, de unas fuerzas que suben y otras que bajan en los estilos arquitectónicos, de formas blandas en la piedra, etc.

El técnico, que haya sido educado en un ambiente puramente técnico, podrá llegar a comprender y sentir la atracción de los planos curvos, admirando las exuberancias de Rubens, y quizá llegue algún día a distinguir, de las fuerzas que suben afanosamente por los arbotantes góticos, las otras que bajan reposadamente por las columnas del Partenón; pero, habrá de confesar que siente cierta repulsión para estas explicaciones.

«La belleza es el esplendor de la verdad», dijo el gran filósofo. Y de ello, deducen muchos que la belleza requiere, como razón primaria, la verdad en su acepción de correlación perfecta, entre el fondo real y la forma aparente de la obra. La traducción, de relaciones entre conceptos espirituales a obras materiales, es siempre peligrosa; pero, no cabe duda de que, al menos hoy, se considera como mentira, y, por tanto, proscribible, el que la apariencia de una construcción induzca a pensar que sus fenómenos, funcional y resistente, son otros totalmente diferentes de los reales que se ocultan en una estructura interior, divorciada y contrapuesta de la falsa que la obra expresa exteriormente.

Con haber, en ello, un fondo eterno de verdad, al que todo espíritu humano se adhiere con fuero imprescriptible, es lo cierto que, en esto como en todo, no se puede exagerar; y que siendo varios los factores que intervienen, sólo en el justo medio ha de encontrarse la virtud.

En ningún estilo, o mejor dicho, en ninguna técnica constructiva, la estructura resistente ha sido capaz de separarse tan netamente del conjunto de la obra como en la técnica actual; la especialización —virtud y vicio de estos días—, se ha introducido en los materiales de construcción; y un muro de un edificio puede utilizar materiales diferentes para su armazón resistente, para su aislamiento acústico interior y para el ecológico exterior, sin que, por ello, falte a la verdad dejando solamente este último al exterior, porque, si es pecaminoso el mentir, no siempre lo es el de ocultar la verdad.

La mentira empezaría si, con ese material de recubrimiento, se tratase de expresar fórmulas resistentes contrapuestas con las reales; y será rotunda y pecaminosa si las formas que adopta como expresión resistente, son incompatibles con las leyes de la estabilidad y resistencia; o, al menos, incompatibles, con ese material que aparece al exterior.

Así, por ejemplo, será faltar a la verdad recubrir una viga de hormigón armado con un plaqueado de piedra, dovelado según las exigencias técnicas de un dintel de cantería;

pero será mentir soezmente si el rejuntado no corresponde tampoco a ese tipo de elemento resistente, o si la falsa bóveda, que constituye el dintel dovelado, apoya sobre simples columnas incapaces, a todas luces, de soportar los empujes de esas dovelas.

Quizá, en éste y en muchos otros casos, más que molestar la falsedad en sí, lo que más desasosiegue el espíritu del observador sea la sensación de que se ha pretendido hacerle «comulgar con ruedas de molino» y que se ha cometido un abuso de confianza con su presunta estulticia; quizá sea simplemente la indignación que sienta contra la impericia del proyectista. Pero, sea lo que fuere, no cabe duda que la expresión de un fenómeno resistente, intrínseca y aparentemente imposible, es algo siempre antiestético para el observador que así lo comprende.

Esto último es un punto muy importante de la cuestión: la calidad del observador. Admiramos la sociedad ateniense porque, en ella, según se cuenta, una mujer del pueblo era capaz de corregir instantáneamente, en el certamen, un verso del mejor poeta. Por desgracia, en la sociedad actual no se ha llegado a esa perfección artística en lo constructivo; pero, es claro que sería un perfeccionamiento, y que, mientras no se alcance, lo que ha de interesar es la aprobación y la aquiescencia estética y de todo orden de la minoría selecta educada en unos buenos principios, tanto de estética pura como de mecánica estructural.

Sin ninguna cultura musical puede agrandar una obra maestra; pero, la fruición y la comprensión consciente del placer estético serán indudablemente mucho mayores si, conocidas las leyes de la armonización, se pueden apreciar, en la obra, todas las delicadezas y perfecciones que encierra; y, desde luego, no merece igual valor la opinión del crítico carente de tal cultura.

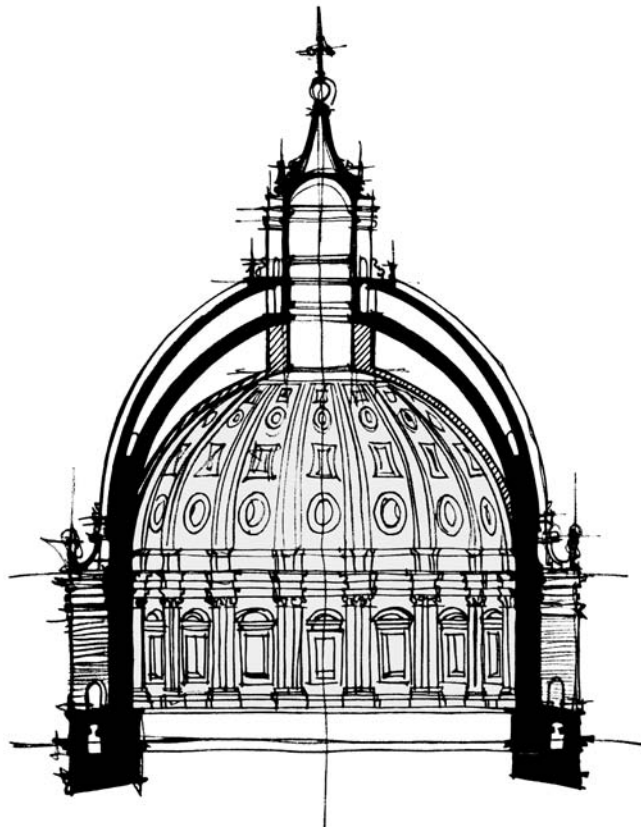
Porque si una cosa es mentir y otra es ocultar la verdad, otra diferente es que el observador no sea capaz de comprenderla y se llame a engaño frente a una verdad nueva, que choca con su espíritu acostumbrado a otro lenguaje diferente. Si ve un dintel de hormigón armado con las proporciones normales para este material y, desconociendo la existencia y características del mismo, pretende enjuiciarlo como si fuese un simple monolito de piedra dentro de los cánones de la construcción clásica, dirá que es deforme. Si, acostumbrado al fenómeno resistente de las bóvedas, se enfrenta con una lámina cilíndrica polilobular (fig. XII. 10), pensará que, como las bóvedas no pueden sostenerse con sus estribos al aire, hay un entramado detrás que se oculta con perfidia. Sin embargo, el fenómeno tensional es limpio y claro como puede serlo el de una viga; la forma es excelentemente apta para un material de las características adecuadas del hormigón armado, y puede llegar a producir una impresión estética análoga a la de cualquier obra clásica, si se alcanza a darle toda la gracia en sus líneas y toda la proporción en dimensiones, de que es capaz este tipo estructural. Que se haya logrado ya, o no, es cosa diferente. Tampoco el frontón o el dintel habían alcanzado su perfección en el siglo VI a. de C.; pero estaban ya cargados de promesas.

El éxito es más difícil ahora, precisamente porque el círculo crítico, que puede influir más eficazmente, es más reducido; el hecho de que en este arte sea necesario fundir el fenómeno tensional con el efecto estético, reduce la masa, de los capaces de comprenderlo, a un ambiente puramente académico con todos los peligros que esto ha representado siempre en la historia del Arte. Y es difícil que la perfección se alcance

mientras el pueblo entero no se incorpore al movimiento evolucionista con sus sentimientos, sus ideales y su propia sensibilidad; porque, solamente en ese ambiente, el genio encuentra el calor necesario para el desarrollo de sus concepciones y el afinamiento sucesivo de las formas expresivas del ideal común.

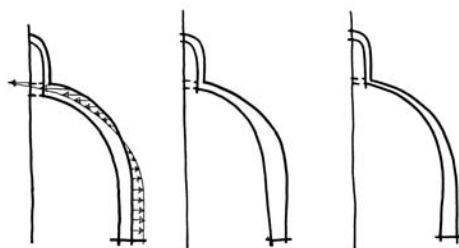
Continuando con el tema de la verdad, hay que insistir en que, si bien ésta, en el sentido en que aquí interesar es, cuando menos, una perfección más que aportar a la obra, no es o no se ha considerado siempre como una condición necesaria. El añadirla, en el problema estético, hace más limitadas las posibilidades de solución; y, como se pretende, al mismo tiempo, suprimir los superpuestos y las libertades ornamentales, cortando con ello las alas a la imaginación del artista y limitando sus medios de corregir y disimular las formas esenciales, resulta el éxito más difícil que lo ha sido nunca; a pesar, o quizá precisamente porque la técnica está mucho más avanzada y la meta se pone más lejos.

Para comprender que esto no ha sido siempre así, basta observar las grandes obras del pasado, que enseñan cómo, entonces, el concepto de verdad no se llevaba al extremo de pretender que la obra, para ser bella, debiera amoldarse estrictamente a las formas y dimensiones resistentemente óptimas. La cúpula de San Pedro (fig. XVII. 1), en Roma, era incapaz de soportar, con sólo sus sillares, las tracciones que resultan, en los paralelos de riñones, con la directriz adoptada, y fue necesario proveerla inicialmente



XVII-1. Cúpula de S. Pedro, Roma.

XVII-1. Cúpula de S. Pedro, Roma. De «Summa Artis». Espasa Calpe, S. A.



de llaves de hierro y de anillos para atar sus sillares; anillos, que más tarde, hubieron de reforzarse con carácter más bien propio del hormigón armado. No apareciendo estos elementos al exterior, ni siendo natural que el ojo los prevea, no puede hablarse de acertada o exacta expresión resistente; pero, no por esto la cúpula deja de ser bella. Miguel Ángel conocía de antemano el punto neurálgico de su estabilidad y, sin embargo, no dudó en trazarla así; si bien disminuyó el defecto respecto a trazados anteriores.

Reconociendo la dificultad que se encuentra para justificar estas anomalías del sentido artístico, respecto del concepto resistente—connatural sin ser único, en obras monumentales de este tipo—, cabría la intuición de formas de perfección estética, propias de materiales más adecuo-resistentes que los usuales; pues, la piedra armada o resistente a tracción, no es imposible ni es una falsedad; y cabría, también, pensar

que, siendo sólo visible la superficie externa, el observador imaginase los espesores necesarios para corregir el defecto; pues el que la cúpula de San Pedro lleve contrafuertes según los meridianos, como voluntariamente se expresa al exterior, no dice nada respecto a la ley de la directriz interna de éstos.

Esta cuestión del espesor invisible es fundamental en la construcción. Pudiera decirse que constituye una cuarta dimensión en el juego de volúmenes que encierran las superficies envolventes aparentes. «Es esta cualidad de profundidad, la única que puede dar vida a la Arquitectura», dice F. Lloyd Wright (fig. XVII. 7); y el proyectista ha de tener continuamente presente la conveniencia de hacerle fácil al observador la intuición de esos espesores; porque la obra no puede concebirse sin ese cuarto elemento esencial en la existencia y en la belleza del conjunto. Igualmente ha de contar con que, en la construcción, no se ve solamente lo que la visión alcanza, sino todo lo que la completa en el espacio.

En todo caso, dentro del tipo estructural elegido, el artista tiende con frecuencia a corregir ligeramente las formas rudas que salieron sin pulir de las manos del técnico, las proporciones o los espesores visibles que resultaron de sus cálculos estáticos; y ha de reconocerse que el buen artista lo hace con franco éxito estético.

Cuál sea el criterio o los principios ocultos que le guían para ello, es cosa que no se alcanza fácilmente; pero, no por ello debe negarse la realidad sensible.

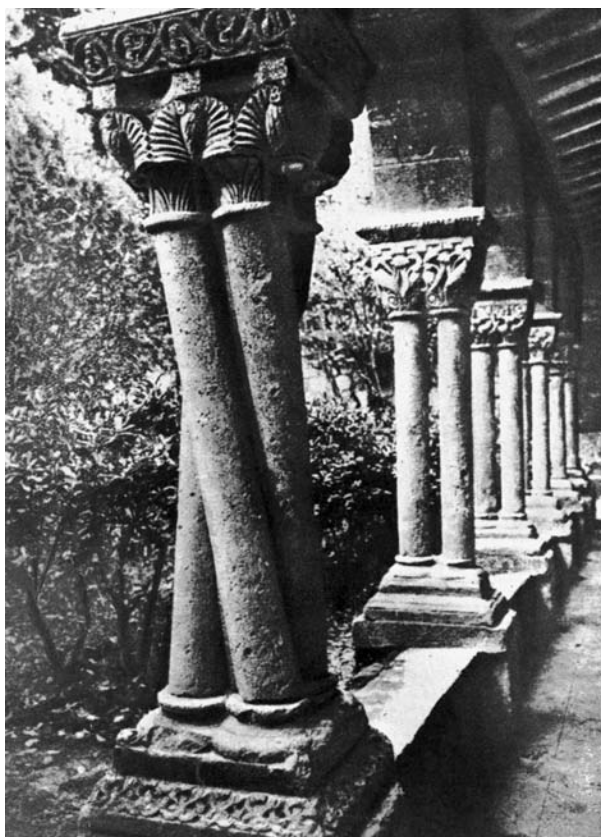
Ciertamente, la forma de igual resistencia no tiene por qué ser la más artística. Por ejemplo, un arco (fig. XVIII. 9) requeriría, para soportar su propio peso, aumentar el espesor rápidamente junto a los arranques con un resultado que, a todas vistas, no resulta agradable, al menos hoy.

Por otra parte, ni el ojo mejor adecuado, en sentido mecánico, es capaz de apreciar la magnitud de los esfuerzos y tensiones —con la rapidez intuitiva que se requiere para que su captación intervenga en la satisfacción estética—; ni es posible, tampoco, olvidar o, mejor dicho, repudiar de nuestro espíritu el hábito artístico que dejaron en él las obras maestras anteriores.

En efecto, si cuando aparece un material nuevo la técnica tarda en crear los tipos estructurales apropiados a sus características, la sensibilidad artística tarda todavía más en aceptar la evolución. La histéresis estética es mayor que la técnica. Es necesario un período de transición para estar en condiciones de enjuiciar la belleza de las nuevas formas y sacar de ellas todo el partido posible. Aun en las obras de éxito estético más consagrado, si bien se observan, se encuentran los residuos de técnicas anteriores correspondientes a otro material. Bien conocido es el origen maderero de las métopas y los tríglifos y, sin embargo, su aparición en piedra, sobre el arquitrabe, no engaña a nadie; cualquier observador lo valora en su pura expresión ornamental y queda satisfecho.

Yendo más allá, no estará fuera de lugar el decir también que, si las cosas serias deben tratarse en serio, siempre hay, en medio de ellas —y gracias a Dios—, facetas y detalles de menos importancia, en las que la ironía y la eutrapelia tienen sus derechos. El técnico constructor tiene demasiado que luchar con la naturaleza y contra la sociedad que le rodea para que no le sea permitido, de vez en cuando, saludarlas con el gesto payaso del contrasentido. El chiste tiene, también, su razón de

XVII-2. Claustro de S. Pedro de la Rúa, Estella. De «Ars Hispaniae», J. Gudiol y J. A. Gayá.



ser profundamente humana; los artistas de Estella y de Barcelona (figs. XVII. 2 y VI. 3), por ejemplo, lo sentían así, precisamente porque eran artistas.

Aun con los elementos estrictamente estático-resistentes, el artista sabe jugar de manera que, sin contravenir su esencial función mecánica, su aspecto, su forma y hasta su expresión se modifiquen completamente de modo totalmente insospechado para el espíritu puramente técnico. Así, los antiestéticos codales o riostras, necesarios para evitar la inestabilidad de un conjunto de soportes demasiado esbeltos, se convirtieron, en manos del artista cordobés (fig. XVII. 3), en un maravilloso ritmo de arcos exentos por bajo de los encargados de soportar la techumbre.

Por otra parte, no se puede evitar —ni hay por qué lamentarlo—, la existencia de elementos ocultos, esencialmente resistentes. El hormigón armado, en especial, oculta sus armaduras; por eso, con él, es más necesario que el espíritu se asimile la idea de su resistencia intrínseca a tracción y deje de considerarlo como una simple piedra artificial. Es necesario que no se engañe, sin necesidad de pintarle las armaduras al exterior, como se ha acostumbrado a adivinar el esqueleto, en el cuerpo humano, sin necesidad ni deseo de verlo bajo la blandura expresiva de las carnes.

Lanzado, por delante, todo esto, pueden analizarse ahora las características típicas de las tendencias estéticas actuales en el campo especial que se trata; tendencias, entre las que debe señalarse, respecto a otros estilos, la máxima valoración de la fun-



XVII-3. Mezquita de Córdoba. De «Ars Hispaniae», Gómez Moreno.

ción resistente (pese a todos los peros anteriores), en la expresión estética de las construcciones; al menos en algunas de ellas y en algunas de las escuelas en boga.

Ello es lógico, puesto que nunca estos fenómenos resistentes fueron mejor conocidos para sacar partido de ellos, y nunca las estructuras pudieron tener la personalidad que hoy tienen, ni alcanzar formas tan variadas y, pudiera decirse, de personalidad tan acusada dentro del conjunto de las construcciones.

Es en estos días cuando más interesa o, al menos, cuando más conscientemente y con más posibilidades de eficacia se ha deseado fundir, en un mismo ser, la forma artística con la resistente. Sobre todo, en aquellas obras en las que, por su magnitud y características especiales, todo es estructura, se refuerza este acento suprimiendo los temas puramente ornamentales y se pretende que la belleza surja, simple y naturalmente, de la gracia de las líneas, de la proporción de masas, o del ritmo de sus formas.

Puede decirse que hoy, por primera vez en la historia del arte, al independizarse la personalidad de la estructura, se aprecia la estética íntima de ésta y puede hablarse de un arte estructural.

No se trata, ahora, de si esto es acertado o no; se trata simplemente de señalar el hecho y, en todo caso de justificarlo en sus causas, como consecuencia del genio técnico que caracteriza este ambiente social.

Ciertamente, este ansia de expresión funcional no se refiere exclusivamente a la función estática y resistente; en arquitectura se quiere que el juego de espacios y volúmenes –hablando en ese peculiar lenguaje de los que llaman espacio al que se ve desde dentro, y volumen el que se acusa por fuera–, exprese o, por lo menos, responda a las funciones reales de cada elemento o del conjunto de todos ellos; que, por la sola visión exterior, se intuya lo que contiene su interior, y hasta su finalidad o carácter funcional típico. Otros estilos lo lograron inconscientemente, quizá porque sus problemas eran mucho menos complejos; quizá porque, en el espíritu del artista y de la sociedad de entonces, los ideales estaban más arraigados y se les salían por las manos las formas apropiadas, con la mayor naturalidad, sin necesidad de forzar la imaginación con impuestos conscientes.

Pero, el hecho es que hoy se aprecia esa correlación como una virtud, mientras se prescinde de otras ambiciones simbólicas.

Refiriéndose a la expresividad funcional de la estructura como tal –es decir, a la expresividad estático-resistente–, una consecuencia, y al mismo tiempo una prueba, de que en ella se busca una raíz de la razón estética, es el desprecio que el artista siente por lo ornamental. Se considera que la estructura debe ser bella por sí misma sin necesidad de aditamentos ni florituras. La economía –que también se mide hoy más que nunca– no parece que pueda ser la razón fundamental de esta supresión de lo expletivo. A lo más, ayuda al deseo íntimo de encontrar la solución completa del complejo estético, sin necesidad de recurrir a esas ayudas, que se miran, si no como bastardas, sí como desplazadas del gusto actual.

Cierto es, también, que nunca se habían podido lograr estructuras, como las de un puente colgante, capaces, por sí solas, de impresionar y provocar todas las reacciones y reflejos conscientes e inconscientes que acompañan a la emoción estética; y esto ha hecho que los proyectistas se hayan lanzado a ellas con la fruición del primer encanto despreciando otros elementos ya manidos, aunque nunca agotados en la historia del arte.

Es posible que se vuelva atrás; y no será la primera vez que, en el ir y venir de esa historia, lo superfluo vuelva por sus fueros eternos. Porque lo superfluo es, esencialmente, lo que se ofrenda voluntariamente y sin que nadie lo exija ni nada lo requiera, como ofrenda generosa de un esfuerzo puesto al servicio del goce de vivir. Pero, también es verdad, y profunda, que en el goce más puro de la emoción estética –como en tantas otras cosas de la vida–, la simplicidad es una virtud. Y el alcanzar el éxito, con tan pocos elementos en la mano, requiere frecuentemente un sentido artístico mucho más agudo y un esfuerzo mayor que el obtenido al amparo, y dijérase bajo la capa de elementos expletivos y superfluos.

Exagérese o no, hoy se ama la verdad estructural con paroxismo tal que no basta con la simple verdad, sino que se quiere apreciarla en su calidad integral y exclusivista de verdad desnuda; porque cuando se ama intensamente, todo es superfluo fuera del ser amado. En él solo, y sólo en él, se encuentra la perfección. Así, se quiere hallar la belleza con el mínimo de elementos, de forma que todos sean esenciales. Su lema es el «nada de más» de la inscripción délfica.

Y si se da la entrada a algún tema ornamental, es independizándolo netamente y destacándolo por contraste sobre la austera simplicidad que le rodea, para darle un

valor específico y una personalidad propia, clara, sincera y sin pretensiones ajenas a su misión, que respeta la expresividad estructural del conjunto, y aun acentúa sus caracteres icásticos con franco espíritu antibarroco.

Lo dicho se refiere a la expresión estética de la verdad resistente. Pero la estructura —como se dijo más atrás y se volverá a tocar luego— no deriva solamente de la razón mecánica. Deriva de otras razones funcionales primarias, y puede venir muy influida, también, por el proceso constructivo.

Es interesante observar que el ojo del artista es capaz de apreciar la razón funcional, y de comprender la razón estático-resistente, si tiene la debida preparación para ello; pero, es incapaz —si no siempre, sí en muchos casos—, de introducir las exigencias del proceso constructivo en la valoración estética; de captar sus influencias incorporándolas intuitivamente a la razón de ser de las formas que se le presentan.

Es posible que el puente de ménsulas no haya encontrado todavía la perfección estética de sus formas, como ha podido encontrarla el arco, quizá más viejo en la historia de la construcción; pero, el hecho es que hoy no hay razón clara para que un arco resulte más capaz de impresión estética que una viga triangulada; y el proceso constructivo de ésta, en voladizos sucesivos sin cimbra, es mucho más claro que el del arco de piedra sobre una cimbra que se imagina, pero no se ve.

El arco atirantado, con la rigidez confiada a la viga en lugar de al arco, puede ser más constructivo, como se vio al hablar del proceso de ejecución, que el arco rígido con tablero flexible; las conveniencias resistentes quedan igualmente satisfechas; pero, el efecto estético del primero parece siempre peor que el del segundo. Parece más normal y lógicamente resistente que el arco, como elemento fundamental, realice su función por sí solo; y que, para ser estable, no requiera que la viga tirante, a través de los pendolones, venga a suplir la rigidez que le falta, en sí mismo, al arco.



XVII-4. Puente de la Roche-Guyon. Constructor, Bussiron. De «Cent ans béton armé». Fotografía: H. Baranger.

En el fondo, el proceso elegido es tal o cual por razones de economía; y el criterio económico no añade nada a la valoración estética. El lograr una misma realización con menos dinero podrá ser causa de admiración, pero no de emoción estética. Requerirá más talento por parte del proyectista o del constructor y le llevará a dar a su obra un carácter específico, un acento determinado, una modalidad personal, una calidad si se quiere, pero nada más.

Y cuando el proceso fuerza la función resistente final, cuando añade en ella fenómenos tensionales pasajeros que dejan su huella en la forma estructural, desviándola de lo que sería sin otras razones que las que se aparecen a la vista en el momento de la percepción, el espíritu, que no las capta, no puede quedar satisfecho. Lo mismo ocurre cuando, bajo la superficie del suelo, hay razones ocultas que, por economía de cimentación, forzaron las formas que aparentemente expresa la obra y que pide la configuración y apariencia externa del terreno. Y lo mismo sucede, en fin, con las exigencias de sobrecargas cuyos volúmenes no son aparentes.

El material, en cambio, es elemento claramente influyente en el tipo estético; porque siéndolo, como se ha visto, en la razón estático-resistente de la somática estructural y acusándose claramente a la vista, no puede haber satisfacción estética si el tipo, las formas o las proporciones estructurales no corresponden al material que las expresa.

Y así se ve que, mientras con la piedra, el ladrillo y el hormigón en masa, satisfacen las expresiones de estabilidad, de obra maciza, de tranquilidad respecto a sus condiciones estáticas; con el acero, por el contrario, es la ligereza nerviosa, la expresión de lo tensional en su máxima intensidad, lo que atrae.

