

BÓVEDAS GAUSAS

Las características principales de las bóvedas gausas se pueden resumir en los siguientes puntos:

1. El complejo ladrillo_mortero_hierro se comporta como una unidad estructuralmente viable. Éste fue el hecho básico a partir del que se podía empezar a pensar e intuir.
2. Elegimos como directriz la catenaria, luego el peso produce compresión simple; y esta compresión hace capaz a la estructura de resistir flexiones. Esta capacidad aumenta mucho si consideramos un “mínimo constructivo” de armadura.
3. Las tensiones de compresión debidas al peso propio son independientes de la sección, ya que la fuerza directa es proporcional al peso por unidad de desarrollo, o sea, a la sección. Estas tensiones son bajas: en una bóveda de 100 m de luz y 10 m de flecha de compresión es de 27 Kg/cm² suponiendo un peso específico medio de 2 toneladas/m³.
4. La armadura mínima asegura que una importante longitud de la cáscara (ampliamente suficiente para asegurar tensiones admisibles con hipótesis sencilla de cálculo) reacciona como una unidad elástica frente a las cargas concentradas.
5. Teniendo en cuenta que el único material a endurecer es el de las juntas y que el “tirado” de la mezcla hace que el mortero tome rápidamente una resistencia que, aun siendo pequeña, puede ser suficiente, se intuye enseguida que, para descimbrar la bóveda, no es necesario esperar el endurecimiento normal del mortero: Esto fue confirmado por los ensayos, no sólo para pequeñas bóvedas, sino para grandes estructuras.

Si bien estas primeras experiencias fueron guiadas por intuiciones, cada paso fue controlado por una gran (y muchas veces ingenua y torpe) suma de trabajo de cálculo.

Las facultades de síntesis y análisis son interdependientes; ese ver de qué hablamos antes se consigue con mucho trabajo. Conviene hacer esta aclaración porque es fácil caer en uno de los dos errores: o desdeñar todo lo que no sea análisis matemático (que necesita materia no matemática a que aplicarse), o suponer que la creación es hija de una intuición mágica que, como suele imaginarse, no existe.

Si queremos aumentar la luces a salvar, lo que acabamos de decir nos muestra que el problema no está en las tensiones debidas al peso propio; está en las flexiones, siempre inevitables, y en el riesgo de pandeo. El aspecto analítico de este problema no es simple (nos referimos a él más adelante), pero es obvio que para hacer frente al pandeo y a las flexiones conviene aumentar la rigidez de la cáscara. Lo corriente es (o era) disponer arcos de rigidez por arriba o por debajo de la bóveda, lo que no es una buena solución porque crea discontinuidades bruscas de sección que afectan inconvenientemente el régimen elástico de la membrana, complican el molde y el proceso de desencofrado si se disponen en el intradós, y si lo hacen en el extradós, son fuente de fisuras entre los dos elementos, lámina y arco, de espesores tan diferentes. Es mejor ondular la bóveda longitudinalmente, con lo que se aumenta su rigidez sin aumentar más que levemente su desarrollo y su peso, sin crear discontinuidades en la sección transversal.

Pero la ondulación constante en todo el desarrollo transversal no resuelve bien el problema porque obliga a apoyar la bóveda sobre elementos resistentes de un ancho igual a la amplitud de

la onda más el espesor de la bóveda, que son antieconómicos y pesados, o a complicados sistemas de descarga de los esfuerzos.

Resolvimos estas dificultades haciendo variable la amplitud de la onda de la bóveda desde un máximo en la clave a cero contra los elementos resistentes de borde, que pueden entonces hacerse económicamente, de un espesor tan pequeño como el de la bóveda misma.

Éstos son los fundamentos estáticos de la forma geométrica de la bóveda, que se obtiene entonces desplazando una catenaria de cuerda fija y flecha variable, contenida en un plano vertical móvil que se traslada, manteniéndose paralelo a otro plano vertical fijo, de modo que los arranques de estas catenarias recorran dos rectas paralelas entre sí, en general contenidas en un mismo plano horizontal.

Partiendo de esta forma básica puede obtenerse otro tipo de superficie gausa, cuando se desea iluminación convenientemente orientada. El resultado es una cubierta parecida a los conoides en diente de sierra, pero con posibilidades, en cuanto a las luces que se pueden salvar, que no se alcanzan económicamente con los conoides corrientes de hormigón armado.

Mostramos perspectivas esquemáticas de los dos tipos de bóvedas gausas y detalles tomados de los planos indispensables para construir este tipo de cáscara.

