

**LA EVOLUCION DE LAS FORMAS ESTRUCTU-
RALES, EN RELACION CON SUS MATERIALES,
A LO LARGO DE LA HISTORIA
DE LA CONSTRUCCION**

REAL ACADEMIA DE CIENCIAS
EXACTAS, FISICAS Y NATURALES

DISCURSO INAUGURAL

DEL CURSO 1960-1961

LEIDO EN LA SESION CELEBRADA EL DIA 9 DE NOVIEMBRE DE 1960

POR EL ACADEMICO NUMERARIO

EXCMO. SR. D. EDUARDO TORROJA Y MIRET



M A D R I D
DOMICILIO DE LA ACADEMIA
VALVERDE, 22.—TELEFONO 221-25-29
1 9 6 0

Depósito Legal M. 11.245.-1960

C. BERMEJO, IMPRESOR.—J. GARCIA MORATO, 122.—TELEF. 233-06-19.—MADRID

LA EVOLUCION DE LAS FORMAS ESTRUCTURALES, EN RELACION CON SUS MATERIALES, A LO LARGO DE LA HISTORIA DE LA CONSTRUCCION

EXCMOS. SRES. ACADÉMICOS :

SRAS., SRES. :

Cuando la Directiva de esta Real Academia me hizo el honor de encargarme del discurso inaugural de este Año Académico, mi primer intento fue rehuir el encargo por mi incapacidad para encontrar un tema apropiado al caso. Y fue nuestro malogrado e inolvidable colega don Pedro Puig Adam quien me hizo detenerme en ese camino, y quien, deseando ayudarme, me indicó como posible tema «La evolución de las formas estructurales, en relación con sus materiales, a lo largo de la historia de la Construcción».

No soy arqueólogo, pero mi ya larga vida profesional, me ha llevado a tropezar con materiales y tipos de construcción, dispersos acá y allá como por azar ; pregones de lo mucho que ha tanteado y luchado la Humanidad ; de lo mucho que debemos a nuestros antecesores y de cómo todo ello nos obliga a procurar el perfeccionamiento de nuestra técnica, sin desmayar en los caminos de esfuerzo y de ingenio por aquéllos emprendido.

En todo problema estructural encontramos un material con sus específicas características, una forma que nuestra imaginación le da, y un proceso que nos permite realizarla en la práctica con ese material.

En consecuencia, cada material conduce a unas formas estructurales típicas diferentes de las que pueden desarrollarse con los otros. Pero estas formas nacen y evolucionan lentamente. Nuestra falta de imaginación hace que, en un principio, tratemos de amoldarnos a las formas estructurales propias de los materiales con que hemos venido trabajando tradicionalmente ; y sólo con la experiencia, que nos proporciona el tiempo, vamos, poco a poco, dándonos cuenta de los defectos y de las posibilidades propias de ese nuevo material ; distintas de las que se habían podido hacer con los otros ; algo que representa ya un grano de arena más en la duna inmensa de las soluciones constructivas.

Para acelerar ese progreso, interesa especialmente conocer cómo fué evolucionando la utilización de los viejos materiales ; por qué medios y motivos se fue produciendo esa evolución ; por qué se detuvo y qué condiciones determinaron su abandono y el paso a otros caminos, a otros materiales o a otras técnicas.

Este estudio no es siempre fácil, porque en el escorzo de los tiempos pasados descuellan todavía sobre el horizonte grandes monumentos de poderosas civilizaciones contruidos con materiales resistentes al desgaste de los siglos ; pero, sin duda alguna, muchas otras maravillas de arte, de esfuerzo y de ingenio, se han dejado perder en el olvido, con orgulloso desprecio por parte de las generaciones siguientes.

Surgen, acá y allá, entre los descubrimientos arqueológicos o entre las viejas crónicas, atisbos de materiales, de técnicas y de construcciones cuya existencia se rebela contra las ideas que tenemos de aquellos pueblos.

¿Qué serían los ladrillos que hacían nuestros constructores gaditanos —tan ligeros que flotaban en el agua, si mal creemos a Estrabón—, y que con todos los avances de la química actual, no hemos logrado imitar con eficacia práctica todavía ? O ¿cómo estaba formado el barro de ciertas fortificaciones hispano-cartaginesas cuya resistencia asombraba a Plinio ?

¿Cómo se compusieron los materiales de rejuntado que, en los monumentos de la civilización Khmer, convertían en auténticos monolitos sus muros de ladrillo, cuyas ruínas se conservan

todavía? ¿Con qué productos —si son ciertas las leyendas que nos han llegado—, lograban reblandecer la diorita los constructores incaicos, para tallar sus ciclópeos sillares en contorno curvos y poligonales hasta hacerlos ajustar con precisión de décimas de milímetro? Y, en caso contrario, ¿cómo lograron semejante precisión sin los métodos de representación y las técnicas de labra de que disponemos hoy? ¿Estamos seguros de que si los conociéramos no tendrían aplicación ventajosa todavía, y que no podríamos, partiendo de ellos, alcanzar metas constructivas de las que somos incapaces?

Y sin ir tan lejos, no podemos por menos de admirar realizaciones, tan extrañas para nosotros y al mismo tiempo tan funcionales en su ambiente y tan amoldadas a su fenómeno resistente, como son, por ejemplo, los maravillosos e impresionantes arcos elípticos formados simplemente de fajinas de caña o paja, en los amplios «mudjifs» del Eufrates; o las cúpulas del alto Camerún perfectamente constructivas y de óptimo perfil, en el que incluso se encuentran automáticamente corregidos los efectos de la retracción propia de las arcillas.

Es difícil encontrar un material que nos brinde la Naturaleza y que no haya sido utilizado por la Humanidad para la construcción de sus viviendas. Desde los tepes de cierta hierba especialmente cultivada por los indios de Río Grande para construir sus muros, resistentes, atérmicos y capaces de soportar en perfecto estado el paso de los siglos, hasta la nieve y el hielo con que los esquimales construyen sus refugios —verdaderas cúpulas de piel de carámbano—, en los que logran estar confortables no sólo porque todo es relativo en este mundo, sino también por su perfecta disposición funcional desde un punto de vista termodinámico.

