

C A S C A R O N E S D E N O R M I G O N

FELIX CANDELA

EXTRAIDO DE LA REVISTA "INGENIERIA INTERNACIONAL CONSTRUCCION". JUNIO 1958.

La Construcción de estructuras laminares curvas de hormigón armado ha experimentado un notable auge en los últimos diez años. A juzgar por el considerable número de proyectos en que se utilizan tales estructuras, que aparecen en las revistas profesionales, es evidente el creciente interés que despiertan sus posibilidades constructivas y estéticas. Sin embargo, el interés de los Arquitectos e Ingenieros por este tipo de construcción no ha venido precedido -ni acompañado siquiera- por el descubrimiento o evolución natural de métodos dignos de confianza para el análisis de esfuerzos en dichas estructuras y, sobre todo, de métodos lo suficientemente sencillos para que pueda reglamentarse su aplicación y puedan ser utilizados por el Ingeniero no especialista. Inclusive, el proyecto de tales estructuras, la elección previa de su forma y disposición, se hace generalmente de manera bastante arbitraria, por falta de un cuerpo de doctrina que sea del conocimiento general. Ello obliga a aquellos que han dedicado sus esfuerzos a la investigación y construcción de estructuras laminares a tratar de examinar públicamente el estado actual del problema del diseño de las mismas y, especialmente, a divulgar cuáles son las posibilidades razonables de ejecución de las distintas formas conocidas, y cuáles son las condiciones que deben cumplir aquellas nuevas formas que pudieran proponerse.

Entre los varios puntos a que me iré refiriendo en el curso de esta exposición conviene destacar los siguientes:

A.- El problema de la forma en relación con el comportamiento estructural y con las posibilidades actuales del cálculo.

B.- Limitaciones impuestas por la necesidad de calcular previamente los esfuerzos y por la condición económica de que el costo de los cálculos no debe sobrepasar un porcentaje pequeño del costo total de la estructura. Imposibilidad práctica de efectuar un análisis exacto para todos los casos eventuales de carga.

C.- Influencia en el proyecto del tamaño o escala de la estructura.

D.- Dificultades e inconvenientes del análisis mediante pruebas sobre modelos reducidos.

Se agrupan usualmente bajo el nombre de cascarones una serie de formas constructivas cuyo comportamiento estructural difiere, sin embargo, esencialmente de unos tipos a otros, de

acuerdo con la forma de la superficie. Una definición adecuada de lo que puede entenderse por cascarón propiamente dicho ayudaría mucho a evitar confusiones y constituye, por tanto, el primer paso en cualquier exposición de tipo general.

Sería más claro, a mi juicio, utilizar el nombre genérico de estructuras laminares para todas aquéllas en las que el espesor sea muy pequeño con respecto a las otras dos dimensiones, y restringir la denominación de estructuras de cascarón (shell structures) a aquellas estructuras laminares que fueran capaces de trabajar, en condiciones normales de carga, con esfuerzos de membrana solamente; es decir, sin que se produzcan flexiones de la lámina. Llámense esfuerzos de membrana a aquellos que se reparten de manera uniforme en el espesor de la lámina y actúan paralelamente al plato tangente a la superficie de la misma en cada punto. (Fig.1)



La condición necesaria, aunque no siempre suficiente, para que no existan flexiones, es que la superficie que constituye el cascarón sea de doble curvatura; es decir, que tenga una forma geoméricamente inmutable mientras no se produzcan alargamientos o acortamientos considerables. Con los materiales relativamente inextensibles que se emplean en construcción, con el hormigón armado especialmente, tales variaciones longitudinales sólo son posibles cuando los esfuerzos de membrana (de compresión o de tracción) alcancen valores muy grandes que sobrepasen el límite elástico del material. Qiere esto decir que, si es posible analizar los esfuerzos de membrana que se producen en una estructura de cascarón, y si los esfuerzos resultantes no sobrepasan los valores admisibles, no pueden aparecer flexiones que tendrían que venir acompañadas de cambios de forma o de curvatura de la lámina, y no es necesario, por tanto, recurrir a la teoría general de flexión para el estudio de la estructura. Es curioso constatar el hecho de que la mayoría de los estudios teóricos no parecen tener en cuenta las propiedades o características de la forma geométrica, ni la imposibilidad práctica de que puedan coexistir, en régimen elástico, esfuerzos de flexión y de membrana. Para que puedan aparecer los primeros y actuar en régimen elástico, es preciso que los segundos hayan pasado al régimen plástico y, por lo tanto, todo el preciosista artificio matemático de la teoría general de flexión cae por su base.