La forma de techo descrita es conveniente por la economía de materiales que permite, pero tendría grandes dificultades constructivas si se hiciera con las técnicas usuales del hormigón armado, que obligarían a un encofrado total o a un molde móvil de dimensiones importantes que permitiera la forma de trabajo y los plazos de desencofrado propios de esta manera de construir. Estas dificultades desaparecen si construimos la cubierta con ladrillos del modo siguiente: supongamos que disponemos de un molde cuya forma fuera la ya descrita y que hubiéramos construido una estructura resistente capaz de soportar los esfuerzos que haya de transmitirle la bóveda. Supongamos además que hubiéramos llenado este molde con dovelas perfectamente talladas y que estas dovelas estuvieran vinculadas longitudinalmente, de manera que la lámina de doble curvatura pudiera actuar como una unidad. Si las dovelas tuvieran la necesaria resistencia a la compresión, si la lámina como conjunto no pandeara y si la estructura de sostén resistiera los esfuerzos que le transmite la bóveda, podríamos retirar el molde inmediatamente después de haberlo llenado, y la bóveda sería, no sólo estable para su peso propio, sino que la compresión debida a la fuerza directa le permitiría soportar cargas que modificaran, dentro de ciertos límites, la línea de presiones.

Pero los ladrillos no son dovelas perfectamente talladas y es entonces indispensable interponer algún material entre ellos para transmitir los esfuerzos de una manera regular.

Para construir, pues, la bóveda disponemos los ladrillos (o las bovedillas huecas usuales) según las distintas catenarias, uniéndolos con morteros de arena y pórtland que se procura que llene toda su sección transversal, haciendo además la junta entre pieza y pieza lo más pequeña posible. Como en general no entrará un número exacto de piezas, tendremos que cortar por lo menos una de ellas. Por razones de terminación puede convenir cortar varias para conseguir continuidad en las juntas. Lo que hacemos es marcar el molde, formando un damero de aproximadamente un metro de lado, y preparar las pocas piezas de medidas especiales necesarias para obtener regularidad en las juntas.

Como las catenarias tienen diferentes flechas, serán también diferentes sus tensiones y, por consiguiente, sus acortamientos al entrar en carga; diferencias más importante por el hecho de que el desencofrado se hace en plazos muy cortos. Las de menor flecha son, desde luego, las que más asientan, y se comprende fácilmente que a menos que vinculemos longitudinalmente los distintos arcos, podrían producirse fisuras transversales entre estos, con lo que no valdrían más todas las consideraciones que hicimos al principio sobre la rigidez que a la lámina da su doble curvatura. Es, pues, indispensable dar continuidad longitudinal a la membrana. Para ello disponemos armadura longitudinal que, en caso de usar ladrillos, va simplemente en la junta longitudinal entre pieza y pieza. Cuando se usan bovedillas, esta armadura se dispone entre dos hileras de bovedillas, haciendo una entalladura en las piezas de la hilera más cercana al arranque que quedan, naturalmente, de un mismo lado de la armadura. De esta forma se consigue que la junta que contiene la armadura longitudinal sea del mismo espesor que las otras. Para que la armadura quede embebida en mortero, se tapan previamente los huecos de las bovedillas adyacentes a la armadura, con una delgada capa del mismo mortero. Con los entalles se evitan, además, las concentraciones de tensiones que produciría la armadura contra las paredes de la bovedilla al hacerse el rápido desencofrado de que hablamos más abajo.

También armamos con un mínimo de dos hierros de 6 hilos (suficientes para resistir las flexiones aun en las mayores bóvedas construidas hasta ahora) los nervios transversales entre bovedilla y bovedilla que luego se llenan de mortero, o las juntas transversales entre ladrillo y ladrillo, terminándose la bóveda con un alisado de arena y pórtland que armamos con una malla fina de alambre.

Inmediatamente después de lleno el molde disponemos de una lámina de doble curvatura con las siguientes características:

1. Mediante la ondulación que ya describimos hemos podido darle rigidez a voluntad.
2. Las partes no fraguadas, que son las juntas, representan un porcentaje muy pequeño de la superficie total, del orden del 2%.
3. En las juntas entre las piezas hay una malla de acero que constituye una verdadera red cuyos elementos longitudinales están, a través del mortero, en contacto con las caras de las dovelas que trabajarán a compresión.

Se ve entonces la posibilidad del rápido desencofrado de que hablamos, que es el que vuelve económicamente viable esta cáscara.

El tiempo que conviene esperar para que el mortero tenga la resistencia que asegure una buena distribución de los esfuerzos, ha sido en los casos experimentados de unas tres horas para bóvedas de 15 m de luz y de unas catorce horas para bóvedas de 50 m de luz.

No hay que olvidar que aun en el instante del desencofrado la bóveda trabaja como lámina gausa solidarizada en el sentido transversal por la gravedad misma, y en el longitudinal por las armaduras dispuestas en esta dirección, que la compresión transversal vincula a los distintos ladrillos o bovedillas; o sea que también es este caso es la gravedad, en último análisis, la que transforma la lámina, cuyas juntas están imperfectamente fraguadas, en un todo solidario.