Cuando se piensa, por ejemplo, que el Palacio de Cresos era de barro, y que el de Cnosos, todo él de soluble alge, mantiene todavía en pie gran parte de sus ruinas después de 3.500 años de ancianidad, no podemos por menos de reflexionar humildemente sobre la pretenciosa vulgaridad generalizadora de nuestros textos, y sobre lo cómodo y fácil que, en medio de todo, resulta la construcción actual gracias al empleo normalizado de unos

pocos materiales que nos brinda la industria con su recetario de aplicación ya hecho, para ahorrarnos la tentación de buscar otros.

Y no se puede olvidar tampoco que muchos de los actuales, como el cemento o el acero por ejemplo, no son más que perfeccionamientos de los utilizados, posiblemente, desde tiempo muy anterior a los que nos dejaron sus huellas.

Ciertamente, muchos de aquellos materiales no han alcanzado propiedades suficientes para pasar al rango de material estructural. La madera, la piedra, la arcilla cocida o sin cocer, y la cal o el cemento, han sido casi los únicos materiales verdaderamente estructurales que el constructor ha tenido a su disposición a lo largo de milenios.

El acero y el hormigón, con sus nuevas propiedades, han revolucionado totalmente ese campo, abriendo nuevas y dilatadas perspectivas. Y nada de extraño tiene, por consiguiente, que todavía no hayamos logrado obtener con ellos el máximo rendimiento. En cierto modo, basta, para tranquilizarnos, recordar los siglos de civilización que se requirieron para pasar, con la piedra, del muro ciclópeo a la Catedral de Chartres.

Pero si pensamos en los medios que la Ciencia y la Técnica nos proporcionan hoy, nuestro descargo será pequeño y se habrá de convertir en humilde remordimiento y en fuerte acicate para estudiar y trabajar más intensamente, y no pasar a la Historia sin haber aportado todo aquello a que las circunstancias moralmente nos obligan.

Con la piedra y el ladrillo la Humanidad hizo todo lo que podía hacer, creando los cuatro tipos estructurales clásicos: el trilito, el arco, la bóveda y la cúpula, con sus innumerables combinaciones.

Colocar en pie dos monolitos debió resultar más fácil de idear que de realizar. El valor del invento estuvo en imaginar los medios de arrancar, transportar, elevar y sentar aquellos enormes bloques ciclópeos, o de tallarlos después cuando se dispuso de material apropiado para las herramientas de labra.

El adelanto primordial, en la historia de la tipología estruc-

tural, fue indudablemente el arco. La idea de ir colocando dovelas sobre apoyos provisionales de forma que, al retirarlos, sus reacciones pasasen a los arranques, estableciendo así una nueva forma de equilibrio, señala el arranque de un proceso evolutivo milenario.

La bóveda, proliferación del arco, con todas sus conocidas formas y combinaciones, no hace más que avanzar por sendas que, vistas ahora desde su extremo, se nos antojan estricta y lógicamente obligadas. La cúpula, con su diferenciada personalidad, se entrecruza en ellas, como el ladrillo alterna con la piedra ; y los pasos de la evolución se suceden, hasta que góticos y renacentistas, recogiendo añejas tradiciones, a fuerza de combinar elementos, terminan por cerrar el paso a cualquier ilusión de superarlos.

Crear una forma de equilibrio espacial cubriendo un vano con el mínimo de material, y aligerar o evitar la costosa cimbra provisional, son dos anhelos que se repiten con todos los materiales ; incluso con los que apenas acaban de entrar en liza.

* * *

Hablamos de la edad del hierro ; pero en construcción, la verdadera edad del hierro o, por mejor decir, del acero, se abre a mediados del siglo pasado, cuando sus perfiles laminados se lanzan al mercado. Gracias a ellos y a los inventos del roblonado primero y de la soldadura después, se desarrolla rápidamente la triangulación que, en principio, permite sustituir el pesado trabajo de flexión por los de tracción y compresión, capaces de utilizar mucho mejor el material cuando de grandes luces se trata.

No es que la triangulación sea totalmente nueva en la historia de la Construcción, pues la cubierta a dos aguas, con tirante entre los pies de los cabios, es conocida y utilizada desde bien antiguo. Pero la dificultad del enlace en tracción, que ofrece la madera, impedía su desarrollo en las hoy clásicas triangulaciones canónicas. Las teorías estaban sobradamente avanzadas para acometer

el cálculo y aprovechar al máximo las características resistentes del nuevo material.

Por ello, en menos de cuarenta años, el acero alcanzó, con relativa facilidad, luces de medio kilómetro entre apoyos, prácticamente no superadas hasta hoy con ese material.

* * *

Las posibilidades y los caminos del hormigón han sido totalmente diferentes, y solamente posibles gracias a su coyunda con el acero, para formar el hormigón armado primero, y el pretensado después, cuando se logró hacerle trabajar conjuntamente con aceros de alto límite elástico.

Sin la fabricación industrial del cemento portland no hubiera sido posible este desarrollo ; porque sólo él permitió un endurecimiento suficientemente fuerte y rápido para hacer posible la construcción en los breves plazos a que obliga nuestra prisa ; esa prisa típica de nuestra civilización actual, y cuyas ventajas e inconvenientes prefiero no recordar ahora.

Pero, en su esencia, el portland —con sus colegas de cementos más o menos especiales que con él compiten—, no da lugar a un hormigón esencialmente diferente del «concretum» o del «opus incertum» romanos, cuando acompaña al árido sáxteo. Y poco o nada hubiera hecho cambiar los tipos estructurales, si no hubiera venido acompañado de las armaduras de acero para darle la resistencia a tracción que les falta a todos los materiales pétreos o cerámicos.

