

EUGENE FREYSSINET

Por JOSE ANTONIO FERNANDEZ ORDOÑEZ
Dr. Ingeniero de Caminos

La Dedicatoria, la solapa, el Prólogo y unas páginas del Capítulo III elegidas para su publicación en esta Revista, pertenecen al libro "EUGENE FREYSSINET" que está a punto de aparecer.

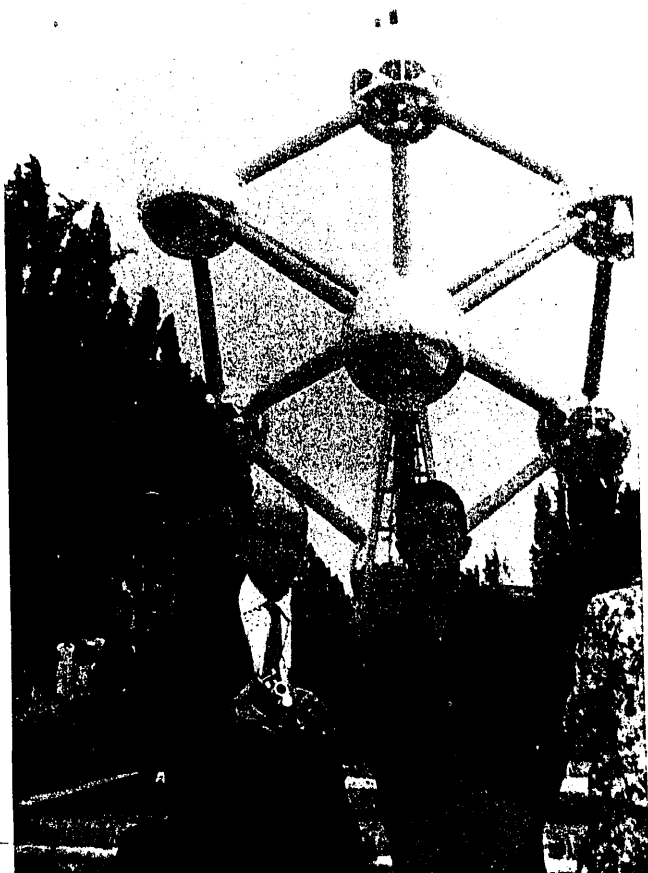
Aparte de la importancia técnica del libro, de la que son claros exponentes las páginas que publicamos —que constituyen una parcial exposición de la ingente obra llevada a cabo por

Freyssinet— queremos resaltar lo interesante del prólogo, y lo emotivo de la Dedicatoria al padre del autor, gran continuador en España de dicha obra, don Francisco Fernández Conde, preclaro ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.

La Revista se honra en publicarlas, con la firma de su hijo, que es, hace ya tiempo, una autoridad en la materia.

A mi padre, ingeniero y maestro:

Estás ahí, el tiempo no te ha borrado



Francisco Fernández Conde con su hijo, el autor del libro,
José Antonio Fernández Ordóñez

PROLOGO

Mi padre, ingeniero de Caminos, esa uno de esos rares sprits a quien Eugenio Freyssinet respetaba y con quien mantenía una relación de mutua simpatía. Cuando en junio de 1962 muere súbitamente Freyssinet, mi padre, impresionado por tan inesperada noticia, me animó a escribir la extraordinaria historia de su vida y su obra, del nacimiento del pretensado. Fue mi padre quien me transmitió la admiración por aquel ingeniero sinpar, del que sólo conservo en la memoria la emoción de una imagen (mi padre y Freyssinet —ambos con cierto parecido físico— conversando en un cuarto lleno de planos y papeles, en un palacete parisino del distrito XVI convertido en oficinas). Yves Guyon, discípulo querido de Freyssinet, era testigo ocasional; su muerte le ha impedido escribir el prólogo de este libro, tal como me había prometido. Cuando Guyon venía a Madrid, se acercaba siempre al despacho de mi padre. Allí hablábamos de ingeniería, de presentado, de prefabricación y de Freyssinet. Cuando en el verano de 1959 terminé mi carrera de ingeniero de Caminos, Freyssinet cumplía sus ochenta años, y los nombres del Veurdre, Plougastel o Luzancy me eran ya familiares. Mi padre me introdujo en el hermético mundo de Freyssinet: Su propia viuda, Mme. Jeanne Freyssinet, M. Burgeat (de quien Freyssinet dijo nada menos que era la persona que más había hecho en el mundo por la difusión del pretensado), M. Lebelle, M. Breffeil, M. Seailles, M. Chaudesaigues, M. Lemoine, M. Worontzoff, M. Brice y tantos otros buenos amigos y colaboradores de Freyssinet a quienes debo ayuda y datos sin los que este libro no hubiera visto la luz.

Eugenio Freyssinet nació en 1879, justamente un siglo después de finalizarse el primer puente de hierro que se construyó en el mundo, el primer puente moderno. Su histórica patente del pretensado de octubre de 1928, se registra un siglo después de

aquella otra no menos trascendente de octubre de 1824 en la que Aspdin denominaba **Portland cement** a un aglomerante hidráulico que cambiaría la faz de la tierra en el último siglo y medio. Su biografía está ligada a la de los pioneros. En cierto modo, él es también un pionero: en Freyssinet todavía no se separan la ingeniería científica y la práctica. Es capaz de acercarse a los misterios del hormigón con la capacidad de abstracción de un gran científico y al mismo tiempo resolver, con la sencillez y elegancia de un artesano viejo, los problemas constructivos más diversos con soluciones tan definitivas que, después de setenta años, siguen siendo utilizadas por todos los constructores del mundo. Su genial invento del pretensado, fruto estricto de su imaginación, de su coraje y de su esfuerzo, le elevará para siempre al primer puesto de la Ingeniería Civil en la historia de la construcción. Sólo la aparición del arco es comparable en importancia al invento de Freyssinet, y en cierto modo semejante, ya que ambos son artificios mediante los cuales la materia se vence a sí misma.

En ningún ingeniero se funden, como en Freyssinet, la teoría y la práctica, la imaginación y la decisión, la fertilidad y la profundidad, el arte y la técnica. Es el último de los grandes ingenieros de la edad heroica. Cierra brillantemente con el puente de Plougastei el primer siglo del hormigón armado, y al mismo tiempo abre la nueva época del hormigón, unida ya indiscutiblemente al pretensado. Pero la fama se equivoca a veces de dirección. Su obra, hasta ahora, ha permanecido oculta en favor de las de otros grandes ingenieros, notoriamente inferiores.

Freyssinet tiene gran parte de culpa del olvido en que se encuentra su obra. Hay razones que pueden justificar la increíble falta de interés alrededor de su obra, y en primer lugar su orgullo, que le llevó a enfrentarse por adelantado a los que, tarde o temprano, estudiarían su vida y su obra: "La curiosidad por las personas es un vicio de nuestra época que juzgo deplorable. No teniendo esperanzas de corregirlo, y detestando que se hagan correr acerca de mí versiones falsas, he decidido cortar las alas a