En el momento del desencofrado estas juntas son verdaderas semiarticulaciones que rebajan el módulo de elasticidad de la cáscara considerada como conjunto.

Cuando se estudia la carga crítica de pandeo debemos considerar la situación de la estructura en el momento de la puesta en carga; tendremos entonces un coeficiente de seguridad transitorio menor que el definitivo (por ser menor el E transitorio que el definitivo). Por esto conviene notar que cada desencofrado viene a ser una prueba de carga en las condiciones más favorables.

Con la técnica que describimos es posible un ritmo continuo de trabajo con un encofrado que es una pequeña fracción del área a cubrir; aunque el molde sea unitariamente caro, como se usa un gran número de veces su costo grava muy poco el precio final de la estructura. La rigidez de la lámina recién desencofrada es muy buena.

Conviene destacar una ventaja adicional de la ondulación: se obtiene con ella un buen comportamiento acústico; las ondas sonoras inciden en la superficie de la cubierta con diferentes ángulos, con la consiguiente dispersión de la energía sonora.

Para la construcción del encofrado tenemos una parte básica de hierro, adaptable a varias luces, completándose luego el molde con madera. La viga superior de este molde se arma usualmente en el suelo y se levanta a su posición definitiva completándose la cimbra a medida que se levanta. El encofrado tiene gatos mecánicos para subirlo y bajarlo con suavidad y dispositivos sencillos para pasar el tensor, cuando éste se deja a la vista dentro del edificio. Hemos llegado a hacer de él una máquina simple con la que se “fabrica” la bóveda de manera sencilla y segura.

Para la ejecución de la bóveda no se necesita mano de obra de gran especialización y es fácil obtener buena calidad en la terminación. El comportamiento en el tiempo es muy bueno.

Disponiendo una malla adecuada en el enlucido de arena y pórtland, se consigue un eficaz control de fisuras debidas a la retracción del fraguado y a las variaciones de temperatura, pudiendo eliminarse la impermeabilización. Para evitar bruscas variaciones térmicas de la capa superior de mortero y para aislar mejor el local cubierto, pintamos la superficie de mortero con pintura blanca.

Hacemos ahora los tensores de cables postendidos en vainas de plásticos inyectadas pero a veces tenemos, aun, hoy, que usar acero de construcción, que se dispone entonces en número par de barras por cada tensor, con los hierros inicialmente separados y puestos en tensión por pinzado. Se plantea entonces un problema del que vale la pena hablar por la fertilidad técnica que tiene o puede tener.

Es (o era) usual colgar tensores análogos a éstos para evitar que la superposición de las tracciones debidas al empuje y a la flexión del peso propio, supere las admisibles, solución cara y antiestética. El estudio teórico del problema, coexistencia de tracción según el eje de la pieza y cargas transversales a la misma, es sencillo, análogo al de la coexistencia de la compresión axial y cargas laterales tratados en los estudios sobre pandeo.

Pensamos, antes y después de hacer el correspondiente estudio analítico, que el no colgar el tensor y el hecho de que en el empotramiento de éste se alcanzara la tensión de fluencia del hierro no podía modificar el coeficiente de seguridad. Como el ensayo de la pieza en las condiciones reales es impracticable, reprodujimos en el laboratorio las condiciones de tenso flexión de la sección de empotramiento traccionando una varilla de hierro, empotrada convenientemente en los extremos en las mordazas de la máquina de ensayo, con una carga lateral que reprodujera las tensiones de tracción y de flexión del tensor en la obra.

La carga lateral se iba aumentando de manera que siempre tuviese la relación de tensiones de tracción y de flexión de la realidad. El resultado fue el previsto; el coeficiente de seguridad del tensor no se modifica por la presencia de cargas laterales, ni aun en el caso de que las flexiones en la pieza ensayada sean, relativamente a las tracciones, mucho mayores que las que se dan en los tensores reales; la redistribución en régimen plástico de las tensiones en el empotramiento, asegura un coeficiente de seguridad igual al de la hipótesis de que el tensor estuviera no empotrado, sino articulado en el pilar.