Al encontrarse los constructores con este nuevo elemento, hubieron de aplicarle las fórmulas estructurales clásicas, formadas de soportes, vigas, arcos, pórticos y losas, sin ninguna novedad.

Es cierto que muy pronto se dieron cuenta del resistente monolitismo que podían darle y del que carecían los materiales hasta entonces conocidos. Y así aparecieron los pórticos múltiples y superpuestos en la edificación, con sus ventajas de reducción de momentos flectores bajo cargas verticales, y de aumento de la resistencia del conjunto bajo los empujes del viento.

Así nacieron : la viga en té para los pisos, en la que la cabeza se funde con el forjado ; los sistemas de embrochalado ya utilizados en las estructuras metálicas, pero mucho más fáciles de aplicar ahora y mucho más eficaces ; la placa apoyada sobre todo su contorno, en la que un mismo espesor de hormigón permite, con armaduras cruzadas, trabajar simultáneamente en dos direcciones, con lo que el aprovechamiento del canto aumenta a más del doble y, al mismo tiempo, se logra una economía importante de la propia armadura. Y en fin, bajo la genial inventiva de Maillard, se llegó a la placa continua sobre apoyos aislados.

Los arcos y las bóvedas aligeraron sus espesores, afinando sus directrices y atreviéndose a trabajar no sólo en compresión sino también en flexión. Las cúpulas, sobre todo, se liberaron de las exigencias que a su directriz imponía la falta de resistencia a tracción de los materiales pétreos, cerámicos o conglomerados, que tanto habían dado que hacer a los constructores del Renacimiento. Ellos habían utilizado ya anillos de madera o de hierro, para lograr esta resistencia y, con ella, poder dar a sus cúpulas de Florencia o del Vaticano toda la elegancia de forma que sus ojos de artista pedían. Pero, ahora, al hormigón le era fácil seguir la ruta así iniciada ; porque, con la reacción de las armaduras en los paralelos, se logra fácilmente amoldar el funicular de las cargas casi a cualquier línea meridiana previamente impuesta.

De este modo se alcanzan ya, al entrar en el segundo cuarto de este siglo, cúpulas de 25 metros de luz en perfecta forma hemisférica con sólo cinco centímetros de espesor ; y las torres de refrigeración de centrales térmicas elevan, con parecidos espesores, sus hiperboloides de garganta que asombran por lo revolucionario de su forma. Tan novedosa y opuesta a todo lo arquitectónico conocido era ésta, que nadie pensó entonces que pudiera salir del recinto industrial y utilitario, para asomarse al de la estética-plástica del arte moderno.

Eran, éstas, nuevas formas resistentes que, hasta entonces, no habían podido aparecer en la técnica constructiva. Parecía ha-

berse llegado al límite ; parecía imposible idear tipos estructurales esencialmente diferentes de los que la Humanidad venía utilizando desde tantos siglos atrás : muros estables por su peso propio, pequeños dinteles o vigas en flexión, arcos, bóvedas o cúpulas en compresión ; y quizá algunos tirantes o cables sustentantes en tracción.

Y sin embargo, algo tenía inevitablemente que suceder. Basta pensar en el cambio radical de formas o, mejor dicho, de tipo estructural que se había producido en la historia —en realidad en la prehistoria—, de la técnica de la construcción, al pasar de la madera a la piedra, para presentir la revolución que habría de producirse al pasar de ésta, que casi no permite otra cosa que estructuras lineales, a otro material que se presta a formas de continuidad en dos direcciones —estructuras superficiales—, o a las de los grandes macizos tridimensionales como las presas de gravedad o arco-gravedad.

* * *

Demasiado se tardó en pasar del arco y la cúpula dovelados a la lámina cilíndrica continua, con o sin nervios de rigidez, que constituyen, ya, un tipo estructural totalmente distinto de los clásicos.

Y es que cuanto más logrado es el tipo estructural que una civilización ha desarrollado hasta la perfección —como es el caso de la bóveda clásica—, más difícil se les hace a las generaciones posteriores el abandonarlo o modificarlo de acuerdo con las nuevas posibilidades de otros materiales o de otras técnicas. El tipo clásico continúa imponiéndose en las mentes de los proyectistas ; y todavía, cuando da paso a la evolución, se refugia en el tema ornamental negándose a morir.

Baste citar, al efecto, los frontones helénicos que siguen repitiéndose, sin razón funcional, a través del Renacimiento hasta nuestros días, sobre puertas y ventanas. O yendo más lejos, la antiquísima «vimana» india —de origen, quizá, anterior incluso a la

invasión aria en aquel país—, y que ha perdurado desde los primeros monumentos líticos que nos restan, hasta el siglo XVII, para renacer en algunos proyectos actuales ; gracias, no sólo al poder de la tradición, sino también a la belleza de su original e inconfundible perfil.

Cada nuevo material ha de crear sus propias formas resistentes y constructivas, y ha de desarrollar una técnica que permita aprovechar sus ventajas y salvar sus inconvenientes o limitaciones.

Es necesario entrar primero por el camino de la intuición para imaginar las nuevas formas resistentes posibles, y pedir luego a la Ciencia y a la Técnica los medios de estudiarlas para aprovechar al máximo esas posibilidades, adentrándose en el análisis del nuevo fenómeno tensional.

Es aleccionador pensar en el retraso con que aparece la lámina cilíndrica respecto a la de revolución. Parece como si a la Técnica de la primera mitad de este siglo, envanecida con lo aprendido de la Ciencia —sensiblemente menospreciada, por cierto, en el siglo anterior—, no se le ocurriese pensar en un tipo estructural cuya realidad resistente aparece con sólo coger en la mano una hoja de papel, pero cuyo análisis matemático se salía de todo lo que había estudiado el técnico.