Una demostración intuitiva de lo anterior puede obtenerse considerando una cúpula de revolución con cargas paralelas a su eje y simétricas alrededor del mismo. Para que puedan aparecer flexiones o cambios de curvatura en los meridianos, por ejemplo, es necesario que ciertos paralelos se acorten y otros se alarguen. Obsérvese también lo que ocurre al tratar de producir una abolladura en una esfera, aplicando una presión concentrada en uno de sus puntos. Es preciso, en este caso, que los círculos inmediatos al punto de aplicación de la fuerza se alarguen substancialmente, para dejar pasar a través de ellos una superficie que es mayor que su propia área. Esto es perfectamente posible en una pelota de hule, que está hecha de un material muy extensible, pero no puede ocurrir en otra de hormigón hasta que los esfuerzos de tracción a lo largo de tales circunferencias hayan sobrepasado el límite elástico del material.

FORMA INMUTABLE

En resumen, puede decirse que una superficie de doble curvatura, completamente flexible pero inextensible, tiene una forma inmutable bajo la acción de cargas cualesquiera. No tiene sentido, por tanto, pretender extender el concepto de funicular a las superficies, procurando que se adapten a la distribución de las cargas permanentes y dando lugar a las superficies llamadas velarias o antive-larias. Así como un arco, que es una estructura lineal, solamente puede trabajar con esfuerzos directos o de membrana, sin flexiones, cuando su forma coincide con el funicular de las cargas, una estructura superficial de doble curvatura desarrolla esfuerzos de membrana exclusivamente bajo cualquier sistema de cargas. Es esta una propiedad que la naturaleza aprovecha, puesto que todos los cascarones naturales, y muy especialmente los de materiales pétreos, como un huevo o un caracol, adoptan formas de doble curvatura. Ya que no es necesario, en este caso, que la lámina tenga resistencia alguna a la flexión, el espesor de la misma puede reducirse al mínimo que sea constructivamente posible o económico, consiguiéndose de este modo las dos ventajas fundamentales de este tipo de estructuras; reducción del peso propio y posibilidad de adaptación en su comportamiento estructural a casos de cargas no previstas, sin salirse del régimen de membrana. Teniendo en cuenta que este régimen de trabajo es fundamentalmente más económico que el de flexión, puesto que los esfuerzos se reparten uniformemente en la sección, las superficies de doble curvatura resultan ser las más interesantes desde el punto de vista estructural y las únicas que debieran llamarse cascarones.

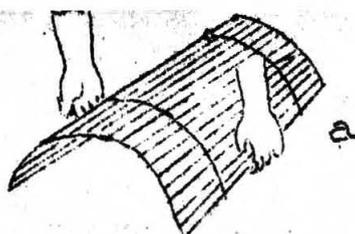
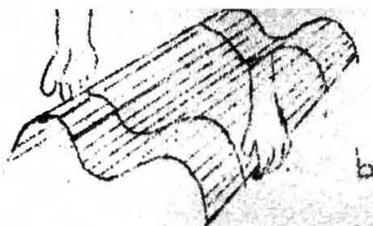