Resumiendo cuanto llevamos dicho; las ideas básicas que informan esta solución son las siguientes:

1. Dar forma de catenaria a todas las secciones transversales de la bóveda, de manera que para el peso propio todas las secciones resulten solamente comprimidas.
2. Utilización de la ondulación, con pequeño aumento del peso por m², para incrementar su momento de inercia y consiguientemente su rigidez al pandeo y su capacidad para resistir acciones que, como el viento, dan curvas de presiones distinta de la del peso propio.
3. Utilización de piezas prefabricadas de pequeña dimensiones para que se adapten bien a la forma del molde y sean fácilmente manejables. Estas piezas pueden ser de hormigón, normal o poroso, de cerámica o de cualquier otro material. El cerámico nos parece el ideal, por lo menos por el momento.
4. Disponer no sólo armadura transversal (según los arcos), cuya función es obvia, sino también longitudinal, de traba, esencial en el funcionamiento del sistema: las diferencias de asentamiento debidas a la diferente flecha provocarían fisuras transversales que harían inoperante la ondulación que nos da la rigidez necesaria por el cálculo, si no hubiera hierro que absorbiera las correspondientes tracciones. Esta ondulación es particularmente necesaria en el momento del desencofrado, cuando el módulo de Young promedio de la cáscara es más bajo.

Al desencofrar, el mortero está sólo parcialmente endurecido, las juntas longitudinales están comprimidas por la fuerza directa transversal de la lámina, especialmente grande en estos casos por la importancia de las luces transversales en que se usan y que justifican estas bóvedas y por el hecho de que se hacen muy rebajadas. Esta fuerza directa complementa, por frotamiento, la insuficiente adherencia debida al fraguado incompleto; o sea, contribuye a vincular los sucesivos pares de piezas adyacentes a la junta longitudinal armada.

5. El molde móvil, cuya dimensión longitudinal es una pequeña fracción del largo total del local a techar y cuyo costo es alto, se amortiza en un gran número de usos y grava muy poco el costo final de la cubierta.
6. Como resultado de las ideas anteriores, existe la posibilidad de desencofrar estructuras de grandes dimensiones en plazos cortísimos.
7. Como resultado a su vez de los seis ítems anteriores, tenemos la posibilidad de un ritmo continuo de trabajo con un molde de pequeñas dimensiones.

Los métodos de cálculo usados para estas bóvedas se explican en el capítulo correspondiente; sólo esbozaremos aquí su sustancia conceptual.

El problema esencial a resolver es el del pandeo. Con un coeficiente de seguridad al pandeo mayor de 4; las tensiones para cualquier sollicitación distinta del peso propio pueden calcularse superponiendo las de compresión y las de flexión sin que sea necesario proceder a un segundo cálculo en que se cuenten, además de las flexiones directas debidas a la sollicitación considerada, las de la flexión debidas a la fuerza directa.

Es intuitivo, y lo hemos comprobado, que las flexiones debidas a las deformaciones del peso propio son despreciables. El problema es, pues, obtener en adecuado coeficiente de seguridad al pandeo.

Consideremos primero el caso de la ondulación variable pero continua, En este caso la estructura pandeada supondrá el pandeo de un cilindro que contenga los centros de gravedad de todas las secciones, bastando obviamente estudiar una sola onda.

Imaginemos medio arco sometido en la clave al empuje H y en el arranque a la reacción N. La fuerza directa cambia de N a H por la acción del peso propio. El medio arco puede asimilarse a una columna cargada en sus extremos por fuerzas iguales directa del arco más un término que depende de la inercia y el radio de curvatura, o sea, a una columna cargada con fuerzas N y H en sus extremos y con fuerzas distribuidas a lo largo de su eje y con la dirección de éste.

El problema puede resolverse por aproximaciones sucesivas a partir de una elástica supuesta para la columna, que tenga en cuenta por lo menos cualitativamente su forma probable a partir de la variación de la inercia. También puede procederse por computación utilizando las ecuaciones diferenciales que aparecen en la bibliografía citada.

Cuando tenemos una bóveda discontinua no es obvia la configuración de pandeo para cada franja de bóveda. Lo que hacemos es suponer que los giros se producen en cada sección alrededor del eje baricéntrico para el que el momento de inercia es mínimo. Esta hipótesis desfavorable, que equivale a despreciar la rigidez a la torsión de la lámina, es aproximadamente muy exacta de acuerdo a las medidas de obra.

Paredes de superficie regladas y láminas plegadas.

De esta manera está hecha la torre del presbiterio de la Iglesia de Durazno y parte del de la de Malvín en la que se hacía gran uso de esta forma de construir.

No puedo menos que llamar la atención sobre esta técnica sencilla, de bajo costo, y cuyas posibilidades arquitectónicas apenas se esbozan en las obras citadas.

Serían con ella posibles en nuestro medio, con tan poco excedente para construcciones que no sean especulativas, obras de legítima fuerza expresiva; por ejemplo, espacios que fueran torres de gran altura. La superficie reglada permitiría una planta amplia a nivel del suelo, que podría terminarse arriba, ya con una cúpula semiesférica o cónica, con un gran lucernario que fuera la única fuente de luz natural.