Y es aleccionador también el que fuese el estudio de un problema de óptica lo que condujese a la solución de la lámina cilíndrica de hormigón armado, y a su inmediato y fecundo desarrollo. Aleccionador porque ello demuestra el interés que tiene hoy el intercambio de ideas entre técnicas diferentes, y aún más, entre la técnica aplicada y la ciencia pura, entre la matemática y la frecuentemente apodada ciencia de la construcción.

El caso es que aquello creó un nuevo tipo estructural, total y esencialmente diferente de todo lo anterior, y al que el hormigón armado ofrecía un fácil desarrollo : la lámina cilíndrica o viga laminar de alma curva. Puede decirse que es una viga cuya sección es una curva, y cuyo espesor es muy reducido. Pero también puede considerársela como una bóveda ; no ya porque su

forma se parezca corrientemente a la de ésta, sino porque buena parte de las envolventes de tensiones principales forman arcos alabeados que corren por la superficie, de tímpano a tímpano.

Quizá lo más característico, importante y nuevo, desde el punto de vista arquitectónico, sea que un solo elemento, simple o indivisible estructuralmente, cubre un espacio rectangular en planta, por sí sólo, sin otro aditamento o complemento ; y sin apoyarse, como la bóveda en cañón, sobre sus generatrices de borde, sino sobre las directrices extremas correspondientes a los otros dos lados del rectángulo ; y en fin, sin dar empujes horizontales sobre los apoyos.

Su desarrollo en elementos sucesivos, contiguos por las generatrices de borde, formando láminas polilobulares, dan lugar a vigas díferas y dípteras o en gaviota.

Para los ojos acostumbrados al fenómeno resistente de la bóveda por arcos sucesivos en compresión, resulta desconcertante el que estas otras se sostengan con sus arranques en el aire. Ello es posible gracias, por una parte, a las nuevas propiedades traccio y adecuo resistentes del hormigón armado, y por otra, gracias al acervo matemático que cada día se hace más necesario para la resolución de los problemas técnicos de nuestra época.

El desarrollo de formas resistentes superficiales de este y otros tipos, que permiten llegar a espesores del quinientos y del setecientosavo de la distancia entre apoyos —es decir, a espesores menores, en proporción, que los de una cáscara de huevo—, provocó una fuerte atracción de los estudiosos hacia esta nueva técnica. Pronto se estudiaron, no sólo las superficies de revolución y las cilíndricas circulares, sino las cuádricas en general, y especialmente el paraboloide hiperbólico que, como superficie alabeada, puede presentar ventajas de tipo constructivo.

* * *

Las complicaciones y dificultades de cálculo, que se presentan en cuanto se pretende trabajar con los sistemas de ecuaciones diferenciales que resultan para otros tipos de superficies de expre-

sión matemática más complicada, hacían inútil el pensar en otras formas posibles de expresión más compleja. Los mismos avances de la Cibernética y de los cerebros electrónicos no han podido proporcionar todavía todas las ventajas que de ellos cabe esperar, por las dificultades de planteamiento y de desarrollo matemático que se encuentran para establecer el programa de trabajo que requiere la máquina.

Sin embargo, la técnica rara vez se detiene ante dificultades de este tipo ; ella suele encontrar otro camino por donde avanzar. El análisis experimental de tensiones ha sido ese otro arma que ha permitido salvar la barrera que se oponía al manejo de superficies de complicada expresión matemática ; y ha hecho posible, incluso, el prescindir de ella para la determinación de su estado tensional.

También el estudio de las estructuras por medio de modelos reducidos fue conocida y aplicada hace varios siglos ; especialmente entre los constructores románicos y góticos ; sin que conozcamos su origen a ciencia cierta, porque ya en aquellos tiempos se desarrollaba con tendencias esotéricas.

Pero, entonces, los problemas eran puramente de equilibrio, nunca de resistencia. Aún en los más atrevidos engendros del arte gótico, la piedra tenía siempre resistencia sobrada para los esfuerzos que se le pedían. Si amenazaba la ruina, era, o por defecto del terreno de cimentación, o porque los funiculares de las cargas, al separarse exageradamente de las directrices de sus arcos, bóvedas, arbotantes o contrafuertes, requerían, para mantener el equilibrio, resistencias a tracción de las que la piedra carecía.

Tratándose de equilibrios de pesos contra pesos, la escala no influye en ellos ; y bastaba hacer la estructura reducida por semejanza en cualquier material frangible y a cualquier escala, para poder asegurar que, si el equilibrio se alcanzaba en él, se alcanzaría igualmente en la construcción real, con tal de que se respetasen las leyes geométricas de la semejanza. Quizá arrastrados por este hecho, los proyectistas del Renacimiento se quedaban cortos

en los aros de tracción de sus cúpulas, donde el problema, por el contrario, es puramente resistente.

La fuerzas debidas al viento, que hubieran llegado a requerir una discriminación en las escalas de fuerzas, no tenían apenas influencia en esas construcciones, dado el enorme predominio de los pesos sobre aquéllas.

Pero en las actuales construcciones laminares, las tensiones se elevan al máximo que puede soportar el material en condiciones mínimas de seguridad. Tensiones de 120 kg/m^2 en el hormigón a compresión y 2.500 en el acero semidulce a tracción, son hoy corrientes, y se estudian los medios de elevarlas todavía en un **50 por 100** más para un futuro próximo. En estas condiciones, y con luces de más de quinientas y setecientas veces el espesor, ya no basta con asegurar las condiciones de equilibrio; es necesario asegurar también las condiciones de resistencia y de estabilidad elástica o visco-plástica, porque los peligros de pandeo se hacen predominantes.

En esta situación, la ley de escalas se complica. Se requiere que, con el mismo material, el modelo reducido, con iguales proporciones que la construcción real, soporte cargas por unidad de superficie no reducidas a escala, sino iguales en valor total a las de la propia construcción. Por otra parte, ya no basta, en general, con saber si se va, o no, a alcanzar la rotura. Se necesita conocer el estado tensional; conocer los valores y las direcciones de las tensiones principales sobre las dos caras de la lámina, para fijar los espesores mínimos que pueden aceptarse y para determinar en qué posición, en qué dirección y con qué cuantía han de disponerse las armaduras.