Es cierto que con la piedra se hicieron las grandes realizaciones góticas, en las que aparece análogo deseo de ligereza estructural; pero en ellas, es siempre la bóveda, el arco y el contrafuerte los que juegan el papel estático contrarrestando sus empujes; las formas se ajustan al fenómeno resistente que es fundamentalmente la compresión, con las proporciones aun propias de la piedra. Y, si la aparición, voluntariamente acusada del nervio en bóvedas y columnas, les presta un tono de ligereza, desconocido hasta entonces, también hay que tener en cuenta que, en esa impresión del conjunto, influye la prodigalidad de sus tallas y los calados de piedra de sus ventanales, signo ya de una decadencia expresada en acordes preciosistas que, si pudo agradar entonces y agradar hoy todavía, nadie sería capaz de repetir en las obras actuales sin el vituperio y la repulsa del sentido estético actual.

Hoy, que otros materiales permiten mayores ligerezas, se prefiere reservar la piedra (quizá bajo la influencia también de razones económicas), para obras más compactas y serenas; diríase, más clásicas, mientras se desahoga el espíritu deportista de la época con la novedad de los últimos materiales que, por lo mismo que ofrecen posibilidades totalmente nuevas, hacen el éxito más difícil y fascinador. Ejemplos como los de las figuras XIV. 1 y XIV. 12 son buena prueba de ello y de hasta qué punto, en cada época, la técnica y el arte tienen pretensiones que necesitan coincidir en el mismo camino para lograr su perfección.

Todo ello fue posible y demuestra cómo los materiales modernos pueden aportar, al campo estético de la construcción, éxitos insospechados por caminos apenas desbrozados. Quizá no esté de más señalar aquí, que la valoración estética de los acordes

estructurales, a base de materiales diferentes según la función que se les pide, está hoy tan atrasada todavía, como la orquestación o el contrapunto en el siglo XVII, quizá como efecto del divorcio entre las diferentes especializaciones.

En la gran obra técnica actual, fundamentalmente estructural, se busca expresar el triunfo de que es capaz la técnica presente con los nuevos materiales de que se dispone; se pretende frecuentemente dar la sensación de poderío, de fuerza y al mismo tiempo de ligereza, de gracia y de sencillez; se quiere que el puente salve el gran vano con la misma sensación que da el ágil atleta al saltarlo con soltura, sin apariencia alguna de penoso esfuerzo ni de trabajada técnica, como si el límite de sus posibilidades estuviera mucho más allá todavía.

Si fascina por el peligro que sugiere —el «mei» chino—, lo hace juntando, a su vibrante dinamismo, una ingenua sencillez.

Quizá por ello no sea, más que la natural consecuencia de la juvenil personalidad de esta técnica, envanecida con la rapidez de sus triunfos. Las generaciones futuras justipreciarán el lastre de fatuidad que pueden arrastrar las realizaciones de la época actual; pero la hora juvenil es preludio de madurez, y debe siempre pensarse que los frutos superarán las promesas de las flores.

La presencia de esta ambición de resistencia y ligereza, de potencialidad y gracilidad de muchas construcciones estructurales de hoy, se aprecia, también, en las de otras épocas, como la gótica; pero más como expresión de otros ideales superiores, mientras que, ahora, parece encontrar en sí misma su finalidad, al servicio, en todo caso, de un criterio técnico económico que nunca se había incorporado tan directamente a la expresión estética.

En cambio aquellos sentimientos más idealistas, que acusaba, por ejemplo, el simbolismo místico del medioevo, han desaparecido; y si el arte moderno pugna, sin lograrlo hasta ahora, por incorporar la nueva técnica y los nuevos materiales al sentido religioso, hay que confesar que, salvo rarísimas excepciones, en la iglesia moderna, se necesita mirar el emblema de la Cruz o los temas de las vidrieras para distinguirla de un salón profano, en el que se cumplen a maravilla las condiciones técnicas de la acústica y la iluminación.

Inevitablemente el positivismo, que con sus tristes consecuencias lo invade todo, domina el arte de la construcción; pero, así y todo, el sentido de la belleza no se ha perdido; y, si bien se mira, se llega a comprender el valor de esta época de transición en la que la humanidad pugna —a veces bien extraviadamente— por alcanzar otra etapa mejor en la que los anhelos de ésta triunfen y encuentren su pregón apropiado en las nuevas formas y técnicas de sus construcciones.

Cuando pueda hacer un alto en el camino, cuando recobre la serenidad imprescindible para madurar su arte, cuando tenga tiempo de repetir y de retocar sus tipos como hizo con otros estilos, y pase la hora actual ansiosa de originalidad, estas ideas y tendencias madurarán en obras tan perfectas como las del arte clásico; porque nada hay, de esencial, que se oponga a ello, sino que, por el contrario, los medios, los problemas y las responsabilidades son hoy mucho mayores que lo fueron jamás.

Ya que de originalidad se ha hablado, no está de más recordar que «originalidad es volver al origen», como repetía Gaudí, el gran arquitecto. Si la originalidad es simplemente

una meta para distinguirse de los demás, si carece de razón intrínseca, si no es la consecuencia de aplicar los viejos principios, siempre verdaderos, a los nuevos problemas, abandonando el lastre del amaneramiento inconsistente, necesariamente pasa, de un valor positivo y genial, a convertirse en fragante expresión de una triste conjunción de la propia vanidad con la impericia del artista, que, en ese momento, deja de serlo para convertirse en mentalidad incongruente y perversa. La originalidad del artista no debe servir solamente para que se hable de él, sino para que merezca que se hable bien.

Se lee en muchos libros que el mejor maestro del artista es la naturaleza a la que debe imitar; pero, el naturalismo no va con las tendencias actuales, ni cabe en estas estructuras. Aparte de que la época romántica haya sido barrida por la técnica, es que las construcciones son esencialmente obra artificial –en el buen sentido de la palabra, según el cual, artificial liga con artífice, no con artificioso–; y es obra estática. No se trata, aquí, de representar las formas naturales, como en pintura, manejándolas como medio de expresión de conceptos artísticos, emotivos o de otro tipo. En construcción, no cabe la fórmula del arte por el arte, porque, como se dijo al principio, las obras se hacen para algo más y son algo más. Tienen una personalidad, una finalidad y unos medios de realización, en gran parte, independientes de lo puramente natural. La construcción, en medio del paisaje, debe rimar con él; pero, en muchos casos, utilizándolo como zócalo y acompañamiento, por resonancia o por contraste, de la propia construcción que, por sus proporciones y dinamismo, se impone sobre el paisaje, dominándolo.

Por lo demás, quizá pueda decirse que el proyectista de hoy niega, a su obra, el valor de lo pintoresco; aunque es dudoso que, en construcción, se haya buscado nunca conscientemente y con éxito. Pero, no cabe duda de que resultaría desagradable para el creador si le dijese de una de sus estructuras, que era bonita y pintoresca. El encanto de lo pintoresco proviene de la heterogeneidad desordenada y sin plan previo, al menos aparente, de los prolijos elementos que mezcla; y es, por tanto, incompatible con la elegante sencillez y la razonada justificación funcional que pretende darse hoy a las construcciones y, más especialmente, a las del campo estructural.

El ritmo, en fin, es apreciado como en las mejores épocas, en cuanto el juego de elementos se presta a ello; lo que pasa frecuentemente por efecto de la prefabricación y de la modulación consiguiente.

Y para terminar, no puede olvidarse que la belleza de las construcciones, se capta a través de la vista que es, quizás, el sentido más engañoso de los cinco que nos han sido concedidos.

Este punto, como más concreto, está más estudiado; y en los textos es fácil encontrar multitud de observaciones y reglas interesantes para el proyectista.

Todas ellas derivan del hecho de que la emoción estética proviene de la sensación, cierta o errónea, de la vista, sin que el observador pueda evitarlo. Interesa, por tanto, más que la obra en su realidad geométrica, su apariencia ocular; y hay que enjuiciarla previendo todos los efectos de perspectiva y sombra con que va a aparecer a los ojos del observador.

De poco vale la belleza de un arco, si no hay punto de vista para abarcarlo por entero. La sombra del voladizo del tablero proyectándose sobre el arco corta desagradablemente

la vista de éste. La visión de una recta, de una curva, o de un volumen, viene influenciada por las que le rodean en el campo de la visión; así, por ejemplo, la recta del tirante de un arco rebajado, da la sensación de curva con concavidad opuesta a la del arco. Un rectángulo, dentro de una ojiva, aparece deformado. La ligereza aparente de una viga puede aumentarse mediante un perfil que dé líneas de sombra longitudinales. Y así, pueden multiplicarse los casos de efectos análogos.

Sabido de sobra es que los griegos, maestros en este género de sensibilidades ópticas, corregían y ponderaban sus intercolumnios, bajo los frontones de sus templos, para mejorar la impresión estética de su ritmo de columnas.

Pero, aparte de estos efectos puramente ópticos, hay otros en los que interviene más el factor psicológico. La sensación que produce el fondo de una viga, es más agradable si tiene algo de contraflecha; y análogamente, resulta preferible dar algo de pendiente al sofito de un voladizo, y mejor hacerlo cóncavo que plano; quizá porque el fenómeno resistente se haya grabado en el subconsciente, quizá porque las formas de la naturaleza lo hayan enseñado así. El hecho es que las líneas, que corresponden a la deformación por efecto de la carga, dan sensación de cansino agotamiento y de intranquilidad, en contraposición de las opuestas que lo dan de potencialidad. Las ramas del chopo siempre serán más alegres que las del cedro o las del sauce.

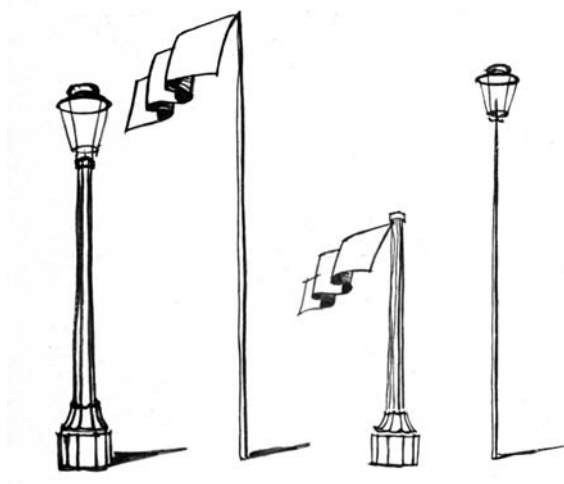
Factores psicológicos de este u otros tipos, difíciles de precisar, tienen, sin embargo, influencia fundamental en la concepción y expresión formal de la estructura. ¿Por qué un pie de farola ha venido siendo mucho más macizo y resistente de formas que un mástil de bandera en el que la flexión, por efecto de viento, es mucho mayor? Y, sin embargo, tratad de cambiar uno por otro (fig. XVII. 5).

Porque, no hay que olvidar que uno de los encantos de la belleza radica precisamente en no derivar, obligada y deductivamente, de procesos lógicos. Se pueden encontrar leyes generales que todos los artistas llevan en el corazón; pero, nunca son suficientes para determinar la producción artística como consecuencia obligada de un sistema de ecuaciones. En este caso, el problema queda indeterminado. A la figura femenina no le basta cumplir todos los cánones de proporciones y medidas, que han ido encontrando los eruditos, si le falta la personalidad que se acusa en el brillo inteligente de su mirada y en la expresión dinámica de su sonrisa. Y, del mismo modo, la obra requiere tener una personalidad. Es inútil sobrecargarla de reglas y reglillas, ni buscarle razones resistentes o funcionales. La Victoria de Samotracia (fig. XVII. 6) no podrá nunca volar, porque es de piedra y porque la superficie de sus alas es, a todas luces, aerodinámicamente insuficiente para ello; pero, en ruinas como está, sin brazos, ni cabeza, seguirá apareciéndose como compendio de todos los sueños de superación y de predominio del ideal sobre la materia.

La mejor regla, que puede darse para obtener una estructura verdaderamente estética, es que el autor posea una serena y aguda sensibilidad artística con fecunda imaginación creadora, unida a la técnica necesaria para comprender la finalidad y el mecanismo de su función resistente.

Y no se diga que, en esta última condición, se acusa la deformación profesional del técnico.

XVII-5. Farola y mástil.



XVII-6. Victoria de Samotracia. De «Arch. Phot. d'Art et d'Histoire», París.

No, todo arte requiere una técnica. Los aciertos artísticos de Velázquez o de Goya sólo fueron posibles gracias a su profundo conocimiento de la técnica pictórica de su tiempo y a los avances que en ella introdujeron con la suya propia. Y en el tema que aquí se trata, la técnica es principalmente la estático-resistente; que, tantos adhesios se hacen por carecer el técnico de educación y de sentido estéticos, cuantos disparates nacen de la imaginación del artista carente de preparación y comprensión técnicas.



XVII-7. Edificio industrial S. C. Johnson & Son, en Wisconsin. Arquitecto Frank Lloyd Wright. Fotografía: Ezra Stoller.

En resumen, y aparte de las correcciones que para el mejor efecto estético requieren los efectos ópticos, psicológicos y tradicionales sobre las formas estructurales de origen puramente técnico, el sentido artístico actual considera, como coadyuvante del valor estético, la función estructural y la expresividad de su fenómeno resistente; incluso la cree esencial en aquellos casos en que la obra es eminentemente una estructura. Prefiere lo simple a lo complejo, odia el engaño y desprecia la ayuda ornamental. Sin tendencia hacia el naturalismo, ignora el valor de lo pintoresco o se rinde ante la impotencia para lograrlo; ama el ritmo; gusta de expresar la graciosa potencialidad tensional de que es capaz como reflejo del triunfo de su técnica; acusa la importancia del material y oculta la influencia de los constructivo y económico; requiere una educación técnica del observador y tropieza con la dificultad de obtenerla, dada la rapidez evolutiva del progreso técnico; y, en consecuencia, se resiente de falta de tiempo y serenidad para perfeccionar el valor estético de sus tipos estructurales.

XVIII

Línea y superficie

En este espacio de tres dimensiones que la providencia ha deparado a la humanidad, no puede ésta prescindir de ninguna de ellas para sus construcciones. Si se habla de estructuras lineales o superficiales, sólo quiere decirse, con ello, que dos o una de las dimensiones de sus elementos son pequeñas frente a las otras; pero, por reducida que cualquiera de ellas pueda llegar a ser, siempre son necesarias las tres para dar, a la obra, realidad material. El constructor trata, en general, de evitar el gran macizo, de tres dimensiones comparables, porque su gran volumen es índice de su coste. Las pirámides de Egipto o los enormes macizos de tierra babilónicos, quedarán como ejemplo del enorme sacrificio que un poder absoluto impuso a un conjunto anónimo de esclavos en aras de un ideal menos duradero que sus obras, porque valía menos que el esfuerzo que exigió.

Si hoy, en las grandes presas de gravedad, los volúmenes igualan o superan aquéllos, es simplemente porque el ingeniero no ha encontrado, para esos casos particulares, otra solución más ligera y suficientemente resistente. No es por falta de ganas de evitar ese volumen, y quizá no tarde mucho en encontrar, para ellas, otra solución, como la ha encontrado para cerrar valles parecidos.

La gracia y el mérito de la técnica actual está en encontrar formas resistentes más ligeras, gracias a las cuales ha podido resolver problemas insolubles ayer: palazones formadas de piezas esbeltas, o láminas delgadas, hábilmente combinadas y con los materiales apropiados.

Pero, aun cuando de un macizo se trate, su volumen viene siempre limitado y se presenta a la vista, por sus superficies envolventes; y éstas, a su vez, por las líneas que marcan sus bordes.

Solamente la esfera, cerrada y perfecta sobre sí misma, no requiere de bordes para definirse, ni presenta líneas ni puntos singulares en su contorno. Algo parecido, pero no tan completo, les ocurre al elipsoide y sus análogos.

Aun así, la esfera se nos aparece limitada por la circunferencia que define el cono visual de la mirada; y sobre ella, la luz define líneas entre luz y sombra, gracias a las cuales –más que al poder estereoscópico de nuestro binocular– se aprecia su forma esférica; arcos de círculo que, en la perspectiva, dan lugar a curvas, a las que instintivamente se devuelve su forma real, en el espacio, por complicados reflejos psíquicos.

Pero, en construcción, no existen esferas, elipsoides ni huevos completos aislados como puede ponerlos una gallina. Salvo algunos casos de depósitos esféricos o en forma de gota de agua, siempre aparecen estas formas incompletas; y, aun en aquel caso, requieren soportes y aditamentos que dan, con sus líneas y sombras, carácter al conjunto.

Las formas de revolución y, en particular, la cúpula continua, es decir, sin nervios acusados sobre su superficie, es menos frecuente, en el arte clásico, de lo que pudiera pensarse que debiera haber sido.

Este género de cúpulas, de grandes posibilidades entre las estructuras laminares, suele ir limitado por un paralelo inferior y, frecuentemente, por otro superior para la claraboya o el cupulino.

Como se dijo al tratar de este tipo estructural, la cúpula esférica no es mecánicamente posible con los materiales clásicos frangibles, en espesores relativamente reducidos, más que con ángulos máximos menores de 51° , lo que da necesariamente un perfil rebajado. Sin embargo, estéticamente se ha preferido, en general, la media esfera completa, al menos para la contemplación interior, aun a trueque de tener que armarla o reforzarla ocultamente para hacerla posible.

Es curioso cómo, para que esta forma exterior representase algo posiblemente estable sin tracciones, se requeriría que el intradós siguiese una curva (fig. XVIII. 2a) que, desde dentro, no sería nada satisfactoria. Y es igualmente curioso que si a un espectador irreflexivo —que se encuentra fácilmente— se le pregunta qué ley de espesores imagina en una cúpula, contesta indefectiblemente, que espesor constante o creciente de clave o arranques; y al preguntarle si no le hace el efecto de que aquello va a reventar por riñones, contesta que sí, pero que nunca se le había ocurrido pensarlo. En cambio, será raro que presienta que puede dar empujes en el plano de arranque; y lo mismo le sucede frente a un arco de medio punto.

Por otra parte, la cúpula hemisférica elevada ofrece, a la vista, un perfil circular con menos de 180° de abertura, y el efecto óptico y psicológico completo sólo se logra pasando ligeramente del hemisferio.

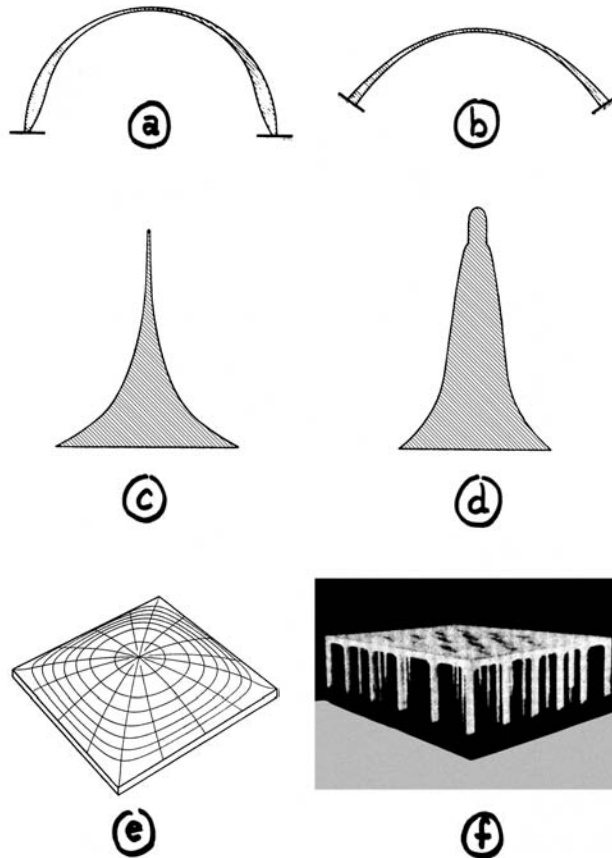
Cosas más o menos parecidas ocurren con la cúpula en elipsoide; si es un elipsoide rebajado, el efecto de reventar por riñones es mayor; si es peraltado, las condiciones resistentes mejoran, y es extraño que se haya empleado tan poco.

Admitido que el material sea traccio-resistente, la directriz de la cúpula no queda muy obligada por exigencias mecánicas; las tracciones o compresiones de los parale-



XVIII-1. Depósitos esferoidales, Chicago Bridge & Iron Co.

XVIII-2. Leyes de espesores.



los se encargan de centrar el funicular sobre el meridiano; tampoco lo queda cuando la cúpula es suficientemente rebajada para no dar tracciones y poder ser construida con materiales frangibles.

Las cúpulas clásicas, de planta circular o poligonal, presentan frecuentemente nervios meridianos exteriormente acusados, de directriz apuntada como corresponde a la presencia del cupulino; y su perfil, aparente en trasdós, sigue una línea de curvatura creciente hacia el arranque con razón mecánica para esto, si se supone que los nervios soportan el peso de los gajos que quedan entre ellos; cosa que, en general, no es cierta. No se olvide, sin embargo, que su perfil es inseparable del tambor sobre el que insiste y de la cornisa que los separa; elementos que, a su vez, necesitarán ser traccioresistentes para contrarrestar los empujes de la cúpula; o de lo contrario, habrían de presentar espesores muy fuertes.

El perfil del intradós es menos definido visualmente, por la falta de líneas y sombras acusadas, mientras no se establezcan nervios para producirlas.

Mecánicamente, lo que habría de definirse es la directriz o superficie media y la ley de espesores; por ambas, quedarán definidos el intradós y el trasdós. Pero, se requerirían dimensiones enormes para que los resultados tensionales tuviesen verdadero valor impositivo. Puede decirse que la cúpula es tan eficaz, como tipo estructural, que el material rara vez está totalmente aprovechado en compresión; y, no separándose

mucho de las directrices lógicas, las armaduras dentro de la lámina (borde aparte), tampoco son importantes. Si quiere, sin embargo, afinarse el perfil para que resulten compresiones constantes en toda la lámina, tanto según los paralelos como según los meridianos, resulta la forma de generatriz de la figura XVIII. 2b.

La torre, si no ha de soportar más que su peso propio y los empujes del viento y construida con un material pobre sin resistencia a tracción, da lugar a un perfil tal como el de la figura XVIII. 2c. Parece, pues, que los constructores de la torre de Babel hubieran debido amoldar las rampas de sus zigurats a esa figura, en lugar de seguir el criterio puramente constructivo de mantener esas rampas con ancho y pendientes constantes para hacerlas ir creciendo como un caracol que lo efectuase por capas superpuestas sucesivas.

Para sostener un volumen cubierto en lo alto de un macizo de revolución, sin producir tracciones, éste toma la forma acampanada de la figura XVIII. 2d con una discontinuidad que marca la altura a partir de la cual el peligro de las tracciones queda superado por el de la propia resistencia a compresión del material. La semejanza de este perfil con el de los grandes «frapanges» indochinos (fig. XVIII. 3) es verdaderamente impresionante.

Para los rotundos bulbos de las cúpulas orientales rusas o sirias (fig. XVIII. 4), sólo puede decirse que aquello no son cúpulas ni tienen nada que ver con el fenómeno resistente, como las mismas graciosas curvas helicoidales, aparentes en muchas de ellas, acaban de pregonar. Sólo podrían ser formidables y elegantes gotas de un líquido



XVIII-3. Frapange del Vat Thuk, en Bangkok. De la «Hist. del Arte», K. Woermann.

viscoso, salido de una gigantesca pipeta encantada de las mil y una noches, y sostenidas sobre su base por tensión superficial. Quizá los físicos pueden encontrar, así, la expresión analítica de su directriz.

Por el contrario, en un silo, parece claro que la forma pedida por el fenómeno resistente sería la de tinaja (fig. XVIII. 5) de superficie específica reducida; y en la que la zona inferior, con mayores cargas, resiste con menores radios, manteniendo un buen ángulo para el deslizamiento del árido contenido; mientras la parte superior se aproxima, en su forma, al cono del árido vertido por la cúspide. Como siempre, el afinamiento de la curva meridiana, que define la superficie de revolución, aceptaría retoques importantes respecto a la curva óptima que no interesa estudiar ahora. Si, en la práctica, este tipo de silo se sustituye por el cilindro vertical con fondo cónico, es exclusivamente por su mayor economía de encofrado.

Porque las superficies de dos curvaturas de igual signo, son incómodas y costosas de moldear; y han requerido, para ello, habilidades constructivas como las de Nervi, ya citadas en el capítulo VIII, o las desarrolladas por Zeiss-Dividag para sus cúpulas hormigonadas sobre la propia armadura metálica triangulada e inscrita en la superficie de aquéllas; o la solución más divertida y original, de hormigonar alrededor de un gran globo hinchado a presión, lo que también se ha hecho. El ladrillo, sin embargo, permite construirlas con facilidad; sobre todo porque, al ser de revolución con eje vertical, las cúpulas presentan la muy interesante propiedad mecánico-constructiva de ser



XVIII-4. Cúpulas bulbiformes.
Fotografía compuesta: C. de Benito. La gota, en primer término, es de aceite.



XVIII-5. Tinajas de La Mancha.
De «España», J. Ortiz Echagüe.

autorresistentes en los períodos intermedios de la construcción, siempre que ésta se lleve por paralelos circulares sucesivos desde arranques hasta clave (fig. XVIII. 16). Es de esperar, pues, que los constructores de fábrica de ladrillo se decidan a sacar de ellas todo el partido posible, que es muy grande.

