

Ricardo Aroca Hernández-Ros Doctor Arquitecto www.arocaaarquitectos.com
C/ Rafael Calvo nº9, 28010 Madrid 914482505 estudio@arocaaarquitectos.com

Título **Cimbrado y descimbrado de puentes en el siglo XVIII Perronet**
Autores Esperanza González. Ricardo Aroca.
Medio Actas del Cuarto Congreso Nacional de Historia de la Construcción
Fecha 2005/01/28

Cimbrado y descimbrado de puentes en el s. XVIII: Perronet

Esperanza González Redondo
Ricardo Aroca Hernández-Ros

En la construcción de puentes en Francia en el s. XVIII, en aquellos que precisaban de la construcción de grandes bóvedas, era necesario tener gran experiencia y esmero en la elección de los materiales, en la exactitud del aparejo y en el cuidado con el que se tallaban y colocaban las dovelas, pero el verdadero éxito de la construcción resultante estribaba en la forma de cimbrarlos y descimbrarlos evitando así las deformaciones excesivas o incluso el colapso. En este trabajo se hace un estudio sobre las distintas soluciones utilizadas por Perronet en la construcción de numerosos puentes en Francia en el s. XVIII.

Este trabajo se compone de tres apartados esenciales: 1) el cimbrado de los puentes, 2) los movimientos de las bóvedas durante su construcción y los asientos resultantes, y 3) el descimbrado. En el primero, se explica la construcción de las cimbras de madera. a) la disposición de los elementos de las armaduras, b) las piezas principales y sus dimensiones, c) el ensamblaje de las piezas y d) la formación de las armaduras; en el segundo los movimientos que sufren las cimbras a medida que se van cargando con las distintas dovelas observando que bajan en la zona de los apoyos y tienden al mismo tiempo a subir en la zona de la clave y la forma de controlar estos movimientos para que no se abran excesivamente las juntas; y en el tercero, el descimbrado de las bóvedas una vez cerrados los arcos y cuando el mortero ha adquirido la consistencia suficiente, en el que se expone el orden seguido en la retirada de los calzos y los forros y siempre de forma simétrica a ambos lados de la bóveda y una vez que

las bóvedas quedan libres, se retiran o se hacen caer las cimbras para finalizar la fase de descimbrado.

Perronet no sólo ha construido numerosos puentes con grandes bóvedas, sino que ha escrito varias memorias en las que se describe su trazado, construcción, y retirada una vez colocadas las claves. Este trabajo pretende acercarnos a una de estas memorias «Sur le cintrement et le décintrement des ponts» (*Mém. Par.* 1773).

PERRONET: SUS APORTACIONES A LA INGENIERÍA ESTRUCTURAL

El trabajo de Perronet (1708–1794), el gran ingeniero del siglo de las luces, es parte del desarrollo general de la ingeniería de las estructuras francesa del s. XVIII. Su obra es de gran envergadura y estriba principalmente en las carreteras, los puentes y los canales. En su afán por construir puentes de mayor solidez, intentó disminuir la resistencia al flujo del agua reduciendo el espesor de las pilas y aumentando la separación de los arcos: mientras que lo habitualmente recomendado era que el espesor de las pilas fuera un quinto de la separación del arco, los apoyos del puente de Neuilly eran sólo la décima parte de esta separación. También es igualmente sorprendente lo rebajado así como la ligereza de estos arcos. Criticado por sus atrevidas creaciones, Perronet contestó a sus detractores comparando el soporte de los puentes modernos con los pilares de las iglesias góticas.

Según él, la transferencia del empuje horizontal a los pilares explicaba la ligereza de los soportes verticales en estos dos tipos de construcciones.

Su fama se basa esencialmente en los trabajos de estructuras en la construcción. De los trece grandes puentes del s. XVIII: Orleans (1750–1760, comenzado por Huppeau); Mantes (1757–1765); Trilport (1758–1764); Saint-Edme, en Nogent (1766–1769); Les Fontaines (1770–1771); Biais-Bicheret (1775); Neuilly (1768–1774); Chateau-Thierry (1765–1786); Pont-Sainte-Maxence (1774–1785); Brunoy (1784–1787); Rosoy (1786–1787); La Concorde, en París (1786–1791); Nemours (1776–1805), ha proyectado y construido once, ha terminado uno (Orleans) y comenzado el último (Nemours, terminado en 1805). Los tres principales son Neuilly, Pont-Sainte-Maxence y su obra maestra el puente Luis XVI (actualmente Puente de la Concordia, en París), en los que ha revolucionado las reglas de construcción usadas hasta entonces.

Perronet también escribe numerosas memorias teóricas, entre sus publicaciones cabe destacar: «Mémoire sur l'éboulement que arrive quelque fois à de portions de montagnes et d'autres terrains élevés, etc.» (*Mém. Par.*, 1769); «Sur le cintrement et le décintrement des ponts» (*Mém. Par.* 1773), «Mémoire sur les moyens de conduire à Paris une partie de l'eau des rivières de l'Ivette et de la Bièvre» (París 1776), «Sur la réduction de l'épaisseur des piles et sur la courbure qu'il convient de donner aux voûtes, pour que l'eau puisse passer plus librement sous les ponts» (*Mém. Par.*, 1777); «Description des projects et de la construction de divers ponts, canaux, etc.» (París, 1789–93); «Mémoire sur une nouvelle manière d'appliquer les chevaux au mouvement des machines en y employant de plus leur poids et celui du celui du conducteur» (París, 1793 y 1834), y «Mémoire sur les moyens de construire de grandes arches en pierre» (París, 1793).

Perronet muere en París a los 85 años de edad. Arquitecto, ingeniero, inventor y administrador de talento, ha renovado el arte de construir los puentes del s. XVIII y ha creado y dirigido durante cuarenta y siete años la Escuela de Ponts y Chaussées.

LAS CIMBRAS DE MADERA: ELEMENTOS CONSTITUYENTES

Para construir los puentes de piedra es necesario, en general, emplear una estructura de madera, denomi-

nada cimbra, que sea suficientemente fuerte para sostener las bóvedas hasta que se colocan las claves y las bóvedas son estables por sí mismas. Esta estructura se compone de unos elementos ensamblados colocados verticalmente, llamados cerchas o armaduras, que suelen espaciarse de 6 a 7 pies unos de otros, y de unas piezas horizontales llamadas forros, que soportan las hiladas de dovelas de una armadura a otra. Se colocan unas cuñas o calzos fuertes bajo los forros y otros menores para acabar de situar cada hilada de dovelas a la altura que exija la curva de la bóveda; las armaduras se atan a continuación con riostras y largueros colocados horizontalmente y sostenidas por codales a ambos lados para evitar su inclinación.

Estas armaduras que componen las cimbras, se fabrican generalmente con unas piezas horizontales llamadas tirantes, con pares, pendolones, riostras colgantes y parecillos, todas machihembradas y empernadas. Cuando las armaduras no se apoyan más que en los estribos y en las pilas de los puentes, se las denomina armaduras recogidas; cada punto de apoyo puede tener así una sola pieza de madera, llamada montante, en lugar de estarlo sobre varias filas de pies derechos, como era la costumbre. Perronet escribe cómo construir las cimbras para bóvedas de 60, 90 y 120 pies de luz. En la construcción de las cimbras del arco central del puente de Cravant de 60 pies de luz y 20 de flecha de la clave a los arranques, que se muestra en la figura 1, se procedió como sigue:

Se ha cimbrado, siguiendo mis dibujos, con cinco armaduras recogidas separadas 5 pies y medio una de otra; cada armadura compuesta de tres hileras de pares, la primera y la tercera de cinco piezas y la de en medio de cuatro. Estas hileras de pares estaban colocadas una encima de la otra, unidas en triángulo y sujetas con riostras, como he explicado anteriormente: cada par tenía de 15 a 16 pies de largo y de 8 a 9 pulgadas de grosor; las riostras eran todas del mismo grosor y de 7 a 7 pies y medio de largo. El grosor de cada tablón de los forros era de 4 a 5 pulgadas: la piedra empleada en este puente pesa 176 libras el pie cúbico y el espesor de la bóveda es de 4 pies en la clave. Se constató que las maderas eran endebles y se aconseja dar, para una bóveda de este tamaño, al menos 10 pulgadas de grosor a los pares y riostras, o aproximar las armaduras a cuatro pies.

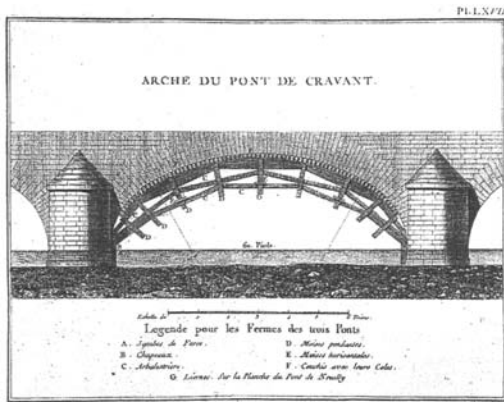


Figura 1
Arco central del puente de Cravant. Leyenda para las armaduras de los tres arcos. A. Montante, B. Viga horizontal, C. Pares, D. Riostras verticales, E. Riostras horizontales, F. Forros con sus calzos, G. Larguerost

En la construcción de las cimbras del puente de Saint-Edme en Nogent-sur-Seine de 90 pies de luz y 26 de flecha de la clave a los arranques, que se muestra en la figura 2, escribe:

Se cimbró con cinco armaduras recogidas, separadas 7 pies una de otra, compuesta cada una de ellas por tres hileras de pares, como en el puente precedente: la primera y la tercera hilera se componían de cinco piezas y la de en medio de cuatro, cada una de 18 a 22 pies de largo y de 14 a 16 pulgadas de grueso; las riostras tenían el mismo grosor que los pares y de 7 a 8 pies de largo; cada tablón de los forros tenía de 6 a 7 pulgadas de grueso. Estas cimbras eran muy resistentes: creo que habría bastado darles de 12 a 15 pulgadas de grosor a los pares, como proponía mi presupuesto, en lugar de las 14 a 16 que el contratista les ha dado, para emplear las maderas como se encuentran en los bosques. La arenisca con la que se ha construido ese puente pesa 180 libras el pie cúbico y el espesor de la bóveda en la clave es de 4 pies y 6 pulgadas.

En la construcción de los cinco arcos del puente de Neuilly de 120 pies de luz, 30 de flecha y 45 de ancho que se muestra en la figura 3, Perronet escribe:

Se cimbró con ocho armaduras recogidas separadas 6 pies. Cada armadura estaba compuesta por cuatro hileras de pares, atados triangularmente como los de los dos ar-

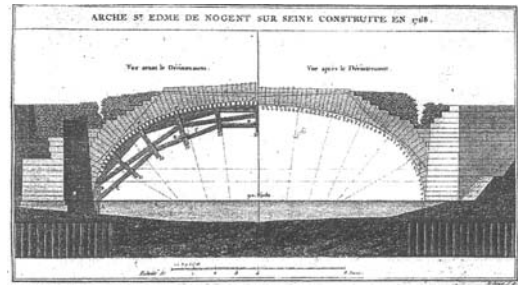


Figura 2
Arco de Saint-Edme construido en Nogent-sur-Seine de 90 pies de luz. Se cimbró con cinco armaduras libres. Vista antes del descimbrado con la leyenda para las armaduras: A. Montante, B. Viga horizontal, C. Pares, D. Riostras verticales, E. Riostras horizontales y F. Forros con sus calzos; y después del descimbrado con la numeración de las distintas hiladas de dovelas desde la primera en el arranque hasta la 47 en la clave

cos precedentes; la de abajo se componía de ocho piezas, la segunda y la cuarta de siete y la tercera de seis, todos de 19 a 23 pies de largo y de 14 a 17 pulgadas de grueso; las riostras colgantes, en total trece, tenían de 9 a 10 pies de largo y de 14 a 15 pulgadas de grueso cada pieza. El conjunto estaba atado con cinco riostras horizontales de 9 a 15 pulgadas de grueso y ocho largueros también de 9 pulgadas. Los forros tenían de 7 a 8 pulgadas de grosor; los calzos de debajo y de encima de estos forros tenían, unos de 6 a 7 pulgadas y los otros, que son los del asentador, alrededor de 2 pulgadas de altura, de forma que el intervalo entre la parte superior de las armaduras y las

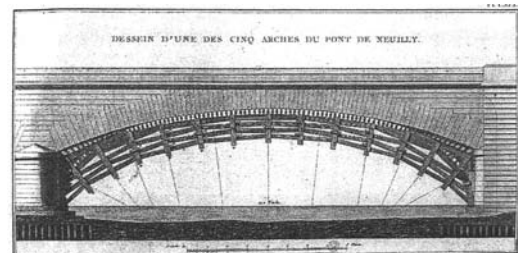


Figura 3
Trazado de uno de los cinco arcos del puente de Neuilly de 120 pies de luz. Leyenda: C. Pares, D. Riostras verticales, E. Riostras horizontales, F. Forros con sus calzos inferiores y superiores y G. Largueros

bóvedas era de 17 a 18 pulgadas, siendo necesario darle al menos el doble de la altura de los forros.

TRAZADO Y POSICIÓN DE LOS ELEMENTOS DE UNA ARMADURA

Para resistir esfuerzos, las piezas de madera pueden trabajar de dos formas distintas: 1) si la carga se aplica en los extremos, con las fibras dispuestas según la dirección de la fuerza, en esta posición las piezas tienen la máxima resistencia, o 2) si tienen las fibras oblicuas a la dirección de este empuje, las piezas oponen una fuerza menor, cuyo valor es al anterior como el coseno del ángulo que forma la dirección del empuje con la de las fibras de la madera es al seno total; de manera que cuando las piezas son horizontales la fuerza es nula. Según este principio, las piezas principales de las cimbras deberían colocarse siguiendo la dirección del radio de las bóvedas que han de sujetar.

Trazado de la armadura

Para construir una armadura, es necesario hacer un trazado minucioso de la solución adoptada. Perronet explica en sus memorias cómo debe realizarse éste y lo refleja en una de sus láminas que reproducimos más adelante en la figura 4:

Si por el centro de gravedad F de una sección de bóveda tal como la $BCDE$ (figura 4, fig. 1) hacemos pasar una línea vertical GI que corta en I a la perpendicular HI levantada sobre el punto H , se traza el arco YZ , determinado por los centros de gravedad de todas las dovelas que forman la bóveda, supuestas infinitamente delgadas; cerraremos a continuación el paralelogramo $NLIS$, en el que el lado IM tiene centro en A , y el punto N está situado sobre la vertical IG ; la diagonal IN expresará el peso de la porción de bóveda $BCDE$; el lado IL , el esfuerzo que realiza sobre las dovelas inferiores $BCTV$; e IS la parte que transmite la carga a la cimbra según la dirección del radio AI . Sucederá de la misma manera en las restantes zonas de la bóveda.

Disposición de las piezas y dimensiones

Según Perronet la disposición que considera más adecuada para las piezas principales de las armaduras

es la que se apoyan en los estribos y las pilas y escribe

La sección de bóveda $BCDE$ (fig. 4, fig. 1) que carga la cimbra, está representada por el segmento AM , que se puede descomponer en dos, un empuje horizontal MP , y otro vertical MO ; cada una de estas líneas expresa el valor de la fuerza que hay que dar a la pieza de madera que representa fuerzas cuya suma es mayor que la inicial (AM). La pieza MP y otras similares, al prolongarlas, encuentran puntos de apoyo en el lado opuesto de la bóveda, pero en el caso de las piezas verticales tales como MO habría que crearlos; esto sólo puede hacerse con muros o pilotes, que obstaculizarían el paso del agua y difícilmente llegarían a ser lo suficientemente sólidos en el caso de los arcos grandes. Estos inconvenientes suelen obligar a apuntalar las piezas inferiores contra los estribos o las pilas, según representa la línea MT . Para recibirlos se acostumbra a dejar piedras salientes o ménsulas cerca del arranque de los arcos; las armaduras y cimbras en las que los jabalcones o piezas inferiores están dispuestas de esta manera reciben el nombre de recogidas.

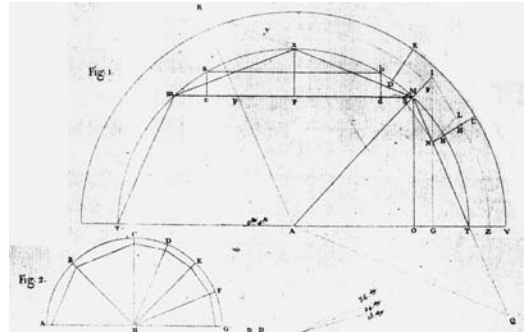


Figura 4
Trazado de una cimbra, fig. 1 y fig. 2

La construcción de ese tipo de armaduras, las recogidas, es más cómodo y la mayoría de las veces menos costoso que las que sitúan el punto de apoyo en zonas distintas a estribos y pilas, sin embargo su construcción requiere más pericia. Perronet se refiere a ellas en su memoria y no hace referencia a los otros tipos salvo para compararlos con éstas.

Las piezas horizontales mPM , que en las armaduras reciben el nombre de tirantes, se suelen situar a la altura de

45 grados para asegurar la bóveda en este punto, que es el que consideramos más débil; pero puesto que es preciso duplicar estos elementos para sujetar las dovelas del arco superior en xM , tal es el caso de las piezas ab , y sujetarlas por medio de otros elementos am y bM en ac y bd , que consumirían mucha madera, resulta preferible, y así lo he hecho en la práctica, colocar sólo un tirante, que se podrá reforzar si se considera necesario con una o dos piezas semejantes situadas inmediatamente por debajo, el resto de las dovelas se sujetarán con unas piezas denominadas pares, como las mX y MX , que se ensamblan en un pendolón PX (figura 4, fig.1), y soportan el peso de los camones C encargados de recibir los largueros de madera D y las dovelas E . Si se duplican en cada lado los jабalcones MT , y los pares MX , y se añaden los pilarejos A y los cepos B , todo ello ensamblado, enclavijado y asegurado con pernos, como se acostumbra hacer para unir y sujetar las piezas entre sí, obtendremos una armadura de cimbra recogida.

Perronet explica las ventajas de este tipo de construcciones como sigue:

La fuerza de las piezas TM y MX (fig. 4, fig. 1), representada por el segmento MA , que hace falta para soportar la sección de bóveda $BCDE$, se obtiene prolongando los lados hasta MQ y MR , con lo que se cierra el paralelogramo de fuerzas RQ ; la fuerza de las piezas TM y MP , necesaria para soportar el peso anterior, quedará representada por los segmentos homónimos, que son menores que los anteriores: con esta última disposición se pierde por tanto parte de la fuerza de los maderos, pero queda compensada con la ventaja que supone aproximar las piezas de la bóveda, como pasamos a explicar. En primer lugar, se utilizan menos maderos largos que cuando los puntos de apoyo están alejados de la circunferencia, puesto que en este último caso habría que prolongar las piezas, o bien añadir otras nuevas hasta estos puntos; y ello no eximiría a otros elementos de tener que estar inscritos en la circunferencia que hay que sujetar; y como se verá a continuación, el ahorro podría llevar incluso a suprimir los tirantes, puesto que se hallan aún más alejados de las bóvedas.

Para armaduras de arcos de grandes dimensiones, de más de 3 ó 4 toesas de luz, es necesario multiplicar el número de filas de piezas principales y adoptar una disposición triangular, que es la más estable cuando se cargan las cimbras asimétricamente, según se ve en la figura 6, fig. 5, para que se apuntalen mutuamente y sujeten en el centro a aquéllas que están cargadas perpendicularmente a sus fibras. La posi-

ción más favorable para las piezas encargadas de unir y sujetar las anteriores consiste en orientarlas hacia el centro de los arcos, de modo que, en la medida de lo posible, sean perpendiculares a las piezas principales.

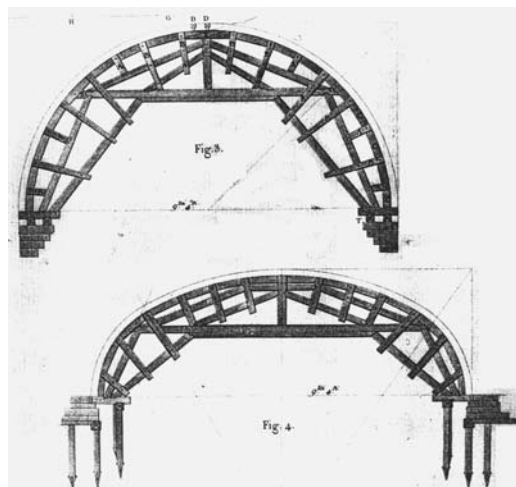


Figura 5
Armadura utilizada en la construcción del puente de Cher, fig. 3 y armadura del puente de l'Assise cerca de Tours, fig. 4

Las piezas de madera que denominamos camones forman entre sí ángulos menores cuanto mayor es su longitud: cuanto más se aproximen a la dirección del peso que actúa sobre su junta hacia el centro de la bóveda, serán más resistentes. Según esto (fig. 4, fig. 2) los camones AB y BC , correspondientes a ángulos de 45 grados, resistirán una carga aplicada en su encuentro B , según la dirección BH , mejor que las CD , DE , EF y FG , correspondientes a cuerdas de arcos de tan sólo 22 grados y 30 minutos, supuestas con la misma carga y también dirigida hacia el centro H , y haciendo abstracción del grueso de las piezas. Se procederá de la misma manera con el resto de los elementos principales de las armaduras que se han propuesto anteriormente, disponiendo cada una de las filas paralelas a las cuerdas, y formando triángulos entre sí; lo que obliga a que tengan la mayor longitud posible, igual que en el caso de los camones.

Los elementos más largos ofrecen las ventajas que se han comentado, pero también tienen menor resistencia. En la figura 6 explica la disposición de estos elementos como sigue:

En el caso de que las armaduras propuestas requieran utilizar maderos largos, bastará con corregir el último movimiento al que están sometidas, quedando todo arreglado. Para llevarlo a cabo habrá que arriostrar las piezas en uno o más puntos a lo largo de su longitud, separados a distancias aproximadamente iguales, que en general no superarán los 6 u 8 pies, como se ha hecho en la armadura de la figura 6, fig.5, en la que la pieza *Be*, de 14 pies de longitud, está sujeta en el centro, y la *eP*, que mide 26 pies, lo está en tres puntos; ello unido a los tirantes de los que vemos los extremos *I* y *z*, que atraviesan las armaduras y junto con los largueros se encargan de mantenerlas en posición vertical, impide que las piezas principales se curven de manera apreciable entre los cepos; lo que equivale a suponer que la fuerza longitudinal de los maderos es aproximadamente igual que si estuviesen divididos entre los cepos. Vemos igualmente que algunas de estos cepos, como los *ot* y *rf* también son necesarios para recibir el extremo de las piezas con las que se ensamblan, y que las *AB* y *de*, independientemente de que reciben dos filas de piezas similares, también sujetan en el punto medio las piezas *hc* y *cf*; en esta cimbra tan sólo quedan los cepos laterales *St* y *VX*, que no tienen otra función más que la comentada en este punto.

El grueso de las piezas, o la relación existente entre los lados de su sección, puesto que el grueso efectivo depende de la luz de los arcos, según Parent es aquella en la que el cuadrado de uno de los lados es el doble del otro; lo que equivale aproximadamente a una relación de 7 a 5. Las piezas que resultan son fáciles de arriostrar, ya que han de poder colocarse tan-

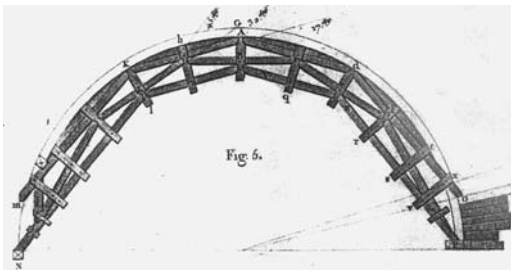


Figura 6
Construcción de las triangulaciones, fig 5

to de canto como de plano; Se deben utilizar los mismos gruesos y proporciones en todos los elementos principales, incluso en los camones: su recrecido se puede ajustar con unas piezas colocadas en la parte superior, que los carpinteros denominan cuernos de vaca y se realizará según se describe al hablar del ensamblaje de las armaduras. En cualquier caso, es conveniente aumentar en la parte inferior el grueso de los jabalcones y piezas que sostienen las cimbras. Los cepos deben ser cuadrados; el grueso de los que han de recibir los extremos de las piezas principales será igual que el lado menor de éstas; a los intermedios basta darles tres cuartos de esta dimensión.

Las bóvedas construidas exclusivamente con sillares, se sujetan mediante largueros situados en el centro de cada hilada de dovelas; aunque conviene que las piezas sean más altas que anchas, puesto que su resistencia se obtiene como producto del cuadrado de la altura por el ancho, es preferible que los largueros sean cuadrados porque al tener más base se mueven menos cuando se calzan y se apoyan las dovelas.

Para terminar de construir las armaduras, se colocan los tirantes, cuya función es unir y sujetar las armaduras entre sí en posición vertical. En esta situación las piezas han de resistir compresiones y tracciones de sus fibras, que siguen la dirección del empuje; bastará con dar a los tirantes el mismo grosor que a los cepos cuadrados que acabamos de mencionar.

ENSAMBLAJE DE PIEZAS

Las espigas y las muescas debilitan las maderas, por ello se deben suprimir ensamblando las piezas principales de las cerchas, denominadas pares, en varias hileras, uniendo unas a otras de tal forma que los extremos de una coincidan con el centro de los pares superiores, con los cuales formarán triángulos, que tendrán por base la longitud entera de un par y por lados dos medios pares de la fila superior. Las piezas principales deben estar arriostradas en el centro de su longitud así como en sus extremos y emprenadas.

En general, los cajeados se realizarán en los cepos que sirven para atar las piezas principales; tendrán sección circular de radio igual a la longitud de los pares, para que puedan recibir los extremos de las piezas principales conservando todas ellas su grosor, y solamente se redondearán con el radio de las cajas,