Porque los espesores mínimos interesan ahora más que nunca, puesto que su influencia en el coste se agudiza; ya que el aumentarlos, representa aumentar el peso; y con ello, vuelven a aumentarse los esfuerzos y por tanto los nuevos espesores y armaduras requeridas.

En consecuencia, ha sido necesario desarrollar una fina y compleja técnica de medida de las deformaciones con elevadas pre-

cisiones. Uno de los sistemas más desarrollados y corrientemente utilizados es el de medida de alargamientos o acortamientos unitarios, por variación de la resistencia eléctrica de un hilo de unas pocas centésimas de milímetro de diámetro, al variar ligerísimamente su longitud, una vez adherido aquél a la superficie del modelo. Pero igualmente se estudia la variación de propagación de ondas sónicas o supersónicas para la auscultación de deformaciones en el interior del modelo, o se determinan por la variación de la tensión eléctrica en los secundarios de diminutos transformadores diferenciales, al variar en ellos milésimas de milímetro la posición relativa del núcleo ; como se estudia también la variación de las constantes dieléctricas del material para el estudio de otros fenómenos ; etc., etc.

Del conocimiento de las deformaciones, en estado bi o tridimensionales, ha de pasarse al de los estados tensionales en relación con las características reológicas del mismo. Porque el hormigón no es un sólido en el sentido físico de la palabra, sino un pseudo-sólido con deformaciones, no sólo elásticas, sino también plásticas y viscosas sumamente complejas y aún no bien conocidas ; pero, desde luego, mucho más complicadas que las del acero, y en las que influyen decisivamente las condiciones ecológicas, diferentes de un clima a otro.

Por ello, ha sido necesario buscar materiales que, en el modelo y con los reducidos espesores que en él resultan obligadamente, presenten comportamientos elasto-visco-plásticos, no sólo similares a los del hormigón, sino acelerados en el tiempo para poder abreviar el estudio y conocer, en pocas semanas, lo que ha de hacer la construcción en decenas de años bajo la acción de las cargas a que ha de estar sometida, en ambientes continuamente variables, y teniendo en cuenta sus extraños fenómenos de fatiga bajo la acción de cargas repetidas o alternadas, o de cansancio bajo cargas permanentes, que pueden alterar su resistencia al cabo del tiempo ; aparte de los ataques o alteraciones químicas o físico-químicas que pueda sufrir el material.

La influencia de estos factores, en las condiciones de estabili-

dad, puede dar lugar a fenómenos de pandeo diferido y de hundimiento de la obra al cabo de varios años de vida, si no se han tenido debidamente en cuenta.

La realización de modelos reducidos —que en estructuras laminares han llegado a espesores de pocos milímetros alojando en ellos armaduras incluso postesas—, y su análisis tensional o deformativo, a pesar de todas las dificultades que presenta, no ofrece, sin embargo, mayor complicación cuando se trata de una simple forma cilíndrica, esférica o poliédrica, que cuando se trata de formas mucho más complejas. La dificultad que los procesos matemáticos pueden encontrar con éstas, desaparece en la nueva técnica experimental.

Y gracias a ello, se ha salvado la limitación que las estructuras laminares encontraban y que constreñía sus posibilidades de proyecto a las simples cuádricas y a ciertas superficies de revolución. Hoy se ven delgadas láminas de enormes dimensiones, especialmente en cubiertas de grandes salas de exposición, con formas tan complicadas, aparentemente, como las de una concha polilobulada sobre planta elíptica, o superficies de traslación sobre directriz alabeada en el espacio y cortada por secciones de las más variadas y aparentemente audaces curvas.

* * *

Llegada a este punto la técnica de las estructuras laminares en hormigón armado, vencidas las vallas que imponían las limitaciones del cálculo, o las de los procesos prácticos que la matemática ofrece, y siendo posible, gracias a las nuevas vías experimentales del análisis tensional, el prever la forma de trabajo de cualquier estructura laminar, por original y extraña que la moldee nuestra imaginación, es natural que, para delimitar y envolver un espacio arquitectónico, se trate hoy de sustituir el complejo sistema clásico de cobertura sobre un endo-esqueleto de soportes, vigas, cargaderos, arcos, etc., por un simple caparazón o exoesqueleto resistente; por un velo envolvente continuo y de pequeñísimo espesor, que al mismo tiempo que cierra, envuelve y

abriga ese espacio, se sostiene a sí mismo con un estado tensional aceptable por ese material y con una rigidez suficiente ; todo ello obtenido gracias, justamente, a la forma que se dió a la superficie, sea con sus pliegues como en las poliédricas, sea con simples o dobles curvaturas de los más diversos tipos y combinaciones.

No hay que olvidar, sin embargo, que, si bien todos estos adelantos y perfeccionamientos técnicos permiten conocer cómo va a comportarse una forma previamente fijada, están todavía muy lejos de crear o fijar la forma óptima que convendría elegir. Esta elección, o imaginación de la forma, sigue quedando al margen de los procesos lógicos o deductivos. La propia experiencia personal, complementada por un extenso conocimiento de los resultados de la ajena, servía, hasta ahora, para orientar la disposición y el primer dimensionado de una estructura, dentro de un conjunto limitado de tipos bien conocidos y experimentados. Pero hoy, en estructuras laminares, las formas son ya tan variadas y dispares, tan originales y diferentes de todo lo estudiado y experimentado anteriormente, que la dificultad está, más que en el propio estudio de una forma determinada, en la imaginación de esa forma y en la inmediata previsión intuitiva y cualitativa de sus condiciones resistentes.