Fig. 2



Otro grupo de superficies curvas que se utilizan mucho en construcción son las de curvatura simple; cilindros, conos y, en general, todas las superficies desarrollables que, como su nombre indica, se obtienen enrollando una lámina plana. Es evidente que, en este caso, lo único que se opone a la modificación de la curvatura original es la rigidez a la flexión de la propia lámina. Si consideramos que la lámina es flexible (Fig. 2), su forma es totalmente inestable, y bastan pequeñas variaciones de las fuerzas que actúan sobre ella para producir deformaciones o cambios de curvatura de su sección recta. Para estabilizar la forma es necesario introducir elementos ajenos a la propia lámina, como tímpanos o arcos de rigidez, a distancias relativamente cortas. La naturaleza nos proporciona un ejemplo muy claro de la necesidad de este proceso en las cañas de bambú, con sus diafragmas rígidos a pequeños intervalos. Cuando los tímpanos de rigidez se disponen a distancias considerables, como en el caso de las bóvedas cilíndricas largas ("barrel vaults"), los cambios de forma de las secciones o directrices curvas, en la parte central del claro entre dos tímpanos, sólo pueden contrarrestarse por la resistencia a la flexión de la lámina misma, puesto que el efecto de la rigidez torsional de la bóveda desaparece a una corta distancia de los tímpanos rígidos.

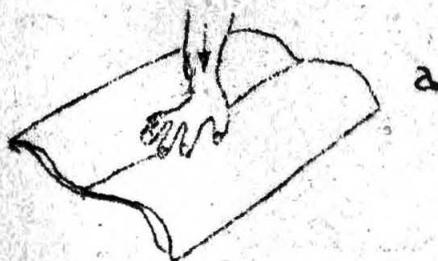
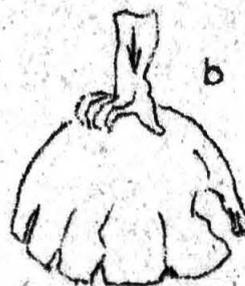


Fig. 3



La diferencia fundamental entre el comportamiento estructural de las superficies de curvatura sencilla y las de curvatura doble, puede apreciarse muy claramente observando la manera de romperse de ambas. Las primeras se rompen por flexión (Fig. 3a); las segundas por alargamiento (Fig. 3b).

Estas consideraciones demuestran que las superficies desarrollables, no teniendo una forma geomótricamente estable, no pueden considerarse como membranas, ni calcularse sus esfuerzos en régimen de membrana como preconiza la teoría alemana clásica, que ha sido sancionada oficialmente en fecha reciente con la publicación de un manual basado en ella por la A.S.C.E.

En ciertos vasos, como en el de las bóvedas cilíndricas cortas de directriz antifunicular de las cargas permanentes, la estructura puede funcionar ocasionalmente en régimen de membrana para dicho estado de cargas, pero, tan pronto como aparecen cargas vivas con distribución diferente, se altera este equilibrio inestable y se originan flexiones de la lámina. En realidad, estas bóvedas cortas funcionan del mismo modo que las bóvedas tradicionales de piedra, en las que se procuraba que la línea de presiones o antifunicular de las cargas, estuviera aplicada dentro del núcleo central de cada dovela. Como en estas bóvedas de piedra el peso propio era enorme, las posibles cargas vivas eran de un orden de magnitud mucho menor y su intervención no alteraba fundamentalmente la línea original de presiones. En cambio, en las modernas bóvedas de hormigón, de espesor insignificante, el peso propio es equiparable, y a veces menor, que las cargas vivas (viento, nieve, etc.) La acción de éstas provoca, por tanto, alteraciones considerables de la línea de presiones, que se sale totalmente de la sección, provocando flexiones en la lámina y la necesidad de aumentar el espesor de la misma. Para claros grandes no es posible aumentar el espesor tanto como los momentos exigen, y hay que disponer arcos rígidos a distancias que se determinan empíricamente.

En las bóvedas cilíndricas largas, que funcionan estructuralmente como vigas huecas de sección circular, aparecen siempre flexiones transversales en las secciones alejadas de los apoyos, como resultado del planteamiento del equilibrio estático entre las cargas que actúan en una faja transversal y la diferencia de esfuerzos cortantes entre las dos secciones que limitan dicha faja. Como es sabido, las cargas que actúan en cada faja tienen que estar en equilibrio con la diferencia de esfuerzos cortantes. Sin embargo, las primeras son verticales y las segundas tangentes a la curva directriz. Por consiguiente, los momentos que ambos sistemas de fuerzas producen, aún siendo de sentidos opuestos, no pueden ser iguales porque el brazo de palanca de las primeras fuerzas es mayor que el de las segundas. Estas flexiones pueden aminorarse mediante la disposición de vigas de borde o la consideración de la continuidad entre dos bóvedas contiguas, pero existen de todos modos y deben tomarse por la lámina, lo que obliga a dar a la misma un espesor substancial.