Ventajas parecidas presentan estas superficies bicóncavas en otros muchos casos, en los que no se trata de superficies de revolución. Por ejemplo, sobre planta cuadrada, una superficie, como la indicada en la figura XVIII. 2e, permite cubrir sin esfuerzos cortantes y con compresiones unitarias limitadas. Algo parecido le ocurre a la superficie de la figura XVIII. 2f para el caso de cubiertas sobre apoyos aislados distribuidos en retícula rectangular.

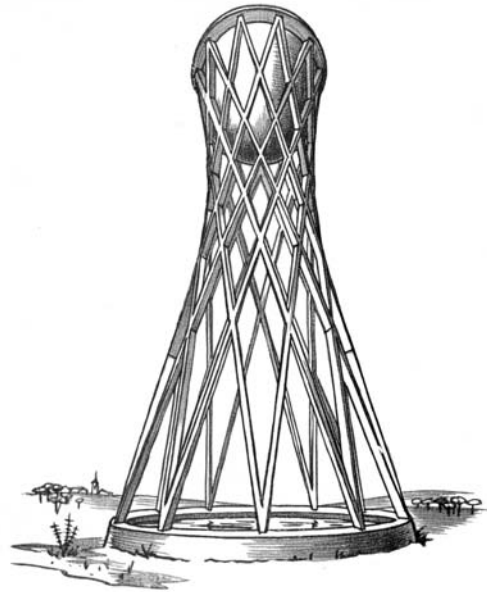
Para encofrar en hormigón armado presentan, por el contrario, mucha más disposición las superficies regladas con dos curvaturas de distinto signo, entre las que hay que citar, como más simples geoméricamente, el hiperboloide de una hoja y el paraboloides hiperbólico, rara vez empleados en construcción.

Solamente el hiperboloide de garganta circular ha encontrado su lógico desarrollo en las exigencias funcionales de los grandes refrigeradores de las modernas centrales con turbinas de vapor (fig. XV. 1) que los han hecho surgir en alineaciones formidablemente expresivas. Y aun en ellos, el artista hubiera podido acusar el juego maravilloso de sus generatrices rectas, que se enroscan sobre su superficie con rectilínea ascensión envolvente (fig. XVIII. 6).

Es característica fundamental, de todas estas superficies alabeadas, el aparecer cóncavas en una dirección y convexas en la perpendicular, lo que les presta una expresión estética totalmente nueva y específica, desconocida de los estilos consagrados.

Sus secciones y líneas de sombra pueden dar lugar a circunferencias, elipses, parábolas, hipérbolas y rectas según su orientación; y al variar ésta, se pasa insensiblemente de unas a otras.

XVIII-6. Proyecto de depósitos para el Hipódromo de Madrid. Ingeniero E. Torroja.



Son, por consiguiente, superficies muy aptas para enlazar unos bordes rectos con formas y perfiles curvos, y pueden encontrar aplicación en problemas muy heterogéneos. Aparte de su empleo en los voladizos del Hipódromo de Madrid (fig. XII. 22), donde la sola lámina de hiperboloide llena toda la función resistente sin necesidad de vigas, entramados, ni refuerzos de ninguna clase, se puede, solamente a título de ejemplo curioso y, por así decir, imprevisto, indicar su posible aplicación como pontón de desagüe de una vaguada a través de un terraplén de carretera (fig. XVIII. 7). Su doble curvatura le presta la rigidez necesaria en su trabajo como arco; la sección transversal se acomoda bien a los empujes de las tierras; las boquillas dibujan sus elipses sobre los taludes; o, inclusive, los perfiles o secciones, según la vaguada, ofrecen un buen abocinamiento del perfil hidráulico.

Igualmente, en ciertas pilas de puente y tajamares podrían tener aplicación apropiada superficies alabeadas de éstos y otros tipos.

Por el contrario, las superficies desarrollables, como el cono y el cilindro, han sido repetidamente utilizadas desde muy antiguo, especialmente este último. El cono, empleado bastante en cubiertas, ha sido desechado de los intradoses de cúpulas por poco estético; y, en realidad, fuera de las ligeras ventajas constructivas, presenta una forma resistente menos satisfactoria, a la vista, que la cúpula de doble curvatura.

El cilindro, y particularmente el de la directriz circular de medio punto, ha sido el más empleado en bóvedas de cañón. Su encuentro, con otros de menor radio, da lugar, en los lunetos, a una curva bien conocida del arte renacentista y sobre cuyo valor estético puede discutirse bastante; pues, su doble contoneo en el espacio produce, a la vista, una sensación algo extraña.

La bóveda corrida lisa, lo mismo que la cúpula esférica, vista desde el interior, produce una sensación de indefinida monotonía que el artista trata de cortar acusando en ella, mediante arcos perpiaños o nervios saliente, su propia curvatura. La necesidad

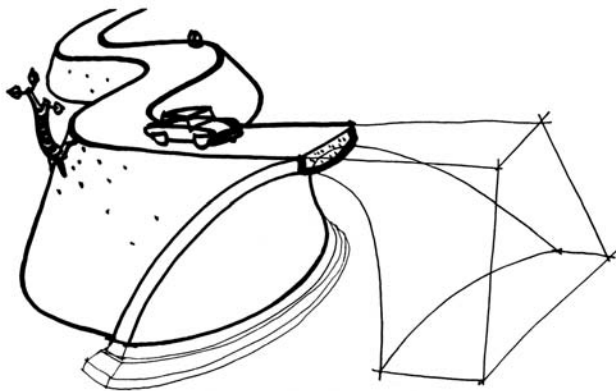
es mayor con materiales continuos, como el hormigón, que con la cantería, cuyas juntas fijan y distraen más la vista. Y como el peligro de pandeo o de flexión es mucho mayor en el cilindro que en la cúpula, por la falta de la segunda curvatura, el primero pide mecánicamente, más que la segunda, el refuerzo de los nervios. En definitiva son ellos y las boquillas los que definen la apariencia de la bóveda; porque, como se ha dicho antes, son las aristas y las líneas las que acusan aparentemente la superficie sobre la que se dibujan; y la bóveda cilíndrica podría considerarse como una sucesión monótona de arcos paralelos todos iguales.

El arco, mientras ha ido acompañado por el muro, tampoco ha requerido mecánicamente una directriz precisa. El arco de círculo, de medio punto o el escarzano, y el elíptico perfecto o sustituido por el carpanel de varios centros, llenan la historia de la Arquitectura (fig. XVIII. 8). La fabricación en serie de dovelas de ladrillo o adobe, todas iguales, conduce al arco circular; y utilizada en roscas inclinadas, como hacía la técnica constructiva caldaica (fig. VIII. 1), debió producir el arco elíptico rebajado, quizá con sorpresa para su constructor.

El mismo deseo simplificador pudo conducir, en estilos más avanzados, a sustituir la elipse por un arco de varios centros, tres o cinco normalmente. Pero, es posible, que fuera también la sensibilidad artística del artífice la que le indujera a esto último, no como un recurso de su pereza constructiva, sino como un nuevo afinamiento de sus líneas; porque la semi-elipse resulta, para algunos, un poco demasiado baja de riñones; y es lo cierto que los arcos carpaneles clásicos envuelven siempre la elipse de iguales semiejes, separándose más de ella por riñones o entre riñones y arranques; que todo depende de donde se le supongan los riñones al arco.

Tampoco está de más decir que, a un observador sensible y exigente —como debiera ser todo observador—, el arco de tres centros acusa todavía demasiado la discontinuidad de su curvatura.

Más que la elipse, acusa el defecto antes apuntado la cicloide (fig. XVIII. 8) que, aunque presenta particularidades interesantes y curiosas como directriz de la membrana cilíndrica, presenta el inconveniente de que la proporción, entre eje horizontal y vertical, no es libre como en la elipse, sino obligada justamente al valor pi.



XVIII-7. Pontón de desagüe en hiperboloide.

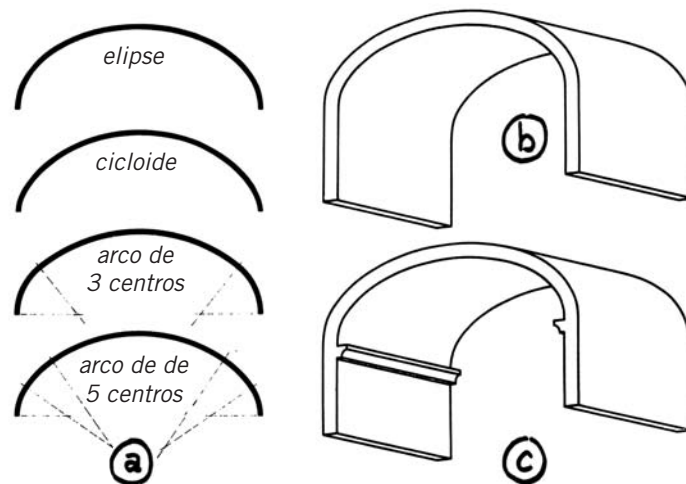
La cuestión, de las discontinuidades de la curvatura, se acusa igualmente al pasar de la archivolta de medio punto a las aristas rectas del muro que la sostienen y continúan. La discontinuidad se hace más sensible en el arco elíptico rebajado (fig. XVIII. 8b). En él, la curvatura va aumentando hacia el punto de tangencia con la arista vertical del muro de curvatura nula. Si su efecto es satisfactorio, o no, es problema que cada lector puede meditar por su cuenta; pero, quizá no sea ajeno a ello la cornisa que frecuentemente separa ambos elementos. Cornisa (fig. XVIII. 8c) que, por su lado, oculta el arranque del arco y exige mayor sobrelevación del eje horizontal del medio punto o de la semielipse por encima del plano superior de aquélla, igual que pasaba en las cúpulas.

Y aun cuando estos detalles se separen un poco del tema, no estará de más señalar que el sentido de la proporción hizo también, cuando de arcos escarzanos se trata, colocar esa cornisa bastante por bajo del arranque del arco (fig. XVIII. 8c) dejando, por encima de ella, una cierta altura de muro vertical en proporción con la sagita del arco.

El asunto de las proporciones y composiciones de volúmenes, superficies y líneas es tema distinto del simple trazado o forma propia de éstas. Libros enteros se han escrito sobre esa cuestión desde los tiempos de Vitrubio, sin que hayan llegado a un acuerdo estos autores entre sí, ni con los constructores del Partenón; y, sin embargo, puede decirse que sólo la recta y el círculo entran en ellos.

Es un hecho que, todavía, el proyectista de hoy aparenta ignorar el caudal de líneas y superficies de personal belleza que han ido definiendo y analizando esos matemáticos que llaman puros; y que, posiblemente, no se paran tampoco, en sus estudios, a contemplar el encanto de sus dibujos.

Volviendo al tema, en cuanto el arco es exento, y ha de aprovechar bien su resistencia a flexión, pide seguir el funicular de las cargas. Si éstas fuesen sólo las de su peso propio con espesor constante, resultaría la catenaria (fig. XVIII. 9a); si se extiende uniformemente sobre la horizontal del tablero, es la parábola de segundo grado; y si es la combinación del peso propio, el del tablero y el tímpano, se acostumbra a tomar la parábola de sexto grado, como suficientemente aproximada a la ley teórica en coseno hiperbólico según Strassner.

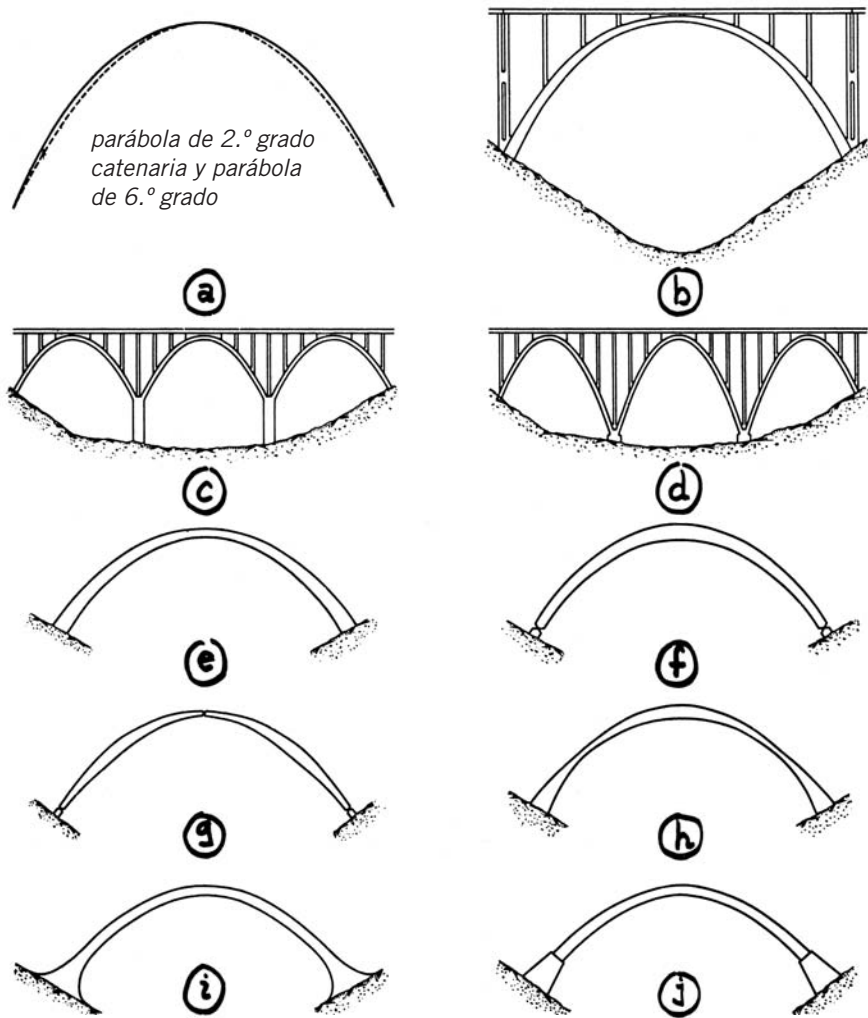


XVIII-8. Distintos tipos de arcos.

La parábola del arco de puente, cualquiera que sea su grado, es una línea de curvatura decreciente, desde clave hacia arranque; curva que desaparece, al llegar a éste, en un punto que no presenta, para ello, ninguna personalidad dentro de la curva. Parece que, en su curso naturalmente indefinido, tropiece inopinadamente con el obstáculo imprevisto del arranque y muera allí de muerte violenta (fig. XVIII. 9b). Y menos mal si encuentra el valle normal a su recorrido; siempre es más noble morir de frente.

En arcos rebajados, su variación de curvatura es menor y su efecto más satisfactorio. En arcos peraltados, siempre resulta hundida de riñones y, si va sobre pilas altas, el cambio de alineación, entre ellas y las aristas de éstas, da al conjunto un efecto poco agradable; parece que está pidiendo que los arcos bajen a buscar sus arranques en el terreno (fig. XVIII. 9c y d).

Pero lo que da carácter el arco es, tanto su directriz como la ley de espesores a lo largo de ella. El cálculo y la vista van, aquí, de acuerdo para pedir un canto mayor en



XVIII-9. Directrices y espesores de arcos.

arranques que en clave; y es corriente hacerlo variar en función del coseno del ángulo (figura XVIII. 9e) de la directriz con la cuerda. En arcos biarticulados, la ley de espesores es, lógicamente, decreciente de clave a rótulas (f); y en el triarticulado, decreciente de riñones a rótulas (g), lo que ya no resulta estético tan fácilmente.

Sea como quiera, las curvas de intradós y de trasdós, que resultan, son de expresión matemática complicada y, como el reparto de espesores no necesita ser muy afinado, podrían tomarse, para ambos perfiles, leyes también parabólicas o de tipo exponencial, lo que da una mayor libertad de trazado; pues, estudiada, en un caso particular, la ley óptima resultó tan poco agradable como la dibujada en la figura XVIII. 9h.

La acción de la sobrecarga viva y de los efectos locales de empotramiento sobre el estribo aconsejan, con frecuencia, aumentar sensiblemente el espesor del arco junto al arranque. Para atender a este fenómeno se ha trazado muchas veces una curva de acuerdo entre el arco y el estribo o la pila (fig. XVIII. 9i); ello acusa todavía más el mal efecto, por el cambio de ley geométrica de curvaturas. Resulta preferible acusar la discontinuidad diferenciando los salmeres del arco propiamente dicho (fig. XVIII. 9j).

Todo esto enseña que las curvas mecánicamente definidas no siempre van de acuerdo con lo que pide la estética, y que la mano del artista tiene su propio campo en la corrección de aquéllas, problema que da mucho que meditar y sopesar.

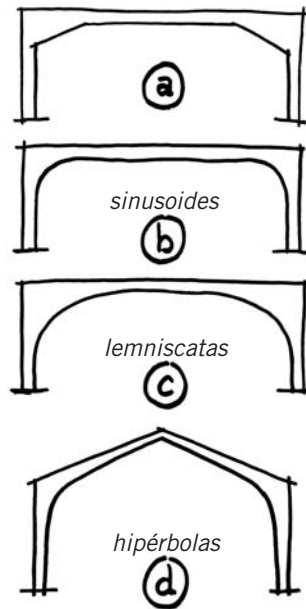
Y no ha de menospreciarse el hecho de haber tipos que han nacido y se han sostenido, en la evolución del arte, por simple adhesión estética, sin aparente razón funcional ni resistente; tal sucede con el misterioso nacimiento del arco de herradura en el arte visigótico, al que tan fuertemente se adhirió el árabe, y lo mismo sucede con el arco túmido apuntado. Mientras tanto, otros más lógicos, como, por ejemplo, los arcos elípticos peraltados, que parecen iniciarse en los portales de las murallas heteas, no tuvieron seguidores.

Si bien el arco es curvo por esencia, no es ni con mucho el único donde la curva se cuida con esmero. En la misma columna, que parece ha de ser expresión de la recta por antonomasia, la curva suave, pero bien definida, acompaña su fuste como presintiendo los dolores iniciales del pando.

La viga, prescindiendo de las ligeras contraflechas circulares o parabólicas que los artistas le han dado, a veces, para evitar efectos ópticos desagradables, ofrece el problema de sus curvas de cartabón en cuanto es continua o monolítica con el soporte. Ciertamente, la construcción moderna ha acostumbrado un poco el ojo a la acusada dureza de los cartabones triangulares (fig. XVIII. 10a); pero también se ha empleado en ellos la curva con los mismos problemas citados al hablar del arranque del arco. La unión de la recta con la curva del cartabón plantea siempre un problema estético difícil.

Parece lógico que la recta deba enlazar con la curva en un punto de ésta de curvatura nula; y, por consiguiente, que curvas como la sinusoides o la lemniscata sean más aptas, para ello, que los arcos de elipse, parábola o hipérbola (fig. XVIII. 10b y c).

Pero si la curva del cartabón ha de enlazar con la columna, acusando el efecto de pórtico, y ha de quedar envuelta, por así decir, en el polígono que forman los faldones de cubierta y los muros verticales, la hipérbola puede servir muy bien; especialmente si el soporte va articulado en la base y el pórtico es a dos aguas (fig. XVIII. 10d).



XVIII-10. Pórticos acartelados.

Las asíntotas de la hipérbola, llevadas a coincidir con el paramento del soporte y la línea de pendiente de la cubierta, se corresponden con la curva; y la vista se satisface con la ley geométrica perfectamente definida y aparente del conjunto. Las hipérbolas de la torre Eiffel son un buen ejemplo del efecto estético que puede sacarse de ese tipo de curva (fig. I. 2).

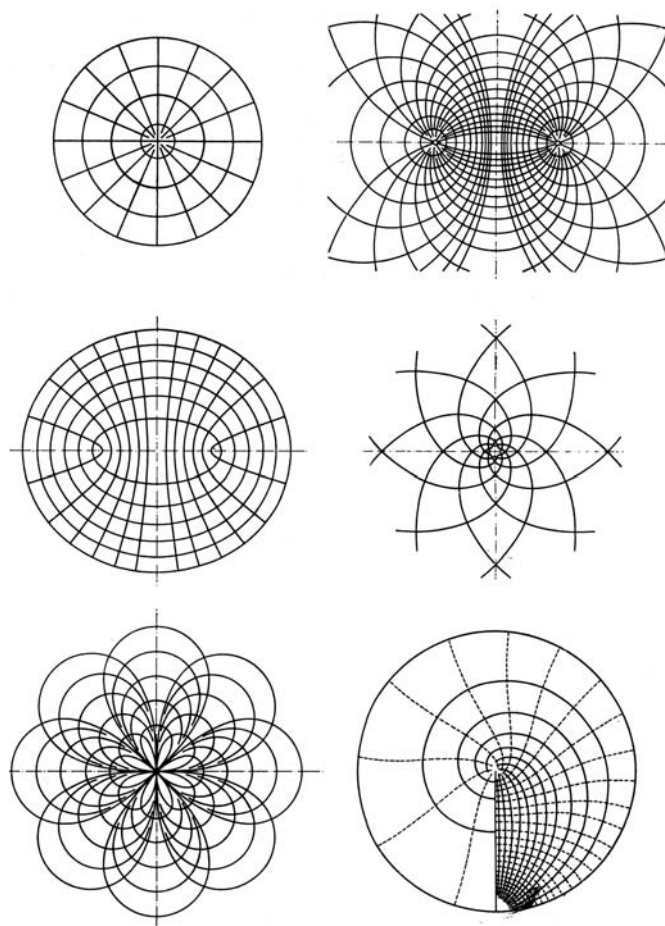
Volviendo al eterno conjunto de soportes y dinteles y al difícil enlace que crean cuando el pórtico quiere hacerse monolítico, es interesante señalar que el dintel recto sobre la columna, con su base, fuste y capitel, determinan una envolvente racional desde el punto de vista resistente, que la arquitectura clásica prefirió rehuir, convirtiendo el perfil continuo en otro acusadamente discontinuo y heterogéneo. Ciertamente, la discontinuidad del material, formado de sillares independientes, favorecería esta solución; pero también pudo influir en ello el interés que los artistas sintiesen por dar a esas curvas un valor estéticamente satisfactorio. El caso es que justamente en esos ángulos entrantes es donde se alojan siempre las mayores exuberancias ornamentales; bajo el oscuro sofito de la ménsula se agrupan los modillones como nidos de golondrina apegados al rincón del alero. La insinuación es demasiado atrevida para tratar de defenderla; si se la señala aquí es solamente como un medio de llamar la atención sobre temas cuya meditación y contraste con el propio gusto, es el mejor medio de afinar éste.

La Arquitectura ha huido frecuentemente de la curva, no sólo por economía constructiva, sino por la dificultad estética que presenta el tener que amoldarse a cambios de alineación obligados. La curva tiene su personalidad propia y se conforma difícilmente al papel secundario de simple enlace entre alineaciones rectas que se imponen sobre aquélla. La curva nace por sí sola o se quiebra en las manos del artista, que prefiere sustituirla, entonces, por la franca discontinuidad del ángulo. Porque el ángulo

no es un recurso ni una condescendencia; es la consecuencia esencial del encuentro de dos alineaciones. Es la singularidad misma, con toda la personalidad que ello lleva consigo. Y de entre todos los ángulos, el recto es el preferido, porque es el de personalidad más específica; el que no admite más ni menos; el que no perdona los errores con que se le trace. Es duro como la verdad exacta.

La retícula de verticales y horizontales, cruzándose en ángulo recto, ha sido capaz, por sí sola, de dar nombre a todo un estilo: el perpendicular inglés. Nada hay tan congénito en la arquitectura de todos los tiempos como la horizontalidad de los pisos y la verticalidad de la gravedad.

Pero el valor del ángulo recto se acusa, no sólo entre rectas, sino también entre curvas. Dos familias de curvas geométricas ortogonales constituyen siempre un conjunto expresivo cuajado de valores de perfección. Los radios y los círculos concéntricos, las circunferencias bipolares, las elipses y las hipérbolas homofocales, las espirales logarítmicas, la roseta de lemniscatas (fig. XVIII. 11), etc., son, entre tantas otras, soberbias pruebas de esos valores que el artista debiera conocer y que podría utilizar, no ya como tema puramente ornamental, sino también con clara función mecánica en muchos casos.



XVIII-11. Familias de curvas ortogonales.

En cuanto al valor estético de esa ortogonalidad de dos familias de curvas, no se resiste la tentación de señalar su presencia en los complicados entrelazados de los primitivos artistas vikingos o celtas (fig. XVIII. 12); y encuentros en ángulo recto siguen pidiendo hoy nuestros ojos cuando se trata de trazar el ritmo de láminas cilíndricas polilobulares (fig. VIII. 4) con perfiles de gaviota.

Son figuras que no requieren corrección de ningún género; mientras que la recta, por el contrario, es la línea más sensible de todas a las influencias de cualquiera otra que figure con ella en el campo de la visión. Las correcciones griegas, a las rectas de sus arquivoltas, son finísimas, pero bien efectivas correcciones de la recta, hechas precisamente para darle su valor de infalible rectitud. Puede decirse que, en Arquitectura, la curva perfecciona la belleza de la recta.

En cuanto se trata de aparejar rectas con curvas, de cuya familia no forman parte, son las rectas las que padecen; y el efecto óptimo se hace presente en ellas, en demanda de una corrección antigeométrica; tal sucede, por ejemplo, con el tirante en el arco atirantado, cuya alineación recta, para parecerlo, pide curvarse ligeramente en el mismo sentido que el arco, como es bien sabido y practicado.