La importancia y complejidad de aspectos de esta cuestión llega, con sus reflejos, hasta la misma actividad docente, a la que será necesario dar orientaciones nuevas y distintas de las seguidas hasta ahora ; y que, en general, se limitaban al estudio de unos tipos clásicos, relativamente reducidos en número.

* * *

Pero, ni el hormigón ni el acero laminado, son los últimos materiales que han entrado en la práctica de la construcción. Los alambres de acero especial, trefilados en frío con o sin tratamiento térmico, utilizados desde hace bastantes decenios, alcanzan resistencias utilizables de más de diez toneladas por centímetro cuadrado, con módulos de elasticidad análogos a los del acero co-

riente. Aceptan, por consiguiente, alargamientos que sobrepasan fácilmente los cinco milímetros por metro lineal en condiciones normales de trabajo. Ello ha dado lugar a la aparición del hormigón pre o postensado, más diferente del hormigón armado, que lo es el hormigón actual del hormigón romano.

Porque este acero, al poder alcanzar deformaciones tan altas, apenas pierde tensión por efecto de las deformaciones diferidas que va tomando el hormigón con la duración de la carga, a lo largo de la vida de la construcción. Así, las tensiones, que con el postesado se introducen, pueden reglarse a voluntad y mantenerse indefinidamente, evitando con ello los peligros de la fisuración, a que siempre está expuesto el hormigón armado en las zonas en que el hormigón, sin apenas resistencia a tracción, ha de acompañar en sus deformaciones al acero.

En el hormigón pretensado, en realidad, se realizan dislocaciones de tipo Somigliana, cuyos estudios, en cuerpos elásticos, parecían una simple elucubración sin interés práctico en la construcción.

* * *

Ciertamente, alambres con resistencia de 150, 200 y más kg/mm², se habían utilizado ya para la fabricación de cables trenzados. Y gracias a esas altas resistencias, se ha podido llegar a puentes colgantes de casi kilómetro y medio de separación entre apoyos, con cables formados por cerca de 30.000 alambres de 5 milímetros de diámetro, sin que estas luces sean, ni con mucho, las que podrían alcanzarse, al menos teóricamente.

El puente colgante es de tan antiquísima tradición, que ha llegado a hacerse derivar de los que la leyenda adjudica a aquellos simios que enlazándose, en serie, por boca y cola, saltaban, pendulando, de un árbol a otro, sobre arroyos insalvables para ellos de otro modo. Pero la novedad está en la viga de rigidez que, colgando del cable, hace posible mantener el tablero del puente sensiblemente horizontal, a pesar de las desigualdades de sobrecarga que el tránsito puede producir.

Ahora bien ; cuando de estructuras superficiales se trata, lo que se busca, en general, es precisamente evitar o reducir al mínimo esas vigas de rigidez, cuya función queda a cargo de la propia lámina si su forma está bien elegida. El problema se ha resuelto por diferentes caminos. Uno consiste en colgar, de cables anclados al contorno, las piezas prefabricadas que han de formar la cobertura después de rejuntadas en obra. La sala de deportes de Montevideo, es un ejemplo del sistema, que deja abierto el camino con sencillez magistral. La rigidez se logra, en este caso, no sólo por la influencia **preponderante** del peso respecto a los posibles empujes y succiones del viento, sino gracias también a la doble curvatura del tronco de casquete de revolución que forma una cúpula rebajada invertida. La sencillez y la economía de ejecución son altamente satisfactorias en este caso. El espesor puede ser muy pequeño ; y los peligros de pandeo, típicos de la cúpula delgada, desaparecen al estar los meridianos en tracción.

Otro camino diferente, y al parecer con mayores perspectivas de desarrollo, es el de la malla-tesa, cuyo ejemplo típico es la cubierta de la Arena de Raleigh. Se trata de una superficie de curvatura negativa en la que una familia de cables sustentantes sigue aproximadamente las intersecciones de la superficie con una familia de planos verticales paralelos, mientras que otra familia de cables rigidizantes sigue las intersecciones de aquélla con otra serie de planos verticales ortogonales a los de la primera familia. Mientras los de la primera presentan su concavidad hacia arriba, los de la otra lo hacen hacia abajo.

Se forma así una malla en la que, al poner en tensión los cables de una familia, se ponen automáticamente en tensión los de la otra.

El conjunto de cables, anclados en el elemento de borde, forma así un tipo estructural totalmente nuevo, bautizado con el nombre de malla-tesa.

No sé si habrá precedente, pero yo no le he encontrado en el arte constructivo de ninguna civilización. Es cierto que mallas o

tejidos colgados de postes, y puestos en tensión con relingas y proís de anclaje, se encuentran entre ciertas tribus nómadas de zonas semidesérticas ; pero la idea matriz de utilizar la tensión de una familia de fibras para tesar automáticamente la otra, dando lugar así a superficies de curvatura negativa con rigidez propia, creo que es original.

Muy poco, disperso y parcelario, se ha escrito sobre la historia de la técnica de la construcción y del arte estructural ; y creo que los que lo han hecho, no han apreciado todavía la originalidad e importancia de este invento.

Las estructuras colgadas, prácticamente reducidas a puentes de gran luz —aparte de los cables de teleférico y líneas eléctricas que no pasan de elementos estructurales simples, y que difícilmente entran en el dominio de la construcción—, son otra cosa bien distinta de la malla-tesa. La rigidez, o falta allí, o se encomienda a una viga, triangulada o no, pero trabajando siempre en flexión ; mientras que, en la malla-tesa, todos los elementos están en tracción, aparte, naturalmente, del borde que puede quedar en compresión, en tracción o en flexión, según la forma que se le dé.

Es cierto que, en algunos puentes modernos se complementa aquella rigidez del conjunto estructural, con cables tesos que van del apoyo a la altura del tablero, a diferentes puntos del cable sustentante ; pero ellos no son nunca suficientes para asegurar la rigidez, sin el elemento en flexión de la viga.