ESTRUCTURAS PRISMÁTICAS

Todavía puede apreciarse mejor esta situación en las estructuras prismáticas, formadas por losas dobladas que funcionan como vigas laminares. Es evidente que, considerando en ellas a las aristas como apoyos para las losas en el sentido transversal estas losas deben trabajar a flexión

entre tales apoyos, solicitadas por las componentes de la carga normales a la losa.

La estructura laminar más sencilla es la losa plana horizontal, pero no podría considerarse nunca como cascarón puesto que su acción estructural depende exclusivamente de su capacidad para resistir flexiones. Partiendo de esta forma como caso límite, encontramos una gama de estructuras en las que parte de las cargas se transmite a los apoyos por esfuerzos directos o de membrana, pero en las que otra parte de las cargas solicita a flexión a la propia lámina, hasta que llegamos a las estructuras formadas por superficies de doble curvatura en las que toda la carga se transmite a los apoyos por esfuerzos de membrana, sin aparecer flexiones hasta que no se alcancen los estados inmediatamente previos a la ruptura.

La progresión entre ambos casos puede establecerse del siguiente modo:

- A.- Losas planas horizontales. (Esfuerzos de flexión exclusivamente)
- B.- Estructuras prismáticas o losas dobladas. (Régimen mixto de esfuerzos de membrana y flexión).
- C.- Bóvedas cilíndricas, cónicas, y superficies desarrollables en general. (Régimen mixto de esfuerzos de membrana y flexión, con tendencia al predominio de los primeros).
- D.- Superficies de doble curvatura. (Esfuerzos de membrana solamente, siempre que la disposición de la estructura y de sus apoyos sea la correcta y los valores de los esfuerzos no excedan a los límites admisibles).

Las superficies de doble curvatura, que dan lugar a las estructuras de cascarón propiamente dichas, se clasifican, de acuerdo con su forma, en dos grandes grupos:

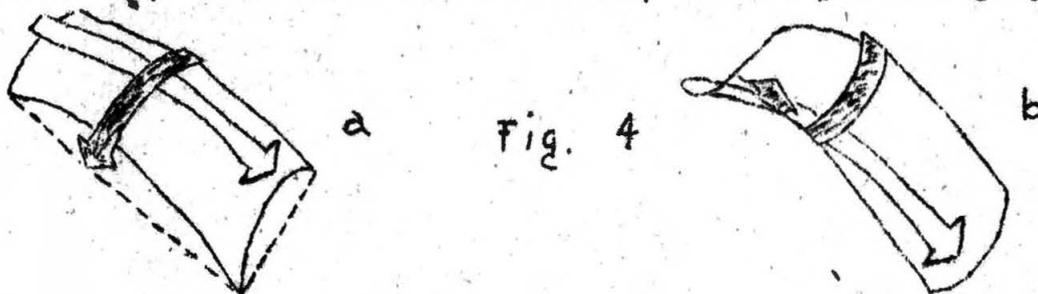


Fig. 4

- 1° Superficies sinclásticas, también llamadas elípticas por la forma de la ecuación que las representa, en las que las dos curvaturas principales en cada punto están dirigidas en el mismo sentido. (Fig. 4a.) El ejemplo más explícito de este tipo es la cúpula esférica.
- 2° Superficies anticlásticas o hiperbólicas, en las que ambas curvaturas principales van dirigidas en sentidos

opuestos, como en una silla de montar. (Fig. 4 b). Quizás el ejemplo más claro y conocido sea el hiperboloide de una hoja, que se obtiene retorciendo un cilindro formado por hilos sujetos en dos círculos de base, dando lugar a una figura parecida a un diávolo. (Fig. 5 b).