Porque ni la curva ni la recta pueden trazarse o contemplarse solas. Siempre van en relación con otros elementos. El arco se completa con los estribos o con el perfil del valle; la viga, con el soporte, etc. El mismo voladizo, o ménsula clásica, viene influido por el perfil de la pilastra en la que se empotra y sin la cual no puede existir, como no puede vivir la rama sin el tronco que la sostiene y la alimenta.

El voladizo no sufre prácticamente exigencia mecánica alguna en cuanto a su directriz, que puede amoldarse libremente a las imposiciones funcionales; por el contrario, su ley de espesores es bien definida para cada tipo de material. En piedra, los vuelos



XVIII-12. Relicario de la campana de S. Patricio (siglo XI). Museo Nacional de Dublín. De «Summa Artis», J. Pijoán.

son necesariamente pequeños y el buril del cantero juega con libertad; las curvas convexas por abajo y con curvatura necesariamente creciente a partir del arranque, son las clásicas de los capiteles dóricos. Pero, siendo el borde superior horizontal, es la curva de sofito cóncavo la que corresponde a un perfil de igual resistencia.

Aun manteniendo la ley de espesores teórica, el libre juego de la directriz permite amoldar la línea vista a perfiles muy variados. En el gran voladizo del campo de Las Corts, de 25 metros de vuelo (fig. XV. 7), el sofito sigue una curva con inflexión, servilmente copiada de la naturaleza y que se adapta perfectamente a las exigencias funcionales, que pedía un campo visual completo sobre el área de juego con un mínimo de altura en el borde del voladizo para defender mejor de la lluvia las filas de asientos delanteros, dejando, al mismo tiempo, la mayor altura de techo posible para los espectadores de las filas del fondo. El punto más bajo de la curva facilita, en fin, el paso de las tuberías de recogida de agua de la cubierta. Un entablado discontinuo, muy ligero, alinea sus tablas a lo largo de la curva, cortando la longitud, y acusando nítidamente a la vista, la forma de la ménsula. Si se hubiese dado un perfil continuamente inclinado hacia delante, aun con curvatura decreciente, el efecto de vencimiento por el peso hubiese sido desagradable. Pero bastó resolver hacia arriba el borde para cambiar totalmente el aspecto, porque la curva, gracias a las muchas modalidades y variables que encierra, permite un lenguaje mucho más matizable que la simple recta.

El arquitecto de estos últimos años ha achacado con frecuencia a la curva la blandura como calidad peyorativa; pero, en ese sentido, puede asegurarse que sólo son blandas las curvas mal trazadas y peor enlazadas. Ni aun atribuyendo virilidad a la recta y femineidad a la curva —lo que sería vanamente discutible—, podría considerarse eso como un defecto, porque ambos tipos contienen sus cánones propios de la belleza, y porque es demasiado peligroso establecer paralelismos entre cosas y conceptos tan heterogéneos. En todo caso, se antoja que la femineidad, con todas sus gracias, correspondería más a la voluble curvatura de la línea inflexa.

No debe interpretarse todo esto como preferencia por una curva sobre otra, ni sobre la misma recta y el plano. El rectángulo plano, sobre cuyas proporciones óptimas tanto se ha discutido, llena toda la arquitectura clásica y moderna; pero, sobre todo, el plano, liso vertical, de piedra o de ladrillo, ha alcanzado hoy tanta o más importancia que nunca. El juego de paralelepípedos lo ha llenado todo durante unos decenios y ha mostrado efectivamente valores insospechados.

Sin embargo, cuando entre las líneas que lo definen domina la vertical, no es raro que la recta se incurva suavemente a buscar un talud como en el célebre Ayuntamiento de Estocolmo (fig. XVIII. 13), tan antiguo ya, para ser tan moderno. Si los rasca-cielos no se incurvan de esa forma, parece ser tanto porque el ritmo uniforme de ventanas no lo permite, como por necesidad de simplificación constructiva.

Pero el plano de límites rectos permite otra porción de soluciones, desde los muros ataluzados, tan caros al arquitecto egipcio, y los frontones triangulares helenos, tan típicamente funcionales, hasta abarcar todo el conjunto de poliedros regulares o no; desde la pirámide de base cuadrada, que sólo impone por sus enormes dimensiones, hasta el dodecaedro de la figura XVIII. 14, utilizado como depósito de carbón en



XVIII-13. Torre del Ayuntamiento de Estocolmo. Arquitecto Ragnar Östberg.

Madrid y que puede construirse fácil y económicamente con placas prefabricadas todas iguales.

En estas figuras poliédricas, el juego de luces y las líneas de sombra se amoldan exactamente a las aristas trazadas por el proyectista, lo que les presta una limpieza y dureza de contornos típica. No sucede como en las formas de doble curvatura o aquellas en que el plano se anima con relieves, cornisas y molduras; en superficies de doble curvatura son las líneas de sombra las que casi dominan a las otras y hacen mucho más difícil el problema por su continua variación con las horas del día y juego de las estaciones.

Si se ha alargado este capítulo hablando de líneas y superficies y apuntando la razón mecánica y las rígidas leyes geométricas que llevan dentro, no es por creer que sean necesariamente éstas las que han de determinarlas inexorablemente. Ya se ha indicado cómo, en la mayoría de los casos, puede variarse ligeramente su trazado, sin que la resistencia sufra por ello. Lo que no se debe es alterarlas desconociendo lo que pueden representar en el fenómeno tensional. Aun cuando un afinado sentido estético induzca a trazarlas, en algunos casos, a sentimiento, hay que tener mucho cuidado en ello, porque la justeza de la leyes —y más si son geométricas— tiene una razón de ser peligrosa de torcer.

Se ha querido llamar la atención de los innumerables conjuntos de curvas y superficies que ofrece la geometría y del enorme caudal artístico que poseen, prácticamente desconocido por los técnicos y proyectistas de la construcción. Curvas y superficies, costosas y absurdas de empleo con ciertos materiales, pero que podrían desarrollarse maravillosamente con otros y solucionar óptimamente determinados problemas funcionales que no se planteaban en épocas anteriores.

XVIII-14. Silo de carbón, en el Instituto Técnico de la Construcción y del Cemento. Arquitectos G. Echegaray y M. Barbero. Ingeniero E. Torroja. Fotografía: M. García Moya.

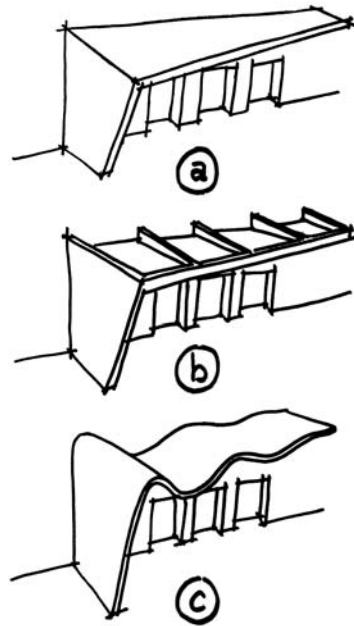


Es necesario, por ello, que el proyectista se interese más en observar y analizar las formas, las leyes que las rigen y los efectos mecánicos y estéticos que producen las especiales características geométricas de sus contornos.

Mucho hay que admirar en los indiscutibles éxitos obtenidos por el artista moderno con la recta, el plano y el paralelepípedo; éxitos tanto más difíciles cuanto más restringidos son los medios que se permite manejar (fig. XVIII. 14); pero no deben olvidarse las posibilidades de solución que ofrece la curva.

Por ejemplo, el voladizo de una marquesina que, por razones funcionales, presente planta trapezoidal o triangular y pida, por un lado, un plano vertical de defensa contra el sol, ofrece la solución plana (fig. XVIII. 15a) en losa de espesor variable, que resulta demasiado pesada en cuanto el vuelo es un poco grande. Por ello, se convierte en la solución (b) de viguetas con forjado inferior, de igual apariencia que la anterior y con más complicación de desagüe. Pero, cabe también la solución en la lámina curva (c); en ella, a medida que disminuye el vuelo, va rebajándose el canto que proporciona la onda amortiguada definida por una expresión analítica de tipo exponencial. Cuál de ambas soluciones satisfaga mejor el problema y resulte más en armonía con el resto de la construcción, será cuestión que habrá que considerar en cada caso.

Análogos comentarios a los expuestos en este capítulo podrán hacerse sobre otros puntos de parecida importancia, tales como: textura de la superficie, influencias y leyes de los colores, proporciones y contrastes de masas, ritmos, etc. Mucho puede decirse de todas estas cuestiones; pero, unas son ajenas al problema resistente fundamental de lo que se llama la estructura, y de otras se ha escrito ya bastante. Por eso, se ha limitado el comentario al trazado de las líneas y las superficies, por ser las más intrínsecamente ligadas al fenómeno tensional y sobre las que quedan mayores posibilidades vírgenes de toda explotación por parte del técnico de la construcción.



XVIII-15. Soluciones del voladizo de una marquesina.

Todas ellas tienen sus leyes matemáticas y físicas de las que derivan sus efectos; y cuanto más se conozcan, cuanto más se haya estudiado, observado y sentido frente a ellas, más posible será realizar una obra perfecta y comprender conscientemente sus virtudes y vicios. El artista no debe olvidar nunca que la estética, con su componente subjetiva innegable, está, sin embargo, íntimamente ligada a las propiedades geométricas, analíticas, mecánicas y resistentes de las superficies y líneas que delimitan las masas de la construcción.

Cada curva matemática lleva una verdad en su ser, la justeza de una ley, la expresión de una idea, el pregón de una virtud; y el negarlo, sólo puede buscar excusa en el ciego reducto egoísta de una ignorancia perezosa.



XVIII-16. Bóvedas tabicadas del Mercado Sagrera, en Barcelona. Arquitecto B. Bassegoda.

La génesis del esquema estructural

Aunque el proceso conceptivo de la estructura sea un arte y, fundamentalmente, el resultado de una intuición experimentada, aunque no se logre nunca por el simple juego deductivo de unos razonamientos lógicos, cabe, sin embargo, como en todo arte, dar unas reglas generales; pero, bien entendido que las que aquí se den, ni serán todas ni tan siquiera las más importantes para cada caso.

Con ello y con todo, se ha considerado conveniente entrar en ellas aun a trueque de no lograr más que un amasijo desarticulado de simples vulgaridades. Cuando menos, servirán para traer a la superficie otras que el lector lleve dentro, y para marcar unas directrices que le sirvan de orientación en su busca y en su valoración; porque no existe ningún método que permita llegar automáticamente a la elección del tipo estructural más adecuado para cada problema concreto que se le plantee al proyectista.

Es una cuestión, en gran parte, de costumbre, de intuición y de imaginación, de buen criterio y de condiciones personales.

Solamente la propia experiencia puede ahorrar o disminuir el trabajo de tanteo necesario para asegurar la elección entre las diferentes soluciones que se vean posibles. Nunca debe darse de lado una solución, sin tener la seguridad de que no ha de llevar ventaja sobre las otras.

El tiempo empleado en la concepción y tanteo de nuevas soluciones es el más útil de todos para la formación del individuo, y el que ha de permitirle, después, enjuiciar los nuevos problemas que se le planteen, con mucha más soltura y probabilidades de éxito; porque, como dice Max Scheler, el saber, que aquí se necesita, es ese saber preparado, alerta y pronto al salto ante las circunstancias más variadas; o sea, el saber de aquellas cosas que, precisamente por haber sido asimiladas, ya no recordamos, pero que actúan en nosotros después de haberlas olvidado.

La forma de trabajar, para llegar a la solución deseada, ha de variar de una persona a otra, y sólo pueden darse unas reglas muy generales o vagas.

Lo primero que habrá de hacerse es concretar bien las condiciones funcionales que constituyen el planteamiento del problema; distinguir, entre ellas, las absolutamente necesarias y definidas, de aquellas otras que han de cumplirse en el mayor grado posible; ponderar estas últimas, unas con otras, cuando resulten, en cierto modo, contrapuestas; y, por último, considerar, en tercer lugar, las que sólo señalan una simple conveniencia supletoria al problema fundamental y que deben, en caso necesario, sacrificarse a las anteriores.

En muchos casos, estas condiciones establecen, por sí solas, unos volúmenes bien delimitados y unas posiciones e intensidades de las cargas, que convienen croquizar, incluso en perspectiva.

Hay que cuidar de no olvidar o menospreciar ninguna condición funcional. Si alguna se sacrifica, ha de ser a conciencia de ello y bien justificado el porqué.

Es frecuente, también, que existan condiciones no impuestas expresamente, bien porque se deriven de otras, bien porque quien planteó las condiciones funcionales, las olvidase o pensase que entraban implícitamente en las demás.

Después, han de introducirse las limitaciones, orientaciones, condiciones y conveniencias que imponen las distintas exigencias que se han venido analizando anteriormente: el material, el fenómeno tensional en sus líneas fundamentales, el terreno, el proceso de ejecución, la estética, las construcciones colindantes, etc.

Ha de verse qué materiales son los propios de la localidad, cuáles otros pueden emplearse y cuáles resultan, y hasta qué límite, prácticamente prohibitivos; qué imposiciones presenta la cimentación. No importa que resista tres kilos o cuatro; pero sí, si resiste diez o uno sólo; si va a dar lugar a asientos y de qué tipo, etc.

Establecido todo esto en las cuartillas para no olvidarlo y en la cabeza para manejarlo todo conjunta y rápidamente a lo largo del proceso creador, hay que coger el lápiz para representar, en primerísimos esquemas, los tipos estructurales que se imaginen. Después han de compararse con el tipo clásico utilizado corrientemente para el grupo de problemas a que pertenece el que se tiene planteado. Nunca será tan original el problema que no tenga un precedente parecido.

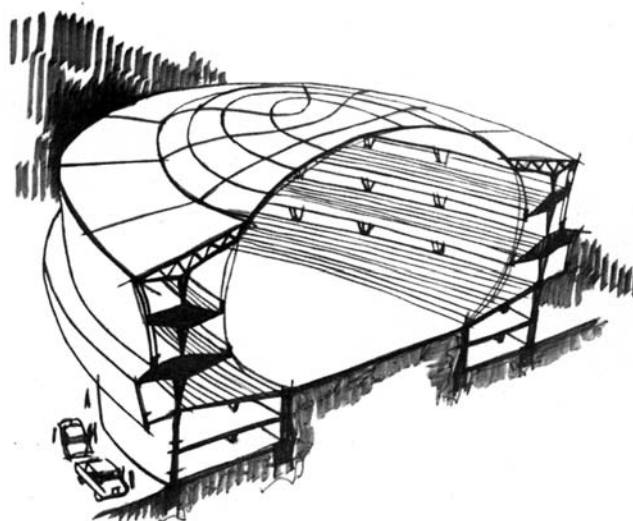
Pronto aparecerán los inconvenientes del plan funcional en relación con las exigencias resistentes de la estructura que lo resuelve. Frecuentemente se ve que la estructura resulta forzada o demasiado complicada, y que estos defectos se solucionarían mucho mejor si tal o cual elemento o condición funcional fuese modificada. Si el plan o programa de necesidades y conveniencias se ha hecho sin pensar al mismo tiempo en la estructura, es lógico que esto suceda; y si, en algún caso particular no sucede, es por simple casualidad.

Hay, pues, que buscar y rebuscar todas las posibilidades capaces de aminorar la dificultad del problema planteado o incluso de anularlo; porque, en esto como en tantas otras cosas de la vida, una de las mejores formas de resolver un problema es suprimirlo y cortar por lo sano, como Alejandro con su nudo. Y así, se llega a cambiar de ubicación una construcción cuando el terreno, donde se proyectaba, presenta grandes dificultades; o se reducen las cargas de nieve, dando mucha pendiente a las cubiertas; o se disminuyen los empujes de viento sobre grandes hangares, dando la oportuna forma a su superficie envolvente; que más vale disminuir estas cargas y empujes, con los que se ha de luchar, que tratar de soportarlos en toda su magnitud.

Evidentemente no se puede ir contra los elementos o datos esenciales e imprescriptibles del programa funcional; pero, no hay que confundirlos con un capricho o con una forma especial de resolverlo funcionalmente. Cuán pocas veces podrá asegurarse realmente y demostrarse que no puede existir otra disposición funcional que resuelva el problema, por lo menos, tan bien como la propuesta.

Una cosa es el programa de necesidades y otra la solución funcional que se ha encontrado para cubrir eficazmente aquel programa; y es demasiado frecuente el confundirlos y empeñarse en que la estructura se conforme con resolver la cuestión como pueda, sin que el que dio la disposición funcional quiera saber nada de aquélla, ni preocuparse

XIX-1. Anteproyecto del Palacio de Deportes. Arquitecto S. Zuazo. Ingeniero E. Torroja.



de los apuros que pasa, la pobrecilla, para meterse en esa horma y lograr que no se venga todo abajo.

Aun prescindiendo de otras razones, siempre hay una exigencia económica, un mínimo posible de coste que se debe buscar; y no se puede cejar en ese empeño mientras no se tenga la seguridad de haber agotado las posibilidades y haberlo sopesado todo con sus pros y sus contras.

Al analizar las posibilidades de adaptación y los inconvenientes que la solución presenta para el caso particular de que se trata, hay que hacerlo sin prejuicio ninguno y con un espíritu de crítica agudo, amplio y exigente.

Lo corriente es que los datos del problema presenten alguna faceta para la cual la solución clásica, u otra cualquiera, no estaba pensada. Las soluciones clásicas son magníficas para un grupo general de problemas; pero, como es lógico, no tienen por qué ser las óptimas para cada caso particular dentro del grupo; y es frecuente que, por falta de espíritu crítico, por no adentrar suficientemente en el fondo de la cuestión y filosofar por qué y para qué creó la humanidad aquel tipo estructural, se haga, en cada caso concreto de la vida profesional, una tontería más y un insulto a los que con tanto trabajo fueron elaborando, al cabo de los años o de los siglos, los modelos de estructuras que ponen gratuitamente a disposición de las nuevas generaciones.

Por ejemplo, en un pequeño pueblo, cuyo nombre no hace al caso, le pidieron a un ingeniero que proyectase un puente sobre un cauce que cruzaba el pueblo, para evitar, así, el rodeo a que obligaba otro puente más alejado. Por razones de economía estaban dispuestos a suprimir, de sus exigencias, el paso de vehículos; de ese modo, al ser las sobrecargas mucho menores, el puente podría resultar económico y entrar en las posibilidades del Ayuntamiento.

El proyectista se encontraba con estos datos y con un cauce canalizado, que presentaba el nivel de agua a muy poca profundidad respecto a las calzadas que trataba de unir. Era necesario elevar la rasante, o hacer un puente de tablero inferior. La buena

calidad de las laderas permitía bien el establecimiento de un arco; éste resultaba lógicamente más económico que la viga. Elegido el arco, cabía hacerlo superior al tablero (fig. XIX. 2a), en dos arcos gemelos, algo separados, para colgar de ellos el tablero por medio de pendolones y viguetas transversales. Pero, esto resulta más costoso que hacer el tablero superior apoyado sobre pilarcillos pequeños en un arco inferior (b); en la zona central, el tablero podía apoyar y hasta confundirse con el propio arco. La solución clásica de arco de tablero superior parecía resolver, pues, el problema. La diferencia de rasantes, entre este tablero y las calzadas de las calles laterales, estrechas, obligaba a poner unos cuantos escalones, lo que constituía un inconveniente que, aun reconocido y sopesado, los vecinos aceptaron de buen grado, ya que, con ello, el puente resultaba lo suficientemente económico para poder pagarlo y les ahorraba un largo rodeo. Alguien debió pensar que ya no podría ir con su caballería; pero, todo lo daban por poder pasar ellos.

Bien, ¿cuál es el defecto? Sencillamente el no haberse preocupado el proyectista de criticar la solución clásica que adoptó; el no haber analizado para qué y por qué sus antecesores habían colocado en aquella disposición todos y cada uno de sus elementos. El arco, con tablero superior, tiene toda su razón de ser para una carretera que desciende por las laderas de un valle hacia el río que ha de cruzar. Pero, en este otro caso, el arco obliga a elevar la rasante y es sólo una razón económica, no funcional, la que le impone. El tablero se coloca para establecer un camino horizontal o de muy escasa pendiente y hacer posible el paso de vehículos. Aquí no tiene esa función; y las escalerillas añadidas al tipo clásico debieron destacar, a los ojos del proyectista, la anormalidad de la situación.

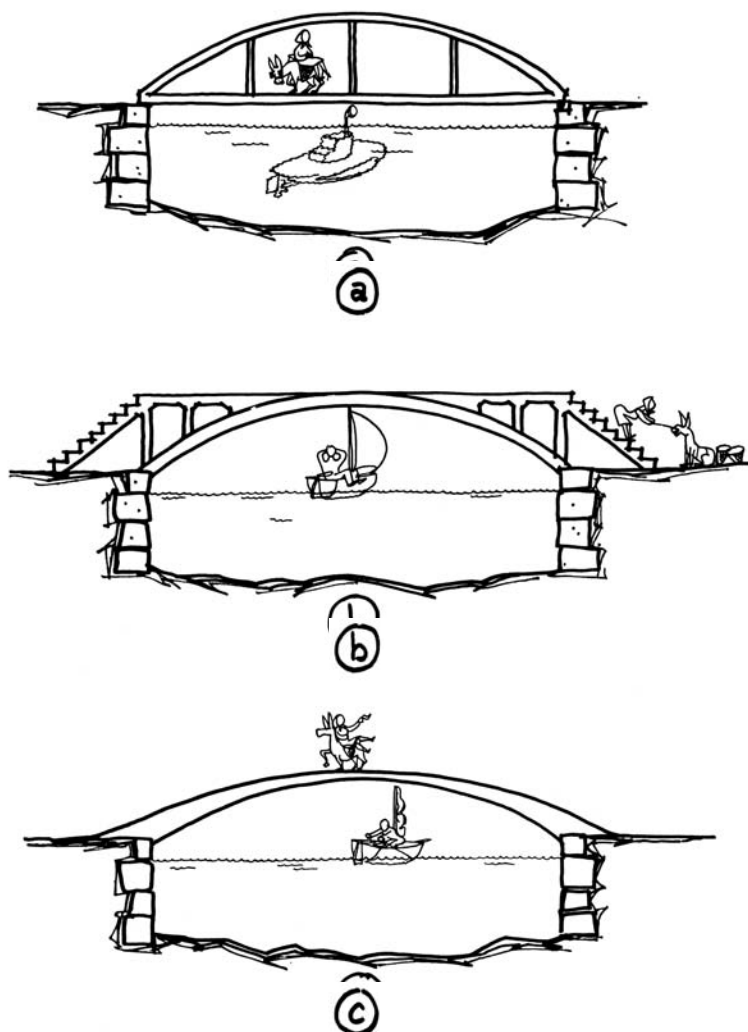
Bastaba suprimir el tablero, su entrevigado y sus pilarcillos (fig. XIX. 2c), para que el arco, por sí solo, resolviera la totalidad del problema funcional; en todo caso, bastaba reforzar un poco su espesor en arranques y buscar un enlace suave con las calzadas contiguas. Con la economía consiguiente habría habido dinero de sobra para reforzar el arco, si hubiese sido necesario, y permitir la sobrecarga, poco mayor, de las caballerías cargadas.

Al pasar en coche, por allí, había un borrico mirando las escaleras..., y el autor pisó el acelerador. Si existe algún puente parecido, nadie crea que se refiere a éste. Su pueblo está muy lejos y su fantasía más lejos todavía.

Volviendo al tema. Partiendo de las soluciones clásicas o buscando las nuevas combinaciones a las que vayan conduciendo las exigencias especiales del problema particular, habrá de mirárselas siempre con la más dura y variada crítica para que, conocidos sus inconvenientes y defectos, se pueda huir de ellos u obligarles a conducir de la mano hacia una solución mejor: aun cuando no se lograra, ¡cuántas cosas no se habrán aprendido sin quizá darse cuenta de ello!; cosas que vendrán a ayudar después, como nacidas oportunamente en la propia mente, al estudiar más tarde otros problemas que, al parecer, nada tienen que ver con aquel que ya se olvidó.

Si en el empeño se topa con una solución totalmente nueva o que, en cierto modo, se puede considerar como tal —pues en realidad nada hay nuevo bajo el Sol—, debe criticársela más todavía; dejarla descansar unos días, liberando la imaginación de su obsesión y el entusiasmo vanidoso de su adhesión. La noche aconseja, decía Salomón;

XIX-2. Puente pueblerino.



y cuando se vuelve a coger la solución, a la mañana siguiente, es probable que aparezca como una gran tontería. Por lo menos, esto ocurre, en los años jóvenes, más del 95 por 100 de las veces. Sí, no debe olvidarse nunca que el aprovechamiento intensivo y nunca exhaustivo de la propia vanidad es la causa más fecunda de originalidades en la técnica actual de la construcción.

La crítica debe hacerse con todos los elementos que entran o pueden entrar en la cuestión y, en especial, con los que han ocupado los capítulos anteriores, en los que no se ha pretendido hacer un verdadero estudio de la cuestión, sino solamente unos comentarios capaces de marcar las orientaciones o el sentido de los fenómenos y las influencias recíprocas que hay que considerar al hacer la crítica selectiva del tipo estructural ideado, y las modificaciones que pide para ir satisfaciendo las exigencias que se le plantean desde los distintos sectores.

Como ya se indicó, es fundamental estudiar el esquema con los materiales –incluido el terreno entre ellos–, y con el proceso de ejecución en la cabeza, simultáneamente.

Hay que pensar siempre que el proyecto, como su mismo nombre indica, no es nada mientras no se construye, y requiere, ante todo, ser construible; es decir, fácil y económicamente construible.

Respecto al terreno, si hace temer asientos fuertes o desiguales, será conveniente pensar en estructuras isostáticas. Y, aun así, ver si los movimientos, que se presumen, no perjudicarán demasiado a la utilización de la obra. Tal puede suceder, por ejemplo, con vigas de puente grúa, que requieren una horizontalidad perfecta; porque, en ese caso, o habrá que ir a buscar en profundidad la rigidez requerida, o habrá que forzar esa rigidez de la estructura para que ella, de por sí, obligue a los cimientos a bajar por igual, a pesar del gran sobrecosto que ello suele representar.

Si el terreno es flojo, y las sobrecargas no son demasiado grandes, convendrá buscar unos materiales que permitan hacer la construcción muy ligera. Si la cimentación es buena, pero a profundidad –y no por pilotes–, convendrá concentrar prudentialmente los cimientos aumentando su separación para ver si, con el ahorro que de ello puede obtenerse, se compensa el sobrecosto que se produzca en la superestructura.

Por el contrario, en las cimentaciones por pilotes, es frecuente que, siendo limitada la carga admisible de cada uno de ellos, se requiera un número de pilotes grande que, al no poder aproximarse entre sí más que hasta un cierto límite, cubra necesariamente un gran por ciento del área que ocupa la obra y aconseje, por consiguiente, aproximar, en lo posible, los soportes o hacerlos continuos para disminuir el coste, tanto de las zapatas o encepados como de las vigas y elementos horizontales de la estructura que se apoya en esos cimientos.

Ciertas construcciones rígidas y relativamente ligeras, sobre un terreno muy flojo como el fango, pueden prestarse mejor a una cimentación flotante superficial que a una profunda, por pilotes, si el subsuelo sigue siendo blando en profundidad. No es único, ni mucho menos, el caso de unas casas cuyos muros van cimentados sobre una especie de batea flotante, muy rígida, de hormigón armado, y que han bajado varios centímetros sin ningún agrietamiento ni inconveniente por ello. La ciudad de Méjico ofrece ejemplos muy interesantes.

Una vez elegido el material, la estructura ha de mirarse muy concienzudamente en cuanto a los fenómenos tensionales que se producen en ella; fenómenos que habrán de indicar sus defectos y ventajas y la conveniencia de modificar el tipo estructural en determinados sentidos.

Nunca se insistirá bastante sobre la necesidad de prever y analizar todas las formas posibles de trabajo y de hundimiento de una estructura, bajo la acción de todas las posibles causas de fenómenos tensionales, cargas normales o accidentales, efectos térmicos, de retracción, etc. El olvido de cualquiera de ellas, al hacer el trazado del esquema estructural, puede hacer que, una vez terminado el cálculo, se observe la inconveniencia del tipo adoptado y obligue a empezar de nuevo todo el trabajo; o, lo que es peor, a rehacer la construcción si, después de hecha, acusa los peligros del olvido con su amenaza de ruina.

Hay que cuidar de no olvidar ninguna solicitud, externa o interna, que pueda producir estados tensionales dignos de tenerse en cuenta. En caso de duda sobre su

importancia, siempre será fácil hacer un tanteo o guiarse por los consejos que, al efecto, suelen dar las normas de construcción en cada país.

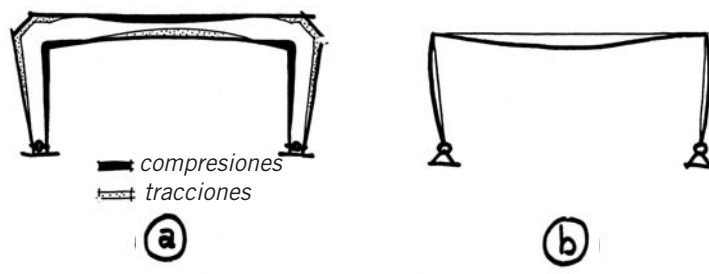
Si se olvida que puede soplar el viento y producir, no sólo empujes, sino también succiones, o que el paso de un tren puede causar efectos de resonancia en la viga del puente, o que la retracción existe, o que el terreno puede romperse y deslizar por fuera de la estructura llevándosela entera, es fácil encontrarse con efectos desagradables que hacen exclamar frecuentemente al novato: «¡Quién lo iba a decir!»; y la construcción no lo dice, lo hace.

Si se trata de un entramado o estructura lineal, pueden distinguirse en el dibujo, con colores diferentes, las piezas que trabajan exclusivamente a compresión simple o compuesta, las que trabajen a flexión y las que lo hagan a tracción; e, incluso, se pueden indicar, con el mayor grueso de estas líneas, las zonas más cargadas de esfuerzo (fig. XIX. 3a). En general, con un poco de práctica o ayudándose de sencillísimos tanteos con la regla de cálculo, es fácil hacer este esquema con la burda aproximación que se necesite para establecer un primer concepto de la forma de trabajo. Ha de cuidarse, naturalmente, de no superponer o confundir los anchos representativos de esfuerzos que no pueden verificarse simultáneamente y, en cambio, sumar los anchos de los que representen esfuerzos superponibles. De este modo, es fácil ver la disposición y el orden de magnitud que van a adoptar los esfuerzos determinantes de las escuadrías que convendrá emplear. Se verá su concentración en determinados nudos o zonas, el desequilibrio entre unas zonas y otras, etc.

Meditando en las causas de ello (excentricidades excesivas de funiculares, etc.), irán surgiendo, como de la mano y sin esfuerzo, las modificaciones de forma que el fenómeno tensional está pidiendo; y se verá si, desde el punto de vista de las premisas funcionales, son aceptables dichas modificaciones, o no; dónde pide cambiar la directriz; dónde correr los soportes; dónde introducir una rótula que libere fuertes flexiones concentradas en zonas difíciles de reforzar; o, en fin, se verá la conveniencia de saltar a otra solución distinta.

El dibujo de la estructura deformada (fig. XIX. 3b) es también muy útil en estos casos, como complemento del anterior, y aun por sí solo; pues es fácil de trazar directamente, si bien no lo es tanto, ni mucho menos, el darle valores aproximados a puro sentimiento.

Si se trata de una forma apropiada para el estudio en elasticidad plana, el trazado de isostáticas es la mejor representación del fenómeno; pero, en general, se requiere mucha práctica para poder intuirle. Por eso, la fotoelasticidad puede ser un buen auxiliar en



XIX-3. Deformada de un pórtico.

casos en que valga la pena su utilización; pues, esta técnica nunca es tan sencilla como parece deducirse de las exposiciones de algunos autores.

En estructuras superficiales, también un tanteo del plexo tensional es de gran valor para el encaje de los esfuerzos en el plano tangente a la superficie. La imaginación de las flexiones es más complicada; sin embargo, con costumbre, es relativamente fácil presumir su existencia en ciertas zonas, por la consideración del equilibrio de membrana continua, que muchas veces es conocido, y la del efecto de las reacciones externas suprimidas o establecidas en el borde; pues son éstas las que provocan las flexiones necesarias para establecer el equilibrio, que se ha roto al cortar la membrana continua por el nuevo borde.

Cuanto mayor sea la experiencia de que se disponga sobre casos análogos, más rápida será la intuición del estado de tensión o de deformación de la estructura que se tantea; y cuanto menor sea aquélla, más necesitará el proyectista de cálculos y tanteos para enjuiciar la situación.

Por eso, es desgraciadamente frecuente que otros ojos, bien experimentados y avezados en estos estudios, vean de golpe la inutilidad del trabajo empleado en calcular una estructura con todo detalle y perfección; porque el tipo o disposición general adolezca de defectos que el proyectista novato no pudo captar; o, si lo hizo, fue demasiado tarde, cuando ya el trabajo estaba hecho y el tiempo o la voluntad le faltaban, para volver a empezar.

Al hacer este análisis, se irán concretando las juntas de dilatación, la conveniencia, o no, de establecer articulaciones en determinados puntos, etc.

Por ejemplo, si en un pórtico de hormigón armado de varias luces, la longitud no es excesiva respecto a la rigidez de los soportes, podrá prescindirse de establecer juntas de dilatación; pero, si la viga, en una de las luces centrales o en determinada zona, por tener que soportar esfuerzos normales muy pequeños, se hace mucho más débil que en el resto, el efecto de la retracción tenderá a concentrarse en ella y producirá su agrietamiento si no se toman precauciones especiales para impedirlo. Una solución puede ser dejar, ahí, una junta definitiva; o quizá, una junta provisional durante la construcción para que la retracción de las dos partes de la estructura, que quedan a uno y otro lado de ella, pueda verificarse libremente antes de hormigonar la zona más débil.

Al trazar la estructura, hay que tener presente todo lo comentado sobre el funcionalismo estático-resistente. La mejor estructura es la que, a igualdad de volumen de material empleado, trabaja con menores tensiones. La gracia o el mérito no está en lograr la solución a fuerza de agotar las tensiones admisibles, sino en encontrar un tipo de estructura que resulte económica sin necesidad de agotarlas.

Una estructura tranquila, clara, con pocos elementos robustos que conduzcan los esfuerzos lo más directamente posible, desde las cargas actuantes hasta la cimentación, es siempre la mejor; y conste que lo mejor no tiene por qué ser siempre lo más económico.

En estructuras metálicas, por ejemplo, es corriente, al menos en Europa, sustituir una, de elementos robustos con mallas simples y trazado claro, por otra, formada por una maraña de perfiles delgados, con la que se logra disminuir el peso y frecuentemente el coste. Así, puede ganarse un concurso en el que se presume que la economía va

a ser la razón exclusiva de adjudicación –por ser corriente la creencia de que los costes son lo más fácil de comparar y lo que mejor descarga de responsabilidad al jurado–; pero, de ahí a que esa sea la solución mejor, y la que un buen técnico y bien administrador de sus propios intereses eligiere, va mucha diferencia. No son sólo los números los que han de decidir honradamente la cuestión; hay imponderables que el proyectista tiene que considerar y que, al buen técnico, le arrastran con atracción irresistible.

La claridad del fenómeno tensional, la buena compensación de sus formas resistentes, el puro aspecto técnico-estético, la mayor seguridad a trueque de un aumento de coste relativamente reducido, la mejor aptitud para soportar posibles esfuerzos anormales no tenidos en cuenta, etc., son factores difíciles de explicar y de ponderar e incluso de enumerar en su totalidad; pero que el técnico ha de tratar de asimilar a fuerza de observación, de espíritu analizador y crítico, y de aprendizaje bajo maestros experimentados.

Por ejemplo, en una estructura metálica, de elementos muy ligeros, se suben tres obreros a pintarla y ponen, para ello, los tablones sobre unos perfiles que, por servir solamente de tirantillas contra pandeo, tenían una sección mínima; los tres obreros se reúnen a fumar un pitillo sobre este punto débil, y se rompe, produciendo, quizá por pandeo, la deformación o el hundimiento de una buena parte de la estructura. ¿Qué los obreros no deberían haberse subido y reunido allí?; conformes; pero, ¿puede alguien asegurar previamente que no ocurrirán nunca cosas como ésta?

Y la simple oxidación de un cierto espesor superficial, ¿no produce una disminución relativa de sección y, por tanto, un aumento de la tensión de trabajo mucho mayor en un perfil delgado que en uno grueso?

Ejemplos así, podrían multiplicarse hasta el infinito. No, la economía de primer establecimiento no tiene derecho a ser siempre el factor decisivo; una estructura de pocos elementos y robustos dará siempre más sensación de cosa buena y duradera que la de tipo contrario; y lo será realmente.

Pero esto, como todo, tampoco puede llevarse a ultranza; en un justo medio está la virtud. La vivienda mínima-minimórum es la más económica; pero, al hacerla un poquito menos mínima en sus dimensiones, el costo no aumenta proporcionalmente a la superficie de las habitaciones ni mucho menos; hay, pues, una razón para no estrujar al límite la incomodidad del ser económico, que bastante desgracia tiene con serlo.

Al mismo tiempo, interesa mucho no pensar solamente en la economía de peso o de volumen de material, sino en simplificar y economizar la mano de obra, en disminuir las superficies de encofrado y cimbra, facilitar los enlaces, disminuir su número, etc.

La estructura será tanto más satisfactoria cuanto más fácil y tranquila sea su ejecución y más adaptada esté a los medios auxiliares de que se disponga, si es que requiere medios especiales para sus maniobras de montaje.

Por otra parte, hay que pensar que la estructura soportante no es más que una parte de la construcción que se trata de realizar, y cuyas economía y eficacia son las que realmente interesan. Los materiales de relleno –por ejemplo, los de muros y tabiques en

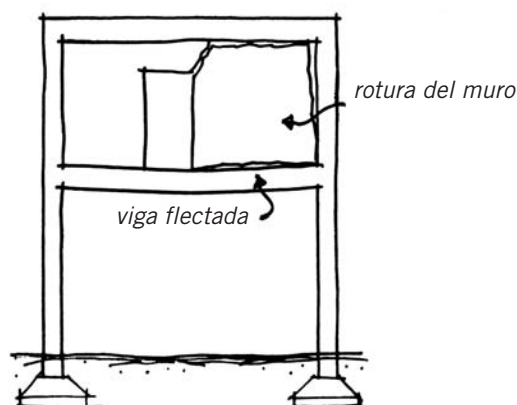


XIX-4. Hangar, en Torrejón.
Ingeniero E. Torroja.
Fotografía: Rafael de la
Joya Castro.

un edificio— pueden, unas veces, utilizarse como elementos soportantes formando parte integrante de la estructura; y en otros, por el contrario, interesa aligerarlos al máximo liberándoles de la función resistente, y confiando su sustentación a otros elementos de la estructura. En este último caso, interesa que los elementos resistentes se presten fácilmente a enlazar y sujetar los de relleno, de forma que éstos cumplan por entero su finalidad funcional, y que las deformaciones de la estructura no perjudiquen a ello.

Por ejemplo, los tabiques de división son, por su forma y dimensiones, mucho más rígidos y frágiles que las viguetas que los soportan. Al venir las sobrecargas vivas, o las muertas de pavimento, etc., a actuar sobre las viguetas, éstas flexan dejando los tabiques descolgados o apoyados solamente por los extremos (fig. XIX. 5). Basta la sacudida de un portazo, o cualquier otro fenómeno anormal, para provocar su rotura, por lo general, por esfuerzo cortante. La construcción no amenaza

XIX-5. Efecto de una viga flectada.



ruina por ello; pero, es evidente que acusa un defecto que siempre hubiese sido preferible evitar.

Análogamente, las ventajas teóricas, que pueda ofrecer una estructura de cubierta con elementos resistentes apareciendo por encima del material de impermeabilización (teja, fibrocemento, etc.), dan lugar frecuentemente a complicaciones de vierteaguas, baberos, limahoyas, etc., que se comen, con creces, las economías previstas en la estructura por adoptar tal solución.

Otro problema que hay que acometer con valentía y amplio sentido de colaboración, cuando son varios especialistas los que intervienen en la cuestión, es el de las imposiciones funcionales que coartan excesivamente las posibilidades de solución estructural.

Siempre debe reconocerse la primacía de las verdaderas exigencias funcionales; pero, en muchos casos, se aceptan, con excesiva credulidad, imposiciones procedentes de una determinada solución funcional pensada a espaldas del problema resistente o estructural. Es frecuente que otra disposición pueda satisfacer también el problema funcional impuesto; solución en la que no se ha pensado y en la que no quiere pensarse por pereza o cerrazón espiritual del especialista correspondiente. Este se enamora de una disposición elegida, sin pensar ni conocer los problemas estructurales, y se la pasa al especialista estructural para que le meta —esta es la palabra— una estructura. Y éste tiene que meterla con calzador, por los espacios y huecos que le han dejado libres, como si se tratase de algo secundario y vergonzoso en el conjunto.

Son todavía, afortunadamente, muchos los que sufren al contemplar la incomodidad permanente a que se someten estas pobres estructuras, fruto de una malhadada distocia, retorcidas y forzadas dentro de un edificio al que se esfuerzan en sostener, viviendo, en sus más oscuros recovecos, con atormentada resignación, sin que nadie las reconozca ni aprecie su heroísmo incógnito.

Ciertamente la estructura se hace, como se dijo al principio, no con finalidad propia, sino como elemento auxiliar necesario para que se sostenga algo que vale la pena de erigir y sostener. Pero, la estructura es parte, no accidental, sino esencial de toda construcción, sea arquitectónica, ingenieril, industrial o suntuaria. Ha de valorarse,

con espíritu amplio y bien equilibrado, hasta dónde cada parte, esencial o accidental, debe supeditarse a las demás.

Lo mismo sucede con las exigencias estéticas, que han de tenerse en cuenta siempre para ponderarlas sin exageración, con buen criterio y sereno juicio, considerando la finalidad y las circunstancias del caso, sin olvidar tampoco que, como dice el profesor F. Campus: «La importancia excesiva atribuida al aspecto de las construcciones, que sobrepasa lo que el técnico normal concibe como adecuado, no es necesariamente un signo de civilización; puede ser, más bien, un índice de decadencia»; y es lo cierto que la arquitectura moderna, que tanto se pavonea de racional y funcionalista, no lo será totalmente mientras no considere, entre sus funciones, la estático-resistente como esencial e imprescriptible.

El cuerpo humano no tiene el esqueleto metido con sonda por entre los huecos de las vísceras; es algo más armónico y racional, y no por eso deja de tener posibilidades estéticas. Lo funcional, lo artístico y lo estático-resistente han de ir unidos desde la concepción inicial del conjunto. Tan perjudicial es que al artista se le llame al final para dar apariencia estética a lo hecho, como que al técnico no lo quede otra misión que la de sostenerlo, o que ambos se desentiendan totalmente de las razones funcionales.

Son muchas, las veces, conviene remacharlo, en que un cambio, ligero o completo, de la disposición funcional elegida, permite resolver el problema estructural, no sólo sin gran inconveniente para lo funcional, sino incluso en beneficio suyo.

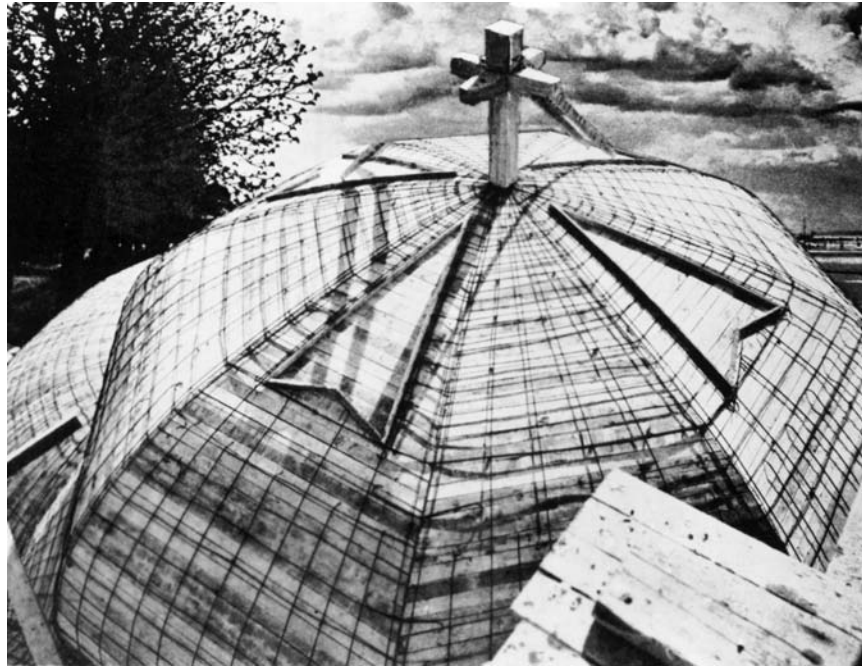
Se ha dicho antes que la estructura de mínimo material no es siempre la mejor ni tan siquiera la más económica. Así, por ejemplo, el reducir sucesivamente la escuadría de los soportes, de una planta a la siguiente superior, obliga a modificar los encofrados de los propios soportes y de las vigas que acometen contra aquéllos, y estas operaciones representan, frecuentemente, un sobrecosto superior al del volumen de hormigón que se ahorra.

Sin embargo, hay que tener cuidado de no exagerar, o mejor dicho, de no contravenir esta propia ley de economía. El ahorro de material proporciona siempre una economía que, cuando no está contrapesada por ninguna otra operación, no puede desconocerse ni menos negarse. Es frecuente, entre los contratistas, decir que la reducción de volúmenes conduce inevitablemente a absurdas elevaciones de coste. Sin embargo, hay casos en los que puede suceder lo contrario. Una lámina con fuertes pendientes, como la de la figura XIX. 6, suele requerir doble encofrado y un hormigonado delicado y difícil de apisonar; pero, si se puede reducir su espesor a pocos centímetros y la malla de armaduras es suficientemente cerrada, un hormigón oportunamente dosificado se sostiene sin necesidad de encofrado en trasdós.

Por otra parte, aunque el precio por metro cúbico pueda aumentar, no ha de olvidarse que lo interesante, desde el punto de vista económico, es el producto de este precio unitario por el número de unidades por colocar en la obra.

Por extraños fenómenos psicológicos, el contratista, en general, gana más —al menos él lo dice—, por metro cúbico de hormigón, en gruesa unidad que en unidad fina. Parece que la diferencia de coste podría fácilmente compensarse con una elevación del precio de venta. Pero los propietarios o sus representantes están acostumbrados

XIX-6. Címborio de la iglesia de Villaverde.
Ingeniero E. Torroja.
Fotografía: S. v. Kaskel.



a discutir los precios unitarios por comparación con los corrientes en el mercado, es decir, por los de las estructuras corrientes; y se llega al acuerdo por regateo sin preocuparse, por una ni por otra parte, de llevar la discusión sobre bases objetivas, de las que, por lo general, carecen, si no los dos, sí frecuentemente el representante del propietario.

Es evidente que, a igualdad de precio de venta, el contratista gana más en la unidad gruesa, que necesita menos mano de obra, menos atención y menos preocupaciones. Pero, de esto no se deduce que el producto a que antes se ha hecho referencia, tenga que ser mayor; y efectivamente, entre los recuerdos profesionales del autor abunda el caso del contratista que, tratando de ganar un concurso de proyecto y ejecución conjuntos, o encontrándose frente a un contrato a tanto alzado, venía, en una brusca conversión de espíritu, a pedir que se le redujera, aún más, el espesor de contados centímetros que se había dado a unos determinados elementos muy repetidos en la estructura.

El proyectista debe, pues, no confundir el beneficio industrial del constructor –muy respetable por cierto– con el coste total de la obra que ha de sacar de sus arcas el propietario o la entidad correspondiente.

En una lámina de hormigón armado, por ejemplo, la reducción del espesor podría, en ciertos casos, obligar a emplear una gravilla más menuda y algo más cara; pero, aparte de eso, no aumenta el coste de ninguna operación, ni del encofrado, ni de la cimbra, ni de ningún otro elemento; y si la disminución de espesor se traduce en disminución de cargas por peso propio y, por tanto, de armaduras, etc., puede ser muy aconsejable. Casos parecidos se presentan igualmente en estructuras metálicas o de otro género.

Pasando a otro punto, una cosa es que la estructura sea complicada en sí o poco clara, y otra que su cálculo lo sea o no. En esto, suelen jugar, no ya los intereses del contratista, sino los del propio proyectista que ha de ser, por consiguiente, concienzudamente exigente consigo mismo.

En fin, en el criterio rector para la elección del tipo estructural, deben influir también las condiciones económicas que regulan su finalidad o que se derivan de ella y de las especiales características de la persona o empresa que la acomete. No puede enfocarse con el mismo criterio de economía una obra privada que una pública, una de tipo puramente industrial que otra de carácter suntuario. Aun en las de tipo privado e industrial, es frecuente que, por razones derivadas del carácter propio del negocio, interese hacer una obra llamativa y gastar en ella sumas que han de recogerse a través de los beneficios indirectos que aporte la propaganda. Un puente, aun con las mismas condiciones de tráfico, puede pedir valores de monumentalidad simplemente por su proximidad a una población, etc.

También debe pensarse en la duración que se pretende dar a la obra; pues, la vida de una estructura de madera no es la misma que la de una metálica, ni ésta es igual a la de otra de hormigón o de piedra, ni los espesores han de ser los mismos; y todo ello puede conducir a modificaciones esenciales del tipo estructural.

No basta decir que la duración debe ser la mayor posible; esto no es decir nada o es una pretensión absurda y fuera de lugar. Decía el Coronel Lorenz —el rey sin corona de Arabia—, frente a las ruinas de Petra, aún en pie y totalmente abandonadas y desérticas desde tantos siglos, que los romanos, al pretender hacer eternas sus ciudades, no lograron más que recordar a todas las generaciones siguientes la absurda vanidad de su poderío, pasajero como todos los de este mundo.

Y es cierto. ¿Para qué malversar en durabilidades inútiles? ¿Se sabe, por ventura, cuáles serán los sistemas de transporte, los procesos industriales o los métodos de vida de mañana? ¿Cuántos puentes han tenido que desmontarse y sustituirse, sólo por que las cargas de las locomotoras habían aumentado en pocos años! Es necesario, pues, meditar y ponderar bien esta cuestión. Unas veces estará justificado hacer una obra más resistente de lo que exigen las cargas actuales, porque se prevea un aumento razonable de éstas; y otras será preferible hacerla más bien con criterio de provisionalidad, si ello aporta buena economía, y no se tiene idea de cuáles serán las necesidades y las posibilidades constructivas de un próximo futuro.

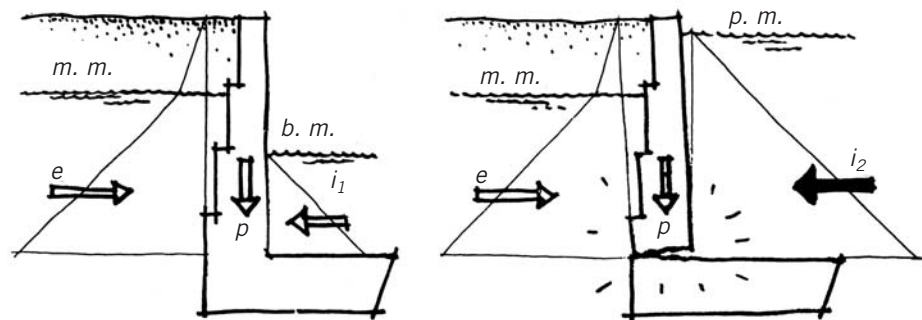
El cálculo

Parece que el cálculo de la estructura, como proceso posterior al de su trazado y como cuestión más técnica y especializada, se sale del campo de esta obra; porque el cálculo, como se dijo al principio, no puede ser más que un medio de comprobación y corrección de las dimensiones que a los elementos estructurales le ha dado la intuición del proyectista. La obra no nace nunca del cálculo; es el cálculo el que resulta de la traza de la estructura; el que, pospuesto a ella, ha de garantizar sus condiciones de estabilidad y resistencia. Si, por el contrario, del cálculo no resulta esta garantía, el proyectista ha de modificar su obra y repetir el cálculo, como colofón que cierra y confirma su acierto.

Pero, sin entrar en detalles, no estará de más comentar cuál es la misión y las posibilidades de ese cálculo. Él ha de asegurar, no sólo la resistencia, sino también el estatismo y la estabilidad de la construcción. El que, en muchos casos, esto esté a todas luces asegurado y dispense de toda comprobación, hace que, otras veces, se prescindiera de ésta con demasiada irreflexión.

Tanto para una cosa como para otra —estabilidad o resistencia—, lo primero que hay que hacer es fijar bien cuáles son las cargas que van a actuar sobre la estructura. Si se olvida una de ellas o se yerra en su valoración, todo lo demás será inútil o equivocado. Esta perogrullada, entre tantas otras que van escritas, puede parecer, ya, demasiado perogrullada. Sin embargo, por olvidar los efectos de la succión en la cubierta de un hangar, hemos visto levantarse ésta separándose de los aparatos de apoyo sobre los soportes; y cómo al volver a bajar, no lo hizo a plomo de éstos.

Y si en un muro de un dique seco (fig. XX. 1), en el que se considera el empuje de las tierras y del agua que las embebe en parte, se olvida el empuje en sentido contrario, producido por la sobre elevación del nivel de la pleamar sobre el medio que,



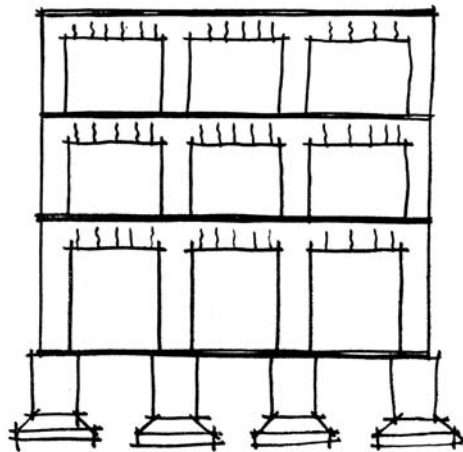
XX-1. Muro de un dique seco.

dentro del relleno, mantiene la relativa impermeabilidad de éste, su flojedad hará que aparezca una grieta por la que entre la subpresión agravando el mal hasta convertir el muro en un émulo del de las lamentaciones y obligando a costosos cosidos con armaduras, para asegurar una impermeabilidad absolutamente necesaria en este tipo de obra. Y como estos ejemplos, podrían presentarse muchos otros sucedidos ya o en potencia de suceder.

Entre las cargas o causas de sollicitación han de considerarse, no solamente las que constituyen fuerzas exteriores, empujes o pesos definitivos, sino también las que han de producirse durante la construcción, que ha de preverse antes de empezar el cálculo, para poder aplicar éste a todas sus fases sucesivas. De lo contrario, la obra se hace imposible o exige refuerzos sobrecostosos y disgustos inútiles. Igualmente han de tenerse en cuenta las sollicitaciones de origen térmico, de retracción, etc. Sobre hasta qué punto pueden presentarse efectos de este tipo, difíciles de prever, pueden también citarse los dos casos siguientes:

Uno de ellos era una estructura de edificación en hormigón armado (fig. XX. 2), cuyo dimensionamiento no acusaba más particularidad que la de tener vigas y soportes de más rigidez que la usual, con cuantías bajas que se habían calculado debidamente, pero sin tener en cuenta las posibles diferencias de retracción de un piso a otro. Los forjados eran monolíticos con sus vigas y soportes, como es corriente en hormigón armado. Los cálculos parecían correctos e, incluso, contando con la retracción, las cargas no eran demasiado alarmantes. La obra hubo de suspenderse durante unos años; y, un día, aparecieron grietas verticales, fuertes y repetidas en las vigas de última planta.

En la inspección ocular, se apreciaba claramente que las grietas no pasaban el forjado; no tenían la inclinación clásica del esfuerzo cortante; se repartían más o menos, por igual a lo largo de las vigas; y apenas si variaban de espesor, a lo alto de éstas, hasta aproximarse al forjado, donde disminuían y se cerraban, sin pasarle. Evidentemente, no eran producidas por el trabajo normal de la estructura. Hechas las oportunas indagaciones, se supo que habían sido observadas después de unas fuertes tormentas de fin



XX-2. Fisuración de un pórtico.

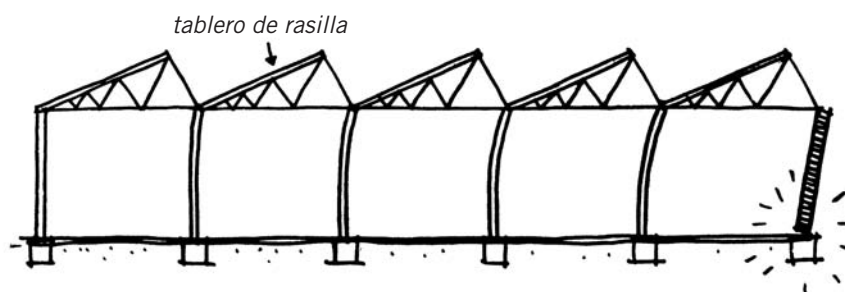
de verano, caídas con temperaturas altas, después de una prolongada sequía. Las vigas, en tracción por efecto de la retracción y de la rigidez de los soportes, habían roto al entumecerse bruscamente el hormigón del forjado por efecto del manto de agua que cayó sobre él. La ligereza y escaso espesor de las vigas, no mojadas y con poca armadura longitudinal, las había hecho insuficientes para seguir el movimiento de dilatación higroscópica del forjado; y las grietas se habían producido donde los estribos verticales, próximos al paramento, facilitaban la concentración del esfuerzo sobre el recubrimiento de hormigón. Una vez iniciadas las grietas, habían pasado de lado a lado.

El otro ejemplo, se refiere a la combinación de los efectos térmicos con el proceso de marcha de la construcción. Una gran nave de dientes de sierra (fig. XX. 3), con una fila de soportes metálicos centrales muy flexibles, terminaba, por un lado, sobre un muro de ladrillo de pie y medio de espesor, y quedaba libre por el otro. Las cerchas longitudinales a la nave, apoyando en las jácenas de lucernario, no llevaban otro arriostramiento que el de las correas de cubierta. Estas jácenas transversales formaban vigas continuas de dos luces apoyando sobre la fila central de soportes y sobre los dos muros longitudinales y macizos de las fachadas.

La estructura empezó a empujar sobre el muro de fondo agrietándolo, cerca de la base, y provocándole un fuerte desplome que continuaba aumentando. Los soportes próximos al muro acusaban la misma desviación, que iba disminuyendo hasta el último del otro lado, sin que éste pudiera ofrecer reacción ninguna que justificase aquello.

Como la estructura seguía en su empeño de derribar el muro y llevaba camino de lograrlo, hubo que estudiar lo que ocurría. No se había hecho ningún programa especial de ejecución; durante el montaje no se había apreciado nada anormal, y los soportes se habían dejado bien aplomados.

Pues bien, todo era debido a que el forjado de cubierta, hecho de tablero de rasilla, se había empezado a construir en primavera, por el lado contrario al muro en cuestión; en consecuencia, la estructura había quedado sujeta a los muros laterales por esa parte. Toda la dilatación elástica de las cabezas inferiores en tracción, a medida que el forjado iba cargando, más las debidas a las elevaciones sucesivas de temperatura, efecto de la estación, iban contra el muro, que ofrecía menos resistencia al vuelco que los grandes planos del forjado que trabajaban como enormes vigas inclinadas, de muro a muro lateral.



XX-3. Fallo de una nave en dientes de sierra.

El proceso de ejecución en relación con los fenómenos de variación térmica, muy fuertes hasta que la estructura quedaba cubierta, eran la causa de todo.

Si se comentan estos casos, no es sólo por su curiosidad; es para indicar hasta qué punto el despreciar cosas normalmente despreciables puede dar lugar a accidentes y problemas desagradables en casos particulares.

Cada estructura es un caso particular, nunca exactamente igual a otro. Sobre cada una de ellas, antes de empezar a calcular y dimensionar elementos, hay que asegurarse de que no nos vamos a olvidar de ninguna fuerza actuante ni de ninguno de esos fenómenos, llamados normalmente secundarios porque suelen serlo en una estructura bien trazada. Se puede prescindir de ellos en muchos casos; pero, siempre debe hacerse a conciencia después de haberlo pensado bien; nunca por olvido.

Pero, las hipótesis, que hay que cuidar por encima de todo cálculo, no son sólo éstas referentes a las causas de sollicitación; se refieren igualmente a los fundamentos de la teoría de cálculo que se vaya a desarrollar y a las características de los materiales que se utilicen después. Respecto a éstos, evidentemente, el constructor ha de cuidarse de alcanzar las cualidades mínimas que el proyectista haya previsto e impuesto; pero, éste ha de imponerlas con vistas a la economía total resultante. Especialmente en aceros o en hormigones, su costo varía con su resistencia; y la reducción de secciones, que se obtenga por elevar excesivamente la calidad del material exigida, puede redundar en un sobre costo en lugar de una economía.

Y, en fin, el terreno entra siempre como material resistente; la obra ha de resistir, en definitiva, sobre él; y todos los datos, sondeos, reconocimientos y precauciones que se tomen para conocerle bien, no necesitan justificarse aquí. Sobre todo, si la estructura es hiperestática, sus esfuerzos pueden venir totalmente alterados y hasta invertidos por el comportamiento del terreno y, en especial, por su heterogeneidad de un cimientto a otro.

Fijadas las hipótesis relativas a las causas de sollicitación posibles y al comportamiento del material, es necesario elegir el método de cálculo. Ciertamente éste debe ser el que dé mayores garantías de seguridad; pero, la mayor o menor precisión en los resultados añade muy poco a esa garantía. Ninguna obra se caerá solamente porque las tensiones sean un 20 por 100 superiores a las deducidas de un cálculo correcto; por el contrario, se podrá caer si, como consecuencia de la complicación de los cálculos, se cuele, en sus resultados, un error de coma, que el "ojo de buen cubero" del proyectista novato no sepa detectar.

Puede decirse que el método de cálculo debe ser, siempre, el más sencillo entre los que den suficientes garantías de seguridad y de economía en la estructura. Cuáles sean estos límites de garantía es cosa algo difícil de concretar; pero, para una obra corriente, un 5 por 100 de error es una cosa ridícula de precisar, si se tienen en cuenta las muchas imprecisiones de las actuales hipótesis y teorías de cálculo.

Claro es que, en un elemento de gran importancia económica como el macizo de una presa o el puente de dimensiones extraordinarias, está justificado, y es incluso obligado, el cálculo afinado para fijar las dimensiones con la máxima precisión y conocimiento de causa posibles. Lo mismo sucede con otros elementos que, aun siendo de escasa importancia cada uno de ellos, se repiten, sin embargo, cientos de veces exactamente iguales.

Pero, ni hay que confiar solamente a los números el dimensionamiento, sino al buen criterio ayudado de los números y capaz de un enjuiciamiento sobre ellos, ni hay que tratar de igual modo el conjunto de variados elementos que, con características diferentes, se multiplican en un edificio normal.

Ciertamente, cuanto más penosos sean los cálculos, más probabilidades hay de incurrir en una equivocación a lo largo de ellos. Por eso, se necesita más práctica para estar seguros de detectar a ojo un error suficientemente importante para poner en peligro la estabilidad o la resistencia de la obra.

Se dirá entonces que, si los resultados del cálculo no tienen más garantía de acierto que el propio criterio del proyectista, sobran los cálculos. No, no hay que sacar las cosas de quicio. Si los cálculos coinciden con las ideas, se tiene una garantía de aquéllos y de éstas. Si no coinciden, no debe decirse: he repasado los cálculos, no he encontrado ninguna equivocación; luego sus resultados están bien y mis ideas mal, y asunto concluido. No, no hay que parar hasta convencerse, a través de los cálculos, de cuál es el error y por qué; hasta no ver, por así decir, con los propios ojos, y no con los cálculos ciegos, que el fenómeno no era como se creía, y ver por qué no lo era; hasta que estén real y sinceramente de acuerdo ideas y cálculos. Porque, el que no se encuentre un error en éstos, no quiere decir forzosamente que no exista. Si, como cuentan, quien se entretuvo en calcular el ángulo óptimo que las abejas debieran dar a los meniscos de miel que llenan los alvéolos de sus panales, dedujo que se equivocaban ligeramente, luego resultó que las equivocadas no eran las abejas, sino las tablas de logaritmos empleadas para el cálculo.

El más elemental espíritu de aprendizaje y de propio respeto profesional obliga a no dejar, sin remedio, el propio espíritu en un error. Y todo ello sin olvidar que, si el error no es del proceso o del desarrollo del cálculo, sino de defectuoso planteamiento introducido por ideas preconcebidas y equivocadas, el cálculo no añadirá garantía alguna.

El que la complicación del cálculo sea grande e, inclusive, el que no se sepa acometerlo, no quiere tampoco decir que la solución sea mala en sí. Un cálculo completo y acertado de una estructura –bien construida y mantenida, naturalmente–, es condición suficiente de resistencia, pero no es condición necesaria. ¡Cuántas veces se ha dibujado una estructura y se ha dicho: evidentemente debe sostenerse, pero, ¿cómo demostrarlo?...!

Ahora bien, si el elemento es pequeño y, sin necesidad de cálculo se pueden garantizar sus buenas condiciones, se construirá sin cálculo alguno. No es fácil calcular el estado tensional que se produce en un muro alrededor del hueco rectangular de una puerta. Por su parte, del cálculo elástico que se idease, resultarían valores infinitos de la tensión en el ángulo del dintel con la jamba o de ésta con el umbral; y, sin embargo, todos aceptan huecos de este tipo en los proyectos mientras las dimensiones no se salgan de los límites a que se está acostumbrado; hasta ahí no hay problema.

El problema se plantea en las grandes estructuras; por ejemplo, en la gran presa bóveda-gravedad de fuertes espesores cuyo cálculo, teóricamente, presenta serias lagunas prácticamente imposibles de salvar. En este caso, cabe enfocar la dificultad sustituyendo la solución monolítica clásica por la presa de anillos horizontales independientes. Si, con ello, se obtuviese no sólo un cálculo claro y sencillo, sino también

una construcción económica con tensiones menores que en la solución clásica, evidentemente la elección no sería dudosa. Si no fuese así, será preferible tratar, por todos los medios, de determinar, aunque sólo sea con un primer grado de aproximación, el estado tensional de la solución monolítica empotrada en el terreno; y tener en cuenta, al fijar el coeficiente de seguridad, las posibles indeterminaciones y probable orden de errores que queden como consecuencia de lo inseguro de las hipótesis simplificadoras introducidas al establecer el sistema de cálculo.

Por su parte, la complicación del desarrollo matemático, por grande que sea, no añade ni quita nada al valor de los resultados. Después de comprobar que éstos satisfacen las condiciones impuestas como datos del problema, puede asegurarse que, si esas condiciones o hipótesis se asemejan a la realidad, los resultados se asemejarán igualmente; porque, como escribía Fresnel a Laplace: «La naturaleza no esquiva las dificultades del análisis». No es nunca en el desarrollo matemático correcto donde puede estar el fallo; es en las hipótesis. Si las condiciones de sustentación no son las previstas, si el comportamiento del material no es el de la teoría de la elasticidad que se emplea, si aparecen esfuerzos de otro tipo no tenidos en cuenta, térmicos, de retracción, etc., si los estadios de la ejecución dan lugar a estados tensionales diferentes, etc., es, entonces, cuando la realidad no estará conforme con el cálculo.

Y como esto sucede frecuentemente, no sólo en las grandes estructuras, sino también en los elementos pequeños y corrientes, no debe nunca confiarse en el afinamiento de esos cálculos que siempre llevan consigo el estigma congénito de sus pobres hipótesis.

El proyectista ha de cuidar mucho de enjuiciar las hipótesis y, por eso, se comentaron tan largamente los materiales y sus comportamiento; porque es vicio corrientísimo el de enamorarse de la elegancia de un proceso matemático y adoptar una determinada solución estructural sólo por tener ocasión de desarrollarlo, sin parar mientes en los errores de las hipótesis necesarias para su planteamiento; hipótesis que, para muchos proyectistas, pasan desapercibidas en el incógnito de su introducción implícita e inconsciente.

El enjuiciar la importancia de los errores finales que puedan obtenerse de esas hipótesis, el desprecio de ciertos términos o determinados esfuerzos al parecer secundarios, etc., son las cuestiones más delicadas y difíciles que deberá considerar el proyectista; porque, en general, no es fácil su estimación por medios matemáticos, sino que requiere un profundo conocimiento de los fenómenos físicos que representan, de su importancia relativa y de sus mutuas influencias.

En definitiva, en elementos verdaderamente importantes, o en aquellos otros a los que su gran repetición presta importancia, no debe huirse del cálculo complicado cuando el fenómeno tensional realmente lo requiere; es decir, cuando no hay otro método más sencillo que dé suficiente garantía. El grado de aproximación es cuestión relativamente secundaria; pues, en todo caso, hay que tener presente que nunca se pueden evitar divergencias apreciables entre la realidad y las hipótesis simplificadoras que han de aceptarse para hacer el cálculo posible.

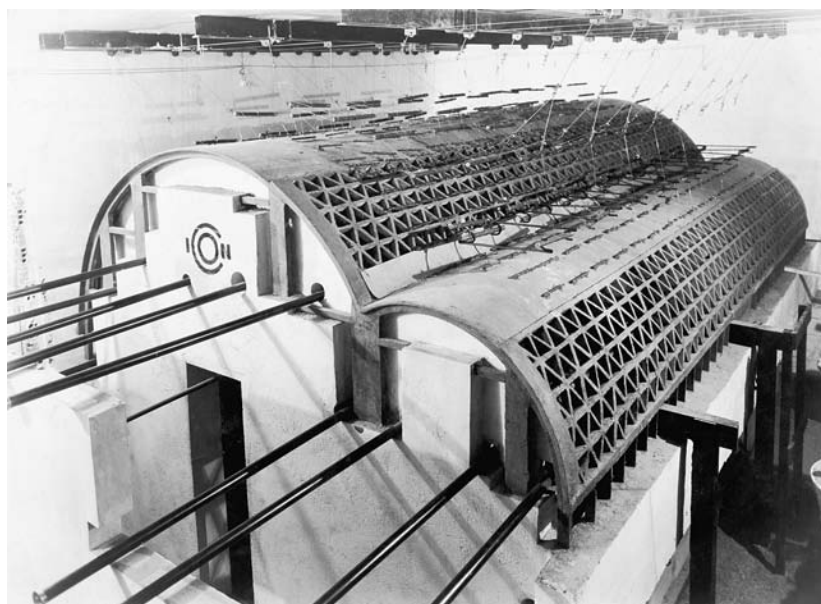
Por otra parte, si el hacer un cálculo excesivamente burdo, para una estructura de gran importancia, es una ligereza, el hacerlo excesivamente concienzudo y detallado, en casos de poca monta, es aparte de una pérdida de tiempo, un claro indicio de falta de práctica y de criterio sobre estas cuestiones.

Ciertamente que, mientras la propia experiencia no sea guía segura para el caso de que se trate, será necesario apoyarse en el cálculo para alejar todas las probabilidades de error e ir adquiriendo esa experiencia que se echa de menos; porque «las leyes de la naturaleza están escritas en lenguaje matemático», como dijo Newton. Pero, de eso a emplear dos páginas de integrales para calcular el montante de una barandilla, o el que, en un proyecto de puente que llevaba una acreditada firma, se le requiriese al autor la comprobación de unas losas de andén accesorio de medio metro de luz que habían dimensionado a ojo, va bastante diferencia.

Por último, el proyectista no ha de olvidar que si, en ciertos casos especiales —sólo en muy contados casos—, el análisis se declara impotente para resolver el problema, quedan siempre los métodos experimentales y analítico-experimentales con los que hoy se pueden garantizar las condiciones de seguridad de cualquier estructura, por complicada que sea. Especialmente en estructuras o macizos tridimensionales de contornos complicados —como, por ejemplo, la presa-bóveda de gravedad sobre terreno heterogéneamente deformable—, estos métodos son insustituibles y eficaces. Claro es que requieren costosas instalaciones manejadas por personal muy especializado; pero, por esto mismo, su intervención es valiosísima en estructuras delicadas o importantes (fig. XX. 4).

Entre los métodos analíticos fundados en la teoría elástica clásica, las diferencias, de unos a otros, se refieren puramente al proceso operatorio, no a las bases; y, por consiguiente, en el fondo son todos iguales.

Hay otros métodos que consideran las condiciones reales del material al aproximarse la rotura —métodos elasto-plásticos, anelásticos, de agotamiento, etc.— y se fundan en ellas para determinar la proporción en que las cargas reales previsibles están respecto de las capaces de agotar la resistencia o la estabilidad de los distintos elementos. Estos son muy interesantes, por cuanto permiten determinar el coeficiente de



XX-4. Medidas, en modelo reducido, del Frontón Recoletos. I. C. O. N. Madrid.

seguridad real sin los errores y divergencias a que conduce la cómoda, pero falsa, extrapolación de las condiciones elásticas del material hasta el momento de la rotura. Cuando pueden aplicarse cómodamente son, no sólo aceptables, sino aconsejables en general. Lo que ocurre es que, muchas veces, esas teorías conducen a procesos de cálculo prácticamente inabordables; pero, no hay que olvidar que, en otros muchos casos, resultan sumamente prácticas, como, por ejemplo, la teoría de cálculo de placas por líneas de rotura, de Johansen; o el mismo dimensionado de piezas en compresión de hormigón armado por las fórmulas aditivas, adoptadas por muchas instrucciones, y otras análogas para flexión.

Ahora bien; cada método lleva implícitas unas hipótesis y, en general, cuanto más sencillo y práctico es, más se aleja de la realidad y menos aproximado resulta, porque de más cosas ha ido prescindiendo en la complejidad del conjunto estructural y del fenómeno tensional. Por eso, interesa conocer y tener presente cuáles son sus hipótesis restrictivas; porque, ciertos métodos, perfectamente aplicables a casos corrientes y a tipos de estructuras usuales con dimensiones normales, pueden ser totalmente inapropiados para otras estructuras excepcionales.

Las instrucciones y las fórmulas que aquéllas aconsejan, utilísimas en aquellos casos, pueden resultar, por todo eso, francamente insuficientes y peligrosas para estos otros. Las fórmulas de dimensionado de un muro de contención continuo prescinde del esfuerzo cortante porque, en él, es despreciable; y, sin embargo, su consideración, en un muro de contrafuertes, puede ser el determinante del espesor de éstos, en lugar de serlo el valor de sus compresiones verticales.

Asimismo, es corriente prescindir de los corrimientos horizontales de los nudos de un pórtico múltiple de edificación, porque los forjados de piso y las fachadas aseguran suficientemente su inmovilidad; pero si se trata de una estructura exenta, como el castillete de un depósito elevado, la aplicación de esa simplificación carece de toda base; la realidad es totalmente otra, y la catástrofe puede llegar por mucho que se hayan afinado los valores resultantes de aquel cálculo. Como siempre, son las hipótesis las que fallan.

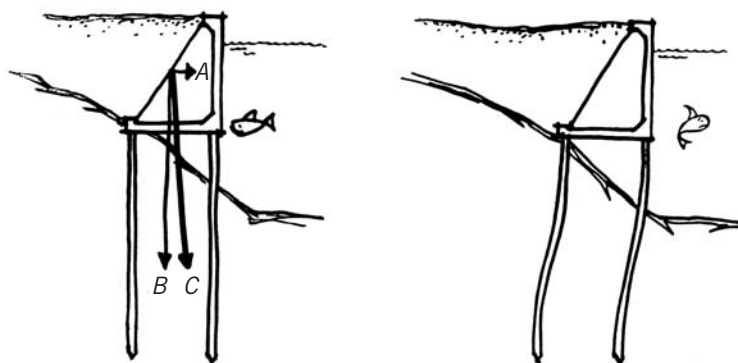
Así, pues, nunca se insistirá bastante en los peligros que lleva consigo la extrapolación de los métodos y reglas de cálculo usuales, a estructuras que se salen de los casos y tipos corrientes para los que se han ideado y en los que encuentran completa justificación.

Es fundamental determinar primeramente todos los fenómenos tensionales que pueden presentarse en la estructura, sin olvidar ninguno; todas las posibles formas de rotura o de pérdida de equilibrio o de estabilidad; y confiar, a la comprobación del cálculo, todas las que, a simple vista, no estén totalmente aseguradas.

En primer lugar, hay que seguir los esfuerzos y reacciones hasta el final; hasta la cimentación y aún más allá de ella, dentro del terreno, hasta que sus efectos se difuminen. No basta asegurarse de que cada pilote no se hunde en el terreno. Es necesario, igualmente, que todo el volumen de terreno, que rodea el conjunto del pilotaje, no se hunda tampoco, deslizando y haciendo refluir las tierras que lo rodean. Es fundamental no olvidarse de ninguno de esos esfuerzos y formas de trabajo o de rotura que luego pueden producirse en la realidad.

En la estructura representada en la figura XX. 5 se había contado con el empuje A de las tierras y con su peso B; se habían calculado correctamente las flexiones en

XX-5. Fallo de un pilotaje.



las placas y vigas, las tracciones en los contrafuertes, las reacciones verticales resultantes sobre los pilotes y la carga resistente del terreno que los envolvía, así como la estabilidad del talud. Además, se había comprobado que la resultante C pasaba por la base de sustentación. La estructura, a pesar de todas esas comprobaciones, decidió caerse.

Estudiados la rotura y el proyecto, se dedujo que los pilotes carecían de la necesaria resistencia para soportar la flexión que producía, en ellos, la componente horizontal A, relativamente pequeña del empuje; fenómeno que el proyectista no había tenido en cuenta. Todos los números estaban bien hechos, pero faltaban otros.

Ejemplos de este tipo podrían presentarse a montón y no sería trabajo baldío. Es necesario establecer previamente cuáles son las formas posibles de rotura o de inestabilidad de la estructura, y comprobarlas una a una. Bastará que se olvide una de aquellas para que la obra quede en libertad de caerse, sin que los cálculos hechos sirvan para nada. Es como si se cerrasen todas las salidas de una ratonera, menos una.

No puede olvidarse que los diferentes elementos, o la estructura entera, pueden pandear, total o parcialmente, antes de alcanzar las condiciones límites de rotura; que los secundarios de una estructura triangulada existen y se superponen a los esfuerzos axiales primarios, aunque la estática gráfica garantice que éstos bastan para asegurar el equilibrio; que ciertas cargas móviles producen efectos dinámicos, y su período puede, quizá, coincidir con el propio de resonancia de la estructura con gravísimo peligro de ésta; que la retracción o las diferencias de dilatación térmica de un elemento a otro producen sus efectos, y éstos pueden venir aumentados por circunstancias especiales del proceso de construcción, etc.

En el puente de la figura XV. 6, las deformaciones producidas por el desigual calentamiento del tablero de hormigón y de las vigas metálicas, bajo las orientaciones diferentes del sol, de la mañana al mediodía, eran superiores a las deformaciones elásticas producidas por la carga total de prueba; y, por tanto, los secundarios, que estas deformaciones térmicas introducían, no eran despreciables.

La dificultad está en saber colegir de antemano la importancia relativa de estos fenómenos para decidir si es necesario su cálculo o no. Y esto es, más que nada, una cuestión de práctica. Cuando el autor se vio obligado a proyectar una estructura que sobrepasaba en mucho a las que estaba acostumbrado a hacer, como le sucedió con

el arco de hormigón de 210 metros de luz sobre el Esla, hizo muchos cálculos que le demostraron lo excesivo de su preocupación. Hoy no los repetiría; pero, volvería a hacer otros análogos si la extrapolación se le presentase, en otro sentido. Por eso, el valor de la especialización no es solamente el de una mayor garantía, sino también el de una economía de tiempo y de dinero en el proyecto.

Nunca debe acometerse el cálculo laborioso de una estructura sin haber hecho antes unos primeros tanteos, todo lo burdos y rápidos que se quiera, pero que permitan asegurarse de que se va por buen camino y de que las dimensiones adoptadas, sobre las que la comprobación del cálculo ha de actuar, son aceptables en primera aproximación. Y, con mucha o poca práctica, nunca deben darse por buenos los resultados de un cálculo, medianamente prolijo, sin una ligera comprobación posterior, que será tanto más fácil cuanto más práctica se posea.

Por otra parte, por mucha experiencia que se tenga en el trazado y primer dimensionado de las estructuras, será difícil que el cálculo no acuse pequeñas sobretensiones en determinadas secciones o zonas que, aun siendo aceptables, no deben dejarse sin considerar y corregir siempre que otras razones funcionales, constructivas, estéticas o de otro tipo, no aconsejen lo contrario. La observación de estas correcciones es siempre un manantial de enseñanzas para el proyecto siguiente.

Otro problema fundamental, y anterior a todo cálculo, es la fijación de los coeficientes de seguridad; problema al que los proyectistas prestan demasiada poca o ninguna importancia, fijados en los que marcan las instrucciones de su país.

Ciertamente no es un problema que influya en el trazado de la estructura; por adoptar éste o aquél, es raro que se inviertan las ventajas de un determinado tipo estructural sobre otros; y parece, por consiguiente, que el tema se sale de los que han de comentarse en esta obra; pero su importancia es tan grande, en relación con los principios básicos del cálculo, que no está de más llamar la atención sobre ello.

Primeramente, el coeficiente de seguridad no puede o no debería fijarse con carácter de uniformidad para todas las estructuras de un mismo tipo. Por poco que se medite en el asunto, se comprenderá que las razones, que dan origen a la introducción del coeficiente en el cálculo, varían totalmente de un caso particular a otro relativamente parecido; y las instrucciones oficiales sólo debieran fijar un criterio exigiendo del proyectista una razonada justificación del que se adopte. Hasta hace poco parecía imposible razonar sobre él; pero, desde el momento en que se ha comprendido que, en realidad, de lo que se trata es de mantener suficientemente baja la probabilidad de hundimiento, las posibilidades del planteamiento y solución del problema han cambiado completamente.

El coeficiente de seguridad debe ser diferente según la probabilidad, mayor o menor, que las cargas previstas tengan de ser sobrepasadas en mayor o menor grado. No debe, lógicamente, ser el mismo para un depósito abierto, en el que el empuje del agua no puede pasar del hidrostático, correspondiente al nivel de la coronación, que en un piso de un vivienda, en la que se admite una sobrecarga de cálculo que puede sobrepasarse mucho en un momento de aglomeración impensada e inconsciente del peligro. El hablar de máxima sobrecarga posible no tiene sentido en muchos de estos casos, o representa un criterio que conduciría a resultados con los que no sería posible ninguna construcción.

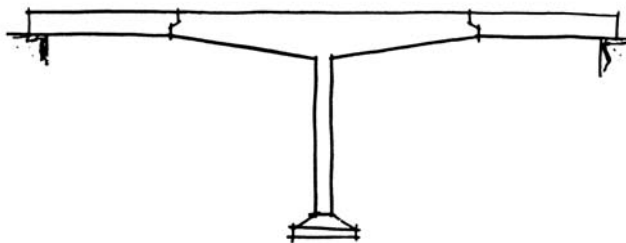
Hay que contar con la posibilidad de que las sobrecargas combinadas, o los mismos pesos muertos, pueden tener siempre errores de previsión, en la realidad, de un punto a otro. Un puente-acueducto podría formarse por dos ménsulas equilibradas sobre una pila central (fig. XX. 6); no habiendo excentricidad teórica sobre el soporte, el cálculo dirá que ésta puede reducir impunemente su ancho mientras no se agote su resistencia por compresión simple y pandeo. Sin embargo, no cabe duda que convendrá darle un ancho mayor que el teórico para asegurar la estabilidad de los tramos, aunque ningún coeficiente de seguridad venga a exigirlo partiendo de aquellas hipótesis de equilibrio. Lo mismo sucede cuando una barra, en una triangulación, queda con un esfuerzo prácticamente nulo, por ser la diferencia de los producidos por dos cargas importantes que se suponen actuando simultáneamente con una proporción fija entre ellas. Hay que cuidar del grado de error que puede presentar esa proporción durante la vida de la obra, porque su influencia relativa, en el valor diferencia, puede ser muy grande.

Análogamente, debe variar el coeficiente según el grado de vigilancia que se haya de ejercer, durante la obra, sobre el cuidado de su ejecución y la calidad de los materiales; vigilancia que no se prevé la misma para una obra delicada o importante que para otra corriente y sencilla que ha de construirse lejos de todo núcleo urbano, con obreros y capataces poco especializados.

El coeficiente ha de ser mayor cuando se aplica a los cálculos burdos y rápidos, donde las divergencias con la realidad pueden ser grandes, que cuando se hace un cálculo afinado que se sabe responde con justeza a un fenómeno tensional sencillo y repetidamente comprobado.

Pero, sobre todo, si, con el mal llamado coeficiente de seguridad, lo que se pretende es reducir la probabilidad de hundimiento y, por ello, se obliga a una construcción más costosa para mantener alto el coeficiente, hay que empezar por meditar hasta dónde este sacrificio es justificado en el caso particular de que se trate. Una presa bóveda, aguas arriba de una población de 100.000 habitantes, no puede calcularse con el mismo coeficiente de seguridad que otra pequeña pérdida en las montañas de una zona desértica; ni la cubierta de un estadio, con el mismo coeficiente que la de una pequeña vivienda o la de una cimbra provisional.

Cuando el autor estaba trabajando para una empresa constructora, una avenida extraordinaria del río le llevó la cimbra de un puente; y cuando el gerente le preguntó qué pensaba hacer, le contestó que repetir la misma cimbra; porque, de hacerla más reforzada, o recogida por fuera del nivel máximo de avenidas posibles, resultaría tan costosa que valía más volver a correr el albur de que se la llevase el río otra vez; y el gerente y el tiempo le dieron la razón.



XX-6. Puente acueducto con ménsulas equilibradas.

En realidad, lo que debía hacerse es adoptar el coeficiente de seguridad que proporcionase el mínimo coste, incluyendo, en éste, el seguro de hundimiento; es decir, el coste de la construcción y la indemnización de los daños y perjuicios. Esto, que parece imposible de fijar, no lo es más que el calcular la prima de un seguro de vida; y a ningún asegurador se le ocurre fijarlo a ojo, e inalterable cualquiera que sea la edad y el tipo de vida del asegurado.

Modernos estudios, hechos en este sentido, han demostrado que la probabilidad de hundimiento aumenta rápidamente al bajar el coeficiente por bajo de los adoptados usualmente; y, en cambio, disminuye muy lentamente al aumentarlo, lo cual es prueba de que esos valores son un buen resultado de los muchos años de experiencia constructiva que lleva la humanidad. Pero, esos mismos estudios han demostrado la conveniencia de variar el coeficiente de unos casos a otros; y las estadísticas, junto con las teorías matemáticas, empiezan a dar datos suficientes para establecer reglas y métodos prácticos con los cuales modular y afinar oportunamente esos coeficientes.

Es ridículo y absurdo afinar los cálculos como se afinan, para multiplicar después sus resultados por dos, por tres o por cuatro, sin tomarse ningún trabajo en su justificación ni considerarlo, al menos, con la mejor buena voluntad y espíritu de ponderación.

No basta decir: así se hace siempre y las obras no se caen o se caen muy pocas, sin preocuparse de cuánto dinero se vierte inútilmente en esas obras, o de si están a punto de caerse.

El técnico no ha recibido su técnica para utilizarla sin ninguna obligación hacia ella. Ni puede dispendiar los fondos que ponen en sus manos, ni arriesgarlos en empresas demasiado atrevidas, confiando en que, como decía el maestro y gran ingeniero J. E. Ribera: «Las obras tienden a no caerse»; porque es el caso que, a pesar de ello, algunas se caen.

Y en verdad, si esas pocas no se cayesen, se caerían muchas más; porque, perdido el saludable miedo que esos accidentes producen, ¿a qué atrevimiento no se llegaría? O, dicho de otro modo: la culpa de que esas pocas obras se caigan, la tienen las otras muchas que, debiendo caerse, no lo hacen. Porque es un hecho que las construcciones conocen suficientemente la técnica para no caerse las que no deben hacerlo; pero, aún no han aprendido lo bastante para caerse todas las que, con arreglo a aquélla, deberían hacerlo. ¿Habría que decidirse, por ello, a construir presas cuya estabilidad no garantice la técnica actual? Ciertamente no; pues tampoco se deben desperdiciar esas lecciones, sino sacar de ellas la consecuencia de que se está obligado a buscar las nuevas causas ocultas de resistencia que escapan a los cálculos o que quedan excesiva y desconocidamente absorbidas en el coeficiente de seguridad.

Los técnicos e investigadores, que están en condiciones de hacer progresar la técnica, tienen la obligación de hacerlo; y los que no lo están, deben reflexionar y expresar su inteligencia y su sentido común para aplicarla con una reflexiva ponderación. Los formularios son una gran ayuda para el técnico consciente de lo que maneja, pero un arma peligrosísima en manos del que sólo sabe aplicarlos rutinariamente. No basta que el resultado corresponda a la fórmula; es necesario, también, que la fórmula sea la apropiada para el problema que se trata de resolver; y si falta el juicio y la base para saberlo, todo el cálculo está de más.

El proyectista y la organización

En los proyectos de construcción, como en todas las obras humanas, lo fundamental es el hombre. No pudiendo darse reglas, siguiendo las cuales deba obtenerse deductivamente el tipo estructural óptimo, todo depende del criterio del proyectista más que de otra cosa alguna.

El técnico necesita poseer unas condiciones propias, innatas y perfeccionadas a lo largo de su formación humana, unos conocimientos técnicos y una educación profesional adaptados a su misión.

Educación que no hace sino comenzar en la escuela técnica; pero, que no puede ni ser completa en ella ni terminarse en el estudio de los libros, sino que requiere la experiencia propia para completar la formación del criterio que es la base fundamental de toda buena elección.

Y como la experiencia, al decir de Costa du Rels, «es un trofeo compuesto de todas las armas que nos han herido», como es una larga serie de experimentos propios en la que forzosamente los éxitos son menos que los tropiezos, requiere, para seguir el camino, una voluntad firme, un tenaz espíritu de trabajo, constante a lo largo de los años, y todo ese conjunto de virtudes que constituye la vocación.

Es un error creer que, con lo estudiado, por mucho que sea, se está en condiciones de resolver eficazmente el problema estructural cuando se presente. De trazar una estructura y comprobar su resistencia, a dar con la solución óptima y proyectarla con todo el acierto con que puede hacerlo un maestro, va mucha diferencia. Eso sólo podrá venir al cabo de los años de trabajo y de especialización cuyo mantenimiento intenso requiere, ante todo, una voluntad firme.

Evidentemente, requiere también una inteligencia para discernir y una memoria para formar el archivo informativo de la intuición creadora; y requiere, tanto más que todo eso, mucho sentido común. Quien quiera dedicarse al arte de proyectar estructuras tendrá que meditar antes en esto, con buen espíritu crítico; porque, es frecuente oír decir casi con orgullo: «como yo tengo tan mala memoria...»; se encuentran otros que dicen modestamente: «yo, que no poseo más que una inteligencia mediana...»; mucho más raro es el que se atreve a confesar, desde su reducto perezoso y derrotista, y siempre con rodeos: «es que eso requiere tanto trabajo, que la verdad...»; pero, ¿quién es el que dice: «el caso es que yo tengo tan poco sentido común»? Y es que cada cual ha de juzgar el sentido común de los otros por el suyo propio, con una falta de sentido endocrítico que bien requiere un rato de meditación de cada uno para consigo mismo.

Se necesita también imaginación creadora; imaginación que se perfecciona a lo largo de los días de trabajo, pero que tiene mucho de innato. Se requiere igualmente espíritu de observación para captar todos los detalles útiles. Con sentido observador y espíritu crítico se tienen dos armas formidables para encauzar la propia capacidad creadora.

Al decir espíritu crítico, se ha de referir, naturalmente, al deseo de encontrar continuamente las razones de lo que se ve, sus aciertos o desaciertos, como base para otros futuros enjuiciamientos, y cuyo ejercicio principal es la autocrítica; no es el deseo de criticar lo de los otros, simplemente porque no va con el hábito de ideas y con el parcial e interesado enfoque del problema de cada cual, o porque otras pasiones, más o menos subconscientes, le impulsen a ello.

Se requiere, asimismo, mucha serenidad, mucha calma espiritual para no azorarse ni atropellarse nunca, para no tirar, perezosa o febrilmente, por el primer camino; para no embalsarse, que es uno de los defectos que se tropieza con más frecuencia; sobre todo entre gente joven que, por falta de experiencia, requeriría más calma para asegurarse de la firmeza de cada paso antes de dar el siguiente.

Y esto no es aconsejar la pusilanimidad sino todo lo contrario. La serenidad es la virtud que ha de acompañar a la valentía para prestar a ésta todo su valor y eficacia. Porque, por encima de todo, tiene que estar la honestidad profesional como base radical de la postura mental frente al problema. Honestidad que obliga a un sentido de responsabilidad; no a un miedo a la responsabilidad, sino por el contrario, al deseo de aceptarla con el honor que le acompaña. Amar la responsabilidad y servirla con todas sus consecuencias, es la más íntima satisfacción que puede sentirse en este campo creador. Quien no lo siente así, será mejor que se dedique a otra cosa.

En definitiva, el técnico, en su trabajo estructural, lucha con las fuerzas de la naturaleza y ha de reconocer la nobleza y la lógica aplastante con que se comporta este enemigo. Hay que saludarle caballeramente antes de entrar en la lid, y lanzarse a ella con espíritu deportivo, aceptando de antemano todas las posibles consecuencias del juego, que tiene sus reglas, juntamente con sus posibilidades de iniciativa, como todos los juegos.

Entre las muchas posturas mentales posibles, la elección no es difícil; lo que no se debe hacer nunca es tratar de engañarse uno a sí mismo, porque a poca facilidad que se dé, lo logrará con toda seguridad.

Muchos proyectos se ven en los que el autor parece haberse dicho: ¿Cómo tendré menos trabajo y menos complicación de cálculo?; o, por el contrario, ¿cómo me las arreglaré para aplicar tal sistema de cálculo que me ha costado tantas noches de trabajo el aprender?; o lo del otro que ha buscado y rebuscado una excusa funcional ilusoria para justificar una solución de cuya originalidad estaba enamorado; o, en fin, aquel que arrancó sus razonamientos con el siguiente o parecido planteamiento: Aprovechando la feliz coincidencia de que tengo que hacer un puente y de que eso del hormigón pretensado parece estar de moda, voy a proyectar el puente pretensado.

Y si esto último se hace para introducir una técnica nueva, cuyo desarrollo se considera interesante, o para aprender y perfeccionar la existente con el ensayo, y se dice claramente, puede muy bien estar plenamente justificado. Lo mismo en una obra de finalidad propagandista o de tipo suntuario está frecuentemente justificada una solución antieconómica en sí e impropia en otros casos.

Pero el proyectista tiene que asegurarse siempre de que no se oculta, entre los pliegues y repliegues de su corazón, otra causa menos confesable que ponga en peligro eso que justamente se llama la honestidad profesional. Ha de asegurarse de que no

conturba y masturba el sentido de responsabilidad arrastrándola por senderos en lo que, y sólo en ellos, adopta su acepción peyorativa.

Para ello, para dar a sus facultades todas las posibilidades de acierto, se requiere serenidad, calma para enjuiciar bien la elección con todo el tiempo y la voluntad necesarios para la autocrítica. Serenidad frente al peligro, con la aceptación previa de todas sus consecuencias, cuando está justificado el correrlo, y con todo el orgullo de su responsabilidad, porque la conciencia diga qué beneficios y razones más altos obligan a ello. Precisamente eso y sólo eso es lo que valora y magnifica esta misión creadora.

Cierto que el progreso técnico no es posible, al menos en nuestra sociedad, sin el acicate del éxito personal, y bien está que el proyectista trate continuamente de superarse a sí mismo e incluso de superar a los demás. Bien está que, por elevar el prestigio nacional, aumente en unos metros la luz de un gran viaducto para ganar un «récord», mundial. Pero, no deben olvidarse dos cosas: una, que el valor de un récord no está en esos pocos metros, sino en el salto grande, audaz y certero a la vez, que no termina en una única realización, sino que abre el camino para seguir avanzando por la nueva ruta.

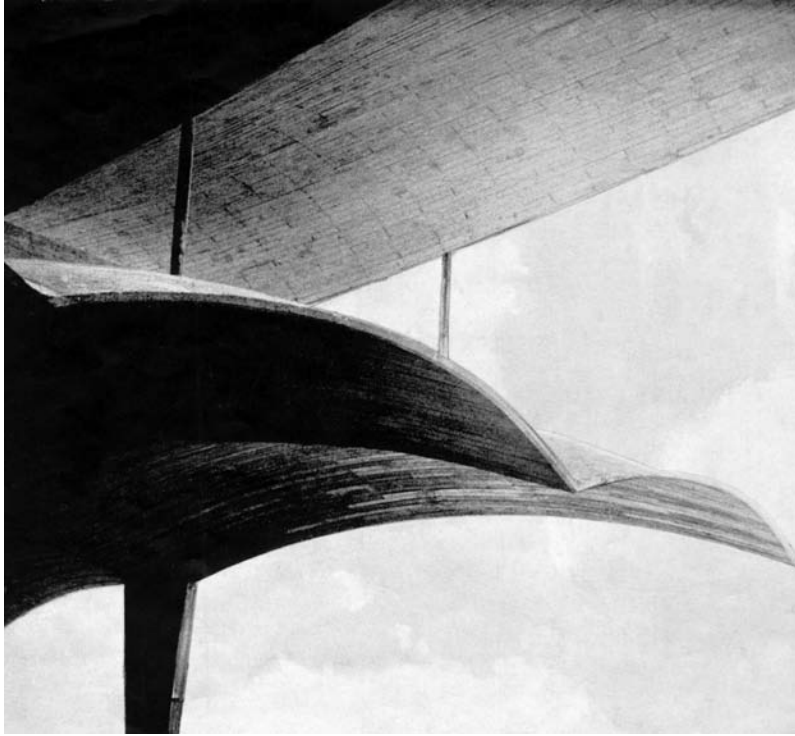
El «récord», en un determinado tipo estructural, no tiene necesariamente un valor positivo, y puede tenerlo negativo. Cada tipo responde a un determinado conjunto de necesidades funcionales y tiene su campo de desarrollo justificado dentro de un orden de dimensiones. Hacer, por ejemplo, una viga de alma llena de hormigón armado, superior a las existentes, es cosa fácil; si no se ha hecho ya, es porque no es económico y es preferible pasar a otro tipo de viga.

Empeñarse en excentricidades de este tipo tiene el mismo valor que el de encontrar un enano mayor que todos los conocidos hasta el día.

La honradez profesional exige, por el contrario, que, sin temer la extrapolación cuando está justificada, se evite innecesariamente; y, sobre todo, que no se inviertan los conceptos y se ponga, como finalidad de la obra, el propio lucimiento, en lugar de la economía, de la eficacia y del sincero deseo de resolver, sin vanidades alucinadoras, el problema real que se plantea.

No quiere, tampoco, decir esto que, en determinados casos y para facilitar y hacer posible un progreso técnico, no se proyecte y construya una estructura especial, sacrificando, en parte, la economía al deber que cada cual tiene de aportar su grano de arena al acervo progresivo que le entregaron sus mayores; pero, sin engañar a nadie y menos a quien entrega el dinero para su realización. Ha de hacerse a plena conciencia de lo que se hace y después de bien meditado y de bien convencidos de que realmente vale la pena el hacerlo así. En estos casos está perfectamente justificado; y, en especial, las grandes empresas y sobre todo las estatales debieran sentir más la obligación interesada que tienen de mirar a largo plazo y con amplios horizontes, no el estrecho recinto de cada obra, sino el de la técnica nacional entera, que necesita de estos amparos para lograr su debido desarrollo.

El puente de Luçanzy (análogo al de la fig. XVI. 3), por ejemplo, no se hizo como se hizo por razones de economía cerrada en la propia obra, sino por ir abriendo el prometedor camino del hormigón pretensado, que requería continuar sus pruebas para corregir sus defectos y llegar, algún día, a conseguir economías y posibilidades



XXI-1. Cubiertas laminares de 5 cm. de espesor, en el Hipódromo de Madrid. Fotografía: S. v. Kaskel.

entrevistas por los que, con sus ideas, su decisión y su sacrificio, elevan el prestigio de toda una técnica.

Claro está que, al lado y detrás de todo eso, el proyectista necesita unos medios económicos para vivir y desarrollar su actividad; medios económicos que, normalmente, tiene que obtener de esa misma actividad. Y como esto no depende de él solo, necesita otra serie de condiciones para triunfar en este otro camino. Pero éstas son, ya, más conocidas y se requieren más o menos para todas las profesiones liberales. Aunque sólo sea para valorar su complejidad, pueden señalarse dos, en las que quizá no haya pensado el lector, pero, cuya importancia enseña la experiencia de la vida. Son la ironía y la simpatía, tan al margen, al parecer, de la profesión. Sin un cierto caudal mínimo de ironía para sonreír ante las envidias y otras cosas de la vida, ésta chirría como eje sin grasa. Y conocidos son, también, muchos casos de éxito con los clientes, sólo porque la simpatía personal del técnico lograba embaucarlos a maravilla, y con gran satisfacción por su parte, mientras otros compañeros, de valor indudable, fracasaban en el intento ¡Cosas de la vida!...; pero cosas que no debemos olvidar si queremos vivirla.

Evidentemente, el proyectista de estructuras necesita tener, aparte de un cierto sentido artístico, un profundo sentido estructural y constructivo, una afición y una disposición natural para ello; es decir, una cierta facilidad para asimilar, manejar y sopesar los conceptos que intervienen en la génesis y desarrollo del tipo estructural. Pero, esto, en gran parte, provienen de las condiciones antedichas, del estudio y de la práctica de la especialidad.

No se olvide que el estudio, es decir, el aprendizaje de la parte teórico-técnica, se inicia en las escuelas técnicas; pero la especialización, necesaria para dominar el tema, es, en todo el mundo, postescolar.

En Europa se da poca importancia a este punto, y se ofrece desgraciadamente, con ello, una prueba más de sus tendencias individualistas. Tanto el principiante como el que no lo es, necesita organizaciones para poder completar sus estudios y discutir sus problemas, donde encontrar directrices y hasta sanas críticas; informarse de las orientaciones y caminos que los grandes maestros van marcando no sólo en su país, sino en el mundo entero; porque, por muy adelantada que la técnica pueda estar en uno de ellos, siempre se encuentran, en otros, ideas, métodos y tendencias que podrían encontrar desarrollo y mejoramiento en aquél, aun cuando sus condiciones económicas y sociales sean diferentes y marquen su sello en la forma propia de construir.

El técnico, por otra parte, necesita, para su formación, de la práctica al lado de un maestro. Suele decirse que la vida es el mejor maestro. Es cierto; pero, es un maestro lento en sus enseñanzas y terriblemente caro, no sólo para el discípulo —que rara vez acepta gustoso lecciones de tal maestro—, sino para la malhadada sociedad que no le proporcione otro.

Necesita maestros a los que la sociedad preste oportunidades de desarrollar su labor con la intensidad y la continuidad necesarias para poder dar cabida a tal tipo de aprendices poco eficaces al principio. Y esto, no sólo en oficinas de proyectos, sino en la



XXI-2. Detalle del mercado de Algeciras. Fotografía M. García Moya.

práctica de la construcción misma, porque el proyectista necesita estar muy experimentado en esa práctica. En su labor —esto es fundamental—, no sólo debe entrar el proyecto, sino la dirección e inspección técnicas de las obras que proyectó, para ir, con ello, corrigiendo los defectos de su técnica de proyectista.

Ciertamente hay empresas constructoras que, en lo que va de siglo, han organizado sus cuadros técnicos con gran eficacia. En ellas puede encontrar el profesional medios sobrados de aprender todo lo que de la práctica constructiva necesita para su buena formación; pero no son ellas, por sí solas, las encargadas de crear los especialistas en las diferentes ramas de la técnica del proyectista; técnica que cada día, por extenderse y profundizarse, requiere más estrecha especialización. Las empresas constructoras trabajan, fundamentalmente, tras el interés de un beneficio comercial, que no tiene por qué ir al unísono con el interés del propietario, en cuanto a economía total de la obra, o a la bondad, eficacia y belleza de la misma, ni a las exigencias de avance general de una técnica.

Afortunadamente en muchos países se ha ido desarrollando, también, la misión del proyectista y del consultor en unidad independiente, con función intermedia entre el propietario y el contratista. En esta forma, la misión del proyectista queda liberada del interés directo por el beneficio de la contrata, y puede desarrollar, con más independencia, su función específica; pero, para ello, necesita conocer muy a fondo la técnica propia de la contrata, y cuidar, quizá más que si estuviese al servicio de ésta, de que su capacidad técnica y su honestidad profesional sean, en todo momento, garantía de acierto y de justicia en las relaciones entre propietario y constructor.

La técnica del proyecto estructural, aun separada del elemento constructivo, tiene hoy tanta complejidad que requiere unir especializaciones diversas en el seno de su propia organización y establecer una colaboración muy estrecha entre los diferentes especialistas; y esto, tanto más cuanto que la estructura no puede separarse, en ningún momento, del resto de la construcción.

Es demasiado frecuente que esta colaboración falle por el diferente carácter y la distinta preparación de los que han de establecerla. Este defecto se acusa especialmente entre el artista más o menos funcional y el técnico estructural. Es fundamental complementar la especialización de cada uno de ellos con las ideas básicas del otro, con sus exigencias y, especialmente, con las razones y los valores de estas exigencias y de todos los que en ella han de intervenir o han de utilizarla después.

Tras miles de años sigue impresionando la tragedia políglota de aquellos hombres que empezaron, bien avenidos, a construir una torre, y acabaron por abandonar la obra al no entenderse; seguros de que, en esta forma, ninguna puede llevarse a buen fin. Pero es lo cierto que hoy, con menos conciencia, se hacen las obras, las más de las veces, sin entenderse desde el principio al final los que creen colaborar en ella.

Especialización y colaboración son dos conceptos complementarios que encuentran, el uno en el otro, la razón de su existencia y el valor de su eficacia. Cuando ambas se reúnen en una organización, se tiene la mejor o la única solución buena, porque ella representa tener una dirección común del trabajo de los distintos especialistas. Su cabeza rectora ha de poseer una amplia cultura técnica, aunque no tenga que ser profunda en cada especialidad; pero sí es absolutamente necesario que sea la suficiente

para poder enjuiciar y ponderar las iniciativas y exigencias de los diferentes especialistas, en lo que tengan de contrapuesto; para dar las líneas directrices y, sobre todo, para infundir a toda la organización el espíritu de equipo y de confianza en el éxito, esencial para ponerla en tensión y evitar todo rozamiento perjudicial a su rendimiento. Solamente en una organización de este género, con personal auxiliar bien especializado en su misión, con métodos de trabajo normalizados y, en fin, con todos los detalles que constituyen una buena organización y en los que no es cosa de entrar ahora, es posible hacer proyectos bien estudiados, seguros y económicos.

En esto, como en tantas otras cosas, ha pasado la época en que un hombre, solo, podía hacerlo todo. Ciertamente, un técnico, de buena voluntad, con una máquina de calcular y un tablero de dibujo, puede hacer un proyecto; pero, ni le saldrá todo lo bien que debiera si no tiene una práctica muy trabajada, ni menos le saldrá lo económico que quisiera, a poco que valore su trabajo personal; y fácilmente caerá en un amaneramiento que impondrá un retraso creciente de su técnica respecto a la que alcanzan otras organizaciones mejor equipadas y con medios personales y económicos para estar al tanto de las nuevas teorías y prácticas.

No estará tampoco de más señalar cómo, para que el conjunto de todas estas ruedas marche y avance, y para que la especialización y la colaboración puedan ser fructíferas en su camino hacia nuevos progresos, es necesario contar también con la investigación como función, en cierto modo, independiente del proyectista y del constructor, pero, en íntima relación con ellos. Se requieren unos investigadores que, con una profunda base y extensa cultura matemática, se ocupen de los últimos avances de las teorías de cálculo; otros, con base química y físico-química, para entender de los nuevos materiales; otros, de los medios auxiliares y aun de los problemas de organización, etc. No es cosa de entrar, ahora, en cuántas y cuáles sean sus misiones; pero, es evidente que una rueda, esencial en el conjunto, es el investigador.

Y, por último, el proyectista, como todo artista —porque arte es esencialmente esta técnica— necesita ser comprendido por la sociedad que le envuelve; al menos por la profesional que más directamente le rodea; pero, a ser posible, por el más amplio círculo de la sociedad entera; de eso que se llama el público y que no es sólo el anónimo y vulgar, sino también el propietario, el usuario, el banquero, los directivos de las organizaciones públicas, el crítico, no sólo de arte sino también de técnica, etc., porque nunca se ha desenvuelto un gran arte en un pueblo insuficientemente cultivado para apreciarlo.

La prisa de la nueva vida actual, y el impresionante desarrollo de sus técnicas, han alejado nuestra sociedad de aquel entusiasta asentimiento con que, en otras épocas —clásica, gótica o renacentista—, el pueblo todo y, en particular, sus minorías selectas se interesaban y se deleitaban, no sólo con el aspecto de sus grandes construcciones, sino con los problemas que en ellas se encerraban y sus maestros habían resuelto.

Aún se escribe mucho —si bien se lee menos— del Arte y de su historia; pero queda un largo camino que andar todavía hasta que se comprenda cómo en la construcción se encierra otro género de arte, el más amplio, que abarca, no sólo el arte puro, sino también el más real que intrínsecamente acompaña a la técnica; y que la misma percepción estética no se completa sin la comprensión de las causas esenciales que dan a

la obra su perfección a través de la eucrática combinación estática de todos sus elementos, y de su lógico y orgánico funcionar resistente.

Y esta técnica –hoy que precisamente la cultura media es más elevada que nunca–, no es esotérica ni abstrusa en cuanto a la valoración cualitativa de sus funciones estático-resistentes, como ha podido apreciarse a lo largo de estas páginas. Es fácil de entender y de sentir a poco esfuerzo de reflexión que en ello se ponga. Lo que falta es, simplemente, la divulgación que atraiga el interés de las gentes que no se dedican a este género de trabajos, y la conciencia, en el espíritu de los que lo cultivan, de que esa comprensión exterior sería una ventaja para todos y, en especial, para ellos mismos.

Índice de Figuras

I-1.	Acueducto romano, en Segovia	15
I-2.	De la «Tour Eiffel»	19
II-1.	Figurilla prehistórica cretense	24
II-2.	Diferentes tipos de enlaces y de equilibrio	25
II-3.	Plexo tensional en una presa de gravedad	27
II-4.	Deformaciones y roturas de tracción y compresión	29
II-5.	Plexo tensional de rótulas y entalladuras	30
II-6.	Red de isostáticas en un túnel con y sin revestimiento	33
II-7.	Plexo tensional de una viga uniformemente cargada	34
II-8.	Deformación de vigas isostática e hiperestática	36
III-1.	Muro ciclópeo ibérico, de Tarragona	37
III-2.	Friso de la Puerta del Sol, en Toledo	40
III-3.	Viaducto de Quince Ojos, en Madrid	43
III-4.	Diagramas de tensiones-deformaciones y tiempo-tensiones	45
III-5.	Deslizamiento del terreno	50
IV-1.	Roturas de la madera, según el Prof. F. Stüssi	52
IV-2.	Enlaces en madera	53
IV-3.	Cimbra del viaducto de Longeray	54
IV-4.	Arco de maderos encolados	54
IV-5.	Puente del Québec	56
IV-6.	Diagrama alargamientos-tensiones del acero	58
IV-7.	Rotura espontánea por tensiones parásitas de laminación	59
IV-8.	Líneas isostáticas en junta roblonada	60
IV-9.	Enlace en el puente de Tordera	61
IV-10.	Plexo tensional en un alma con rigidizadores	64
V-1.	Voladizo en el Instituto Ramiro de Maeztu, Madrid	65
V-2.	Viga Vierendeel, en la Ciudad Universitaria, Madrid	68
V-3.	Tipos de rótulas Mesnager y Freyssinet	70
V-4.	Puente de l'Esbly	71
V-5.	Gatos de tesado y elementos de anclaje	73
V-6.	Sala de exposición de Turín	74, 77
VI-1.	Columnas romanas, en Mérida	80
VI-2.	Columnas hispano-árabes de la Alhambra, Granada	82
VI-3.	Palacio de la Audiencia, Barcelona	83
VI-4.	Soportes en celosía	84
VI-5.	Soportes en el Hipódromo de Madrid	85
VI-6.	Cimbra para el puente de Salgina-Tobel	87
VII-1.	Falsa bóveda de Uxmal	88
VII-2.	Puente de San Martín, en Toledo	92
VII-3.	Puente de Sandö	93
VII-4.	Red de isostáticas de un arco	95
VII-5.	Pandeos de un arco	96
VII-6.	Cimbra flotante para el puente de Plougastel	97
VII-7.	Arcos enjutados	98
VII-8.	Dintel de puerta, en la Torre de los Lujanes, Madrid	100
VII-9.	Pórticos	102
VIII-1.	Bóvedas caldea y romana	105
VIII-2.	Bóvedas por arista de una estación subterránea de Madrid	107
VIII-3.	Láminas cilíndricas	108
VIII-4.	Viga díptera del Frontón Recoletos, Madrid	109

VIII-5. Láminas cilíndricas	110
VIII-6. Bóvedas del vestíbulo subterráneo del Hipódromo de Madrid	111
VIII-7. Iglesia de S. Engelbert, Colonia	112
VIII-8. Club del Hotel La Concha, en San Juan de Puerto Rico	113
VIII-9. Proyecto de nave industrial	114
VIII-10. Dolmen prehistórico del Romeral, Antequera	115
VIII-11. Chozas de Tapial del Tchad	116
VIII-12. Palacio de deportes, en Roma	116
VIII-13. Deformación de cúpulas	117
VIII-14. Esquema estructural del mercado de Algeciras	118
VIII-15. Mercado de Algeciras	119
VIII-16. Iglesia de S. Félix y Régula	119
VIII-17. Cúpula del Festival Británico	120
VIII-18. Sala de Kalsruhe	120
VIII-19. Cubierta, en paraboloides hiperbólicos, en Méjico	121
VIII-20. Club Táchira, de Caracas	121
IX-1. Puente de Colonia	124
IX-2. Vigas compuestas de madera	125
IX-3. Perfiles metálicos	126
IX-4. Armaduras de una viga	127
IX-5. Tensiones en una viga de hormigón pretensado	128
IX-6. Dolmen megalítico de la Menga, Antequera	129
IX-7. Vigas continuas	131
IX-8. a.- Puente galo, según Viollet Le Duc	133
b.- Techumbre de Sta. M ^a de la Huerta, en Soria	134
c.- Alero del Pórtico del Partal, en Granada	134
IX-9. Acueducto de Tempul, en Jerez	135
IX-10. Placas	136
X-1. Proyecto de picadero, en Moscú	139
X-2. Puente de Moissac	140
X-3. Cerchas de madera	141
X-4. Vigas trianguladas	142
X-5. Viga experimental, estudiada en el Laboratorio de Zurich	144
X-6. Puente de Lafayette, en París	145
X-7. Cercha, en Ávila	146
X-8. Viga tipo Nielsen	147
X-9. Viga mixta para el puente de Lumes	148
X-10. Estructuras mixtas de hormigón y acero	149
X-11. Viga Vierendeel	150
X-12. Estadio de Raleigh	151
X-13. Cúpula poliédrica de aluminio, en las islas Hawai.	152
X-14. Modelo realizado en la School of Design	153
XI-1. Muros de contención	156
XI-2. Presa acapulada de Coolidge	157
XI-3. Muro de contención de Cantarranas, en Madrid	159
XI-4. Pantalla metálica	160
XI-5. Presa de Grands-Cheurfas	161
XI-6. Deslizamiento según un círculo péximo	162
XI-7. Muro de contención de doble curvatura	163
XI-8. Corrimientos en la presa de bóveda de Canelles	164
XI-9. Deformación de la pared de un depósito	165
XI-10. Proyecto de presa para el Llauset	166
XII-1. Sección de la Catedral de Viena	168
XII-2. Secciones tipo de láminas	169

XII-3. Hangar de dirigibles de Orly	169
XII-4. Bóvedas de doble curvatura	170
XII-5. Proyecto de nave industrial de 70 m de luz	170
XII-6. Catedral de Sevilla	171
XII-7. Trompas y pechinas	172
XII-8. Cúpulas de Santa Sofía	173
XII-9. Proyecto de cubierta de estación de ferrocarril	174
XII-10. Frontón Recoletos, en Madrid	174
XII-11. Mercado de Basilea	175
XII-12. Basílica de S. Miniát, Florencia	176
XII-13. Santa María de Noya	177
XII-14. Pórticos a dos aguas	178
XII-15. Auditorio al aire libre	179
XII-16. Maqueta de cubierta para una piscina	179
XII-17. Esquema del pabellón de EE.UU. en la Exposición Universal de Bruselas. 1958.....	179
XII-18. Cerchas a dos aguas	181
XII-19. Cubierta para quirófano, Madrid	182
XII-20. Cubierta en diente de sierra	183
XII-21. Cubiertas en voladizo	184
XII-22. Hipódromo de Madrid	185
XII-23. Sala de Conferencias de la Unesco, en París	187
XIII-1. Piso de madera	190
XIII-2. Placas de solarío, Madrid	191
XIII-3. Piso fungiforme de Langerhouse	193
XIII-4. Placa con capiteles por encima de ella	193
XIII-5. Bóvedas de piso	194
XIII-6. Bóveda tabicadas de una escalera a montacaballo	195
XIII-7. Bóvedas rebajadas	196
XIII-8. Rigidización de pórticos	196
XIII-9. Vestíbulo del I.T.C.C.	197
XIII-10. Fachada triangulada	199
XIII-11. Solución de anfiteatros	200
XIV-1. Puente de Golden Gate	201
XIV-2. Proyecto de puente sobre el Estrecho de Messina	202
XIV-3. Puente del Fith of Forth	203
XIV-4. Puente de sección en «pi»	205
XIV-5. Sección de puente de ferrocarril, en Zaragoza	205
XIV-6. Acueducto de Alloz	206, 207
XIV-7. Puente de Fairmount Park, Filadelfia	208
XIV-8. Viaducto de Ronda	209
XIV-9. Puente de la Joven, sobre el Taurus	210
XIV-10. Viaducto del aire, Madrid	211
XIV-11. Viaducto de Viaur.....	211
XIV-12. Puente de Salgina – Tobel.....	213
XIV-13. a.- Puente tipo Nielsen, Estocolmo	213
b.- Puente de Bayonne, Nueva York	213
XIV-14. Viaducto de Cantarranas, en Madrid	214
XIV-15. Viaducto de Squirrel Hill, Pittsburg	215
XIV-16. Viaducto de Font Pedrouse	216
XV-1. Refrigeradores de la Wolsall Power Station, Staff	220
XV-2. Rotura de arcos isostático e hiperestático	223
XV-3. Deformaciones de viga isostática e hiperestática	224
XV-4. Estructuras cómoda e incómoda	225
XV-5. Puente de Ahwillgate, India	225

XV-6. Puente de Tordera	228
XV-7. Campo de fútbol de Las Corts, en Barcelona	229
XVI-1. Construcción de un puente de varios tramos	232
XVI-2. Puente de Luzancy	234
XVI-3. Armadura rígida del arco de hormigón sobre el Esla	235
XVI-4. Arco del viaducto Martín Gil, sobre el Esla, Zamora	236, 237
XVI-5. Hangar de dirigibles, en Orly	238, 239
XVI-6. Cimbra permeable	240
XVI-7. Hangar de aviones, en Torrejón	239, 242
XVI-8. Acueducto de Tempul	243
XVI-9. Colocación de presa por voladura	243
XVI-10. Cajón flotante para cimentación del puente de Sancti Petri	244
XVI-11. Cajones flotantes para el dique seco de Cádiz	245
XVI-12. Palacio de Deportes, en Montevideo	246
XVII-1. Cúpula de S. Pedro, Roma	250, 251
XVII-2. Claustro de S. Pedro de la Rúa, Estella	253
XVII-3. Mezquita de Córdoba	254
XVII-4. Puente de la Roche-Guyon	256
XVII-5. Farola y mástil	261
XVII-6. Victoria de Samotracia	261
XVII-7. Edificio industrial S. C. Johnson & Son, en Wisconsin	262
XVIII-1. Depósitos esferoidales, Chicago	264
XVIII-2. Leyes de espesores	265
XVIII-3. Frapange del Vat Thuk, en Bangkok	266
XVIII-4. Cúpulas bulbiformes	267
XVIII-5. Tinajas de la mancha	268
XVIII-6. Proyecto de depósitos para el Hipódromo de Madrid	269
XVIII-7. Pontón de desagüe en hiperboloide	270
XVIII-8. Distintos tipos de arcos	271
XVIII-9. Directrices y espesores de arcos	272
XVIII-10. Pórticos acartelados.....	274
XVIII-11. Familias de curvas ortogonales.....	275
XVIII-12. Relicario de la campana de S. Patricio, Dublín	276
XVIII-13. Torre del Ayuntamiento de Estocolmo	278
XVIII-14. Silo de carbón, en el I.T.C.C., Madrid	279
XVIII-15. Soluciones del voladizo de una marquesina	280
XVIII-16. Bóvedas tabicadas del Mercado Sagrera, en Barcelona.....	280
XIX-1. Anteproyecto del Palacio de Deportes	283
XIX-2. Puente pueblerino.....	285
XIX-3. Deformada de un pórtico	287
XIX-4. Hangar, en Torrejón	290
XIX-5. Efecto de una viga flectada	291
XIX-6. Cimbório de la iglesia de Villaverde.....	293
XX-1. Muro de un dique seco	295
XX-2. Fisuración de un pórtico.....	296
XX-3. Fallo de una nave en dientes de sierra	297
XX-4. Medidas, en modelo reducido, del Frontón Recoletos, Madrid.....	301
XX-5. Fallo de un pilotaje.....	303
XX-6. Puente acueducto con ménsulas equilibradas.....	305
XXI-1. Cubiertas laminares en el Hipódromo de Madrid	310
XXI-2. Detalle del mercado de Algeciras	311

Razón y ser de los tipos estructurales

Eduardo Torroja Miret

Textos Universitarios • 13

En 1957, Eduardo Torroja publica *Razón y ser de los tipos estructurales*, libro de difícil catalogación en la literatura técnica sobre ingeniería estructural. No es un libro de texto sobre análisis estructural ni sobre el comportamiento de sus materiales, aunque tiene un profundo carácter didáctico en estos sentidos. Ni es un libro solamente informativo sobre los tipos estructurales al uso y sus formas. Ni, aún menos, es un libro de investigación. Es, más bien, el conjunto de reflexiones que un proyectista de estructuras expone como esquema de su proceso mental, tanto racional como irracional, o emocional, a la hora de plantearse un nuevo proyecto; del peso de experiencias y vivencias de una vida de trabajo en este campo. En él, Torroja no sólo habla de conceptos técnicos; también habla de sus preferencias estéticas, de las posibilidades formales de determinadas líneas y superficies, de la responsabilidad del proyectista y de su organización... Ingenieros, arquitectos, estudiosos o simplemente interesados por el diseño estructural, encontrarán en sus páginas ideas que capten su atención, y se sentirán atraídos por el cúmulo de conceptos, imágenes, reflexiones y, en definitiva, de enseñanzas y sugerencias que en él se condensan.

Razón y ser, como suele conocerse coloquialmente el libro, tuvo un rápido éxito. A su primera edición, editada por el entonces Instituto Técnico de la Construcción y del Cemento, siguió una segunda, en 1960, corrigiendo alguna errata de la primera –e introduciendo, sin quererlo, algunas nuevas–, a la que Torroja añadió unos párrafos en el capítulo XII, relativos al uso de las mallas tesas en cubiertas, una técnica todavía poco utilizada en su época. Su difusión internacional fue asimismo rápida, viendo la luz ediciones en italiano, alemán y japonés. La prematura muerte del autor, en 1961, impidió que se concretasen contratos de edición en EE.UU., Francia, Polonia y Yugoslavia. En España, cuando el Consejo Superior de Investigaciones Científicas concentró las publicaciones de todos sus Centros, su Departamento de Publicaciones, ante la demanda del libro, siguió realizando nuevas reimpresiones, todas ellas a partir de aquella segunda de 1960.

La presente tercera edición revisada, por el contrario, aunque basada íntegramente en las dos primeras, representa un nuevo esfuerzo editorial, modernizando su presentación y añadiendo algunas imágenes aclaratorias del texto. Representa, en definitiva, el esfuerzo por mantener vivo el pensamiento, vigente hoy día a pesar del tiempo transcurrido, de un gran ingeniero de su época.

José A. Torroja