La malla-tesa es un tipo estructural de gran importancia por sus enormes y variadas posibilidades de forma y de separación entre apoyos. Puede asegurarse que las mayores áreas sin apoyos intermedios se cubrirán, durante mucho tiempo, con malla-tesa ; como las mayores luces de puentes se salvarán con estructuras colgantes. Me atrevería a decir que tanto tiempo cuanto la Humanidad tarde en encontrar otro material y otro tipo estructural capaz de aventajar a éstos.

Es curioso e interesante el que, después de un siglo largo de explicar en todas las escuelas de ingeniería, explícita o implícita-

mente, que la primera condición que requiere una estructura de construcción es la de ser completa —esto es, la de no tener más grados de libertad que condiciones de equilibrio mecánico—, resulte ahora que vayamos a utilizar y ensalzar las ventajas de una malla, que presenta tantos grados de libertad no condicionados, como recuadros hay en el interior de su superficie menos uno.

Es algo así como un puente colgante cuya viga de rigidez tuviera tantas articulaciones como pendolones, con lo que perdiera totalmente su poder rigidizante.

Sin embargo, se comprende que un puente así sería utilizable —aunque hoy no resultase económico—, si los pesos propios fuesen lo suficientemente importantes, frente a las sobrecargas móviles, para lograr que éstas apenas hiciesen variar la forma del funicular de cargas que habría de tomar el cable.

Esto es, en definitiva, lo que logra la malla-tesa, pero sin necesidad de aumentar los pesos muertos. El postesado de unos cables basta para dar, al conjunto, un estado de tensión suficientemente fuerte para que las tensiones adicionales —debidas en general al viento exclusivamente—, apenas hagan variar su forma; y para que las debidas a las influencias térmicas no lleguen a ponerla en peligro, ni por exceso ni por defecto de tensión.

Todo esto, sólo ha sido posible gracias a la existencia de los alambres de acero de resistencia suficientemente alta para que, con módulos de elasticidad sensiblemente iguales a los del acero normal, las deformaciones, de origen térmico o de cargas accidentales, no lleguen a producir más que tensiones relativamente pequeñas frente a las que se les introduce por el postesado.

La aparición de la malla-tesa no es una consecuencia lógica de los avances de la teoría de la elasticidad o de la, más general, mecánica de los sólidos deformables; sino que procede directamente de la aparición de un nuevo material: el alambre o cable trefilado con acero de alta resistencia; como la lámina, con mucha más aportación teórica inicial, es consecuencia de la presencia del hormigón armado; y la triangulación lo fué, prácticamente, de la del acero laminado, junto con la técnica del roblonado primero y de la soldadura después.

La forma de la malla determina un contorno ; o recíprocamente, a un contorno dado le corresponde una superficie, cuya forma no puede variarse esencialmente. Por su lado, el contorno se ve obligado a seguir el funicular, en general no plano, de las fuerzas que sobre él aplican los cables ; pues de lo contrario, sufre flexiones importantes que fácilmente lo hacen económicamente prohibitivo. Si ese contorno es cóncavo hacia el interior, trabaja en compresión, y suele hacerse en hormigón armado apoyado sobre los soportes del recinto, con escaso o nulo peligro de inestabilidad. Pero también puede seguir, de soporte a soporte, segmentos curvilíneos convexos hacia el interior, a modo de relingas. Con ello, este contorno queda trabajando en tracción y puede estar formado, también él, por cables de igual material que los de la propia malla. Pero entonces los soportes han de estar arriostrados, por tirantes, a puntos fijos a proís de la cimentación.

De este modo, sólo los soportes están en compresión y todo el resto de la estructura en tracción, sin flexiones, ni mermas por pandeo. Permite así el máximo aprovechamiento del material, que es hoy el de más ventajoso módulo económico-resistente en tracción.

* * *

Pero con todo, la malla-tesa, por sí sola, presenta, a la par que grandes ventajas y perspectivas, graves inconvenientes y limitaciones. Las limitaciones de forma en relación con la del contorno ; su falta de rigidez en cuanto las curvaturas son tan débiles como las que suelen exigir las condiciones funcionales en cubiertas de grandes vanos, los tipos de enlace entre cables, la colocación del material de cobertura y la impermeabilidad de sus juntas, constituyen, entre otros, problemas que aún no pueden considerarse totalmente resueltos en la práctica.

A resolver o eliminar estos inconvenientes y a abrir aún más amplias perspectivas, viene otra idea o solución estructural que inicia sus balbuceos justamente en estos momentos.

Si la combinación del hormigón con el acero corriente encon-

tró la forma de eliminar la mayor parte de los inconvenientes de cada uno de estos materiales por separado ; si el hormigón y los cables de aceros altos crearon el hormigón pretensado ; para mejorar todavía más las ventajas de aquella acertada colaboración, ¿por qué no probar a fundir en un solo elemento la lámina delgada de hormigón con la malla-tesa ?

Ya no se trata, en este caso, de establecer una lámina, e introducirle, después, unos cables postesados para mejorar sus condiciones mecánicas de equilibrio o para alejar el peligro de la fisuración de aquélla, como sería una lámina postensada. No se trata tampoco de establecer un forjado inerte, o superficie continua de hormigón, sobre un sistema sustentante de cables, como en las cubiertas colgadas.

Ahora se trata de colgar, sí, la lámina de hormigón de una malla-tesa previamente establecida ; pero disponiendo ésta sobre los soportes con los sistemas de tesado o de sustentación provisional suplementarios, necesarios para que, al desaparecer éstos, el conjunto trabaje coordinadamente.

La lámina quedará, en general, postensada, con todas las ventajas que ello puede representar ; el encofrado y la cimbra, siempre costosos, podrán eliminarse al disponer, desde el principio, de la malla sustentante ; la lámina de hormigón podrá hacerse de elementos prefabricados y rejuntados posteriormente, como en la lámina colgada, o podrá fabricarse directamente sobre una tela metálica sujeta a la malla principal, mediante la también moderna técnica del mortero proyectado —mal llamado del cemento-cañón o del gunitado— ; pero sobre todas esas ventajas, estará otra más importante y revolucionaria : la de dar a la malla igual o aún mayor libertad de forma que la alcanzada por la lámina continua sola o por la malla-tesa aislada.

En efecto ; suprimidas las restricciones de tipo económico que planteaba el encofrado y su cimbra, y sustituidos por la propia malla, los elementos sustentantes provisionales, que hasta ahora requería el hormigón, la malla puede tomar formas muy variadas y diversas al poder complementarse la sustentación definitiva con

otra provisional. La lámina, fabricada después sobre esa malla, podrá dar a la estructura final la resistencia de forma necesaria para que, al retirar los soportes provisionales, siga manteniéndose sobre los definitivos, si, desde un principio, la sustentación accesoria y la forma de la malla-tesa estaban oportunamente dispuestas para ello.

Como sustentación provisional pueden utilizarse no sólo soportes provisionales trabajando en compresión, sino también tirantes a proís para éstos o incluso para los definitivos ; porque al arriar después esos tirantes, lo mismo que al suprimir los soportes provisionales, las reacciones que ellos producían, pueden pasar a la propia lámina ya hormigonada.

Ya se comprende que ni el idear la forma, intuyendo previa y cualitativamente su comportamiento resistente posterior, ni el calcular o comprobar con suficiente aproximación sus condiciones de estabilidad y resistencia, serán problemas fáciles. La propia experiencia directa en modelo ofrece nuevas dificultades ; pero no parecen insalvables.

El problema se presenta muy complejo, porque, en definitiva, se trata de combinar un estado de equilibrio vectorial, como es el de la malla, con otro tensional : el de la lámina sometida a cargas iguales y contrarias a las impuestas por la sustentación provisional. Y se hace todavía mucho más difícil determinar cuál sea la disposición óptima de los cables de la malla. Aún con métodos experimentales, no existe hoy camino más rápido que el de repetidos tanteos en modelos sucesivos, lo que resulta bien penoso y excesivamente costoso para los volúmenes y costes corrientes de estas estructuras. La matemática, con todo su armamento actual, es incapaz, no ya de resolver, pero aún puede decirse que ni de plantear el problema de la determinación de direcciones y densidades óptimas de malla.

Pero la Técnica no siempre es consecuencia de la Ciencia, y bien nos enseña la Historia que, aún sin aquélla, es capaz de alcanzar éxitos sorprendentes. Y todos sabemos la creciente aceleración con que hoy avanzan la Ciencia y la Técnica a la vez.

Apenas hace tres años que, en el Symposium de Estructuras

Laminares de Oslo, se presentó la primera nota sobre la cuestión, indicando tan sólo las posibilidades de existencia de este nuevo tipo estructural. Hace un año, en el Symposium Internacional sobre Procesos no tradicionales de construcción de láminas, se presentaban dos trabajos sobre el tema ; uno de ellos con una realización totalmente lograda. Y creada entonces la Asociación Internacional de Estructuras Laminadas, ya se piensa en celebrar un Symposium dedicado exclusivamente a la malla-tesa y a su combinación con la lámina continua en contornos simple y múltiplemente conexos.

* * *

Indudablemente, todo esto es debido al adelanto actual de muchas ramas, tanto de la Ciencia pura y aplicada, como de las más diversas técnicas, preparadas para combinarse y ayudarse mutuamente. Pero no debemos olvidar que, con todas ellas, nada se hubiera logrado, ni siquiera intentado prácticamente, si no hubiese sido por la aparición de los nuevos materiales.

Cada vez que aparece uno, se buscan, se encuentran y se multiplican sus aplicaciones ; y en el amplio campo de las estructuras de construcción, cada vez surge un nuevo tipo estructural, que evoluciona rápidamente, como ser vivo que encontró en ese material el terreno necesario para arraigar firmemente, a la par que el ambiente científico-técnico propicio en que extender sus ramificaciones y ofrecer sus frutos.

¿Cuál será el material siguiente y qué formas estructurales nuevas nos aportará? No lo sé.

Quizá los llamados prefabricados, especialmente de hormigón, introduzcan nuevas variaciones tipológicas, pues si bien la refinada y genial técnica de Nervi se ha contraído hasta ahora a los tipos clásicos de bóvedas y cúpulas de revolución, no por ello deja de constituir una demostración palpable de que se encierran en esos elementos características específicas con abundosas promesas, que hasta ahora se ocultaban entre la maleza de dificulta-

des y de limitaciones que presentaba su fabricación y su utilización.

Pero lo que sí puedo asegurar es que basta con los materiales actuales para ocupar todo nuestro tiempo, nuestra imaginación y nuestra capacidad de estudio ; porque estamos, con éstos, en balbuceos ; y han de recorrer todavía una evolución, en sus aplicaciones, mayor que la mediada con la piedra desde los dólmenes prehistóricos a las cátedras góticas.

Ciencia y Técnica habrán de exprimir sus acervos para dominar todas las posibilidades que se entrevén. Porque la Técnica sola, aún con sus atisbos más geniales y sus arrestos más heroicos, no puede alcanzar la perfección sin apoyarse en la Ciencia ; y los técnicos, que nos sentimos honrados con pertenecer a esta Real Academia de Ciencias, lo sabemos mejor que nadie.

Si se ha dicho, y con razón, que el hacer es fácil y el saber difícil —y si a mí, como profesor, se me antoja difícil el hacer saber—, no es menos cierto que lo más difícil de todo es saber hacer ; saber hacer, en la vida, lo mejor cada día, sin desmayar en el empeño, aún a sabiendas de que, por cumplida que haya sido nuestra labor de hoy, no ha de faltarnos otra más ardua para mañana.

HE DICHO.