Ambos grupos de superficies comparten la propiedad de ser capaces de trabajar en régimen de membrana exclusivamente, lo cual las hace muy apropiadas -considerándolas desde un punto de vista puramente genérico y abstracto - para cubrir grandes espacios con un mínimo de material y, por tanto, de peso. Sin embargo, para la utilización de tales superficies en construcción, no podemos pasar por alto una serie de circunstancias aleatorias que dependen del lugar; como el clima, el grado de evolución de la industria de la construcción que puede estar más o menos mecanizada, el costo de la mano de obra, los materiales usuales y económicos, etc., y que pueden influir en la elección de la forma. Desde un punto de vista más universal, el factor decisivo para la decisión sobre la forma estructural es el estado real de la técnica analítica que ha de servirnos para la investigación previa de los esfuerzos en las estructuras que pretendamos construir con tales superficies.

De entre todas estas circunstancias, las primeras se refieren principalmente al costo y, puesto que éste no es un factor decisivo en muchos casos de edificios suntuarios, no constituyen una limitación rigurosa para la utilización de ciertas formas. En cambio, el último punto, la posibilidad real de cálculo, sí coarta definitivamente la libertad para el uso de formas arbitrarias, puesto que largos años de estar en la creencia, más o menos ilusoria, de que conocemos lo que ocurre en una estructura, nos obligan a tratar de determinar analíticamente el probable valor de las fuerzas que actúan en ella, antes de decidimos a construirla.

Ante la complejidad del problema matemático que el intento de cálculo analítico plantea usualmente, hay muchos que abogan por el empleo de pruebas sobre modelos reducidos, creyendo hallar en éstas un método cómodo de eludir dificultades que se antojan insuperables y, sobre todo, de evitarse la penosa tarea de pensar. Quienes tal cosa proponen, olvidan las limitaciones y el alcance real de tal procedimiento.

En primer lugar, los modelos deben ser hechos con el mismo material de la estructura definitiva, lo cual obliga a ejecutarlos a escala bastante grande, con un costo elevado. En segundo lugar, para que una prueba tenga éxito es necesario que conozcamos muy bien de antemano qué es lo que se busca.

LIMITACIONES DE LOS MODELOS

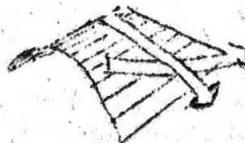
En realidad, el modelo sólo puede servirnos para comprobar aproximadamente si las condiciones de trabajo son las mismas que hemos supuesto o determinado por otros procedimientos. Téngase en cuenta que lo que importa, generalmente, no son los esfuerzos en la lámina, que suelen tener valores insignificantes, sino las fuerzas que ésta transmite a las piezas de borde o a los apoyos. Sin conocer, al menos, el orden de magnitud y la probable dirección de tales fuerzas, no es posible dimensionar las piezas de borde o, inclusive, decidir si es posible suprimirlas. Pero el tamaño, la disposición de la armadura y, por consiguiente, las deformaciones de estas piezas, influyen decisivamente en el repartido de esfuerzos en la lámina y en el comportamiento del conjunto estructural, por lo que, sin conocer aquellos datos, difícilmente podemos llegar a conclusiones que tengan alguna utilidad.

No puedo referirme aquí, con detalle, a las complicaciones a que da lugar el cambio de escala, que obliga a cargar el modelo con pesos que no son proporcionales a los de la estructura real, ni a las dificultades de interpretación de los resultados, por la imprecisión en la medida de las deformaciones y la incertidumbre en la correspondencia entre éstas y los esfuerzos. En este sentido, el único recurso es suponer que los materiales son perfectamente elásticos y que el régimen de trabajo es tal que los esfuerzos no sobrepasan los límites elásticos en ningún punto, supuestos ambos obviamente falsos. Todo ello contribuye a que las pruebas sólo sirvan como un medio auxiliar de certificar la justeza de nuestros cálculos o hipótesis previos, pero, de ninguna manera, como base para un análisis inicial.



a

Fig. 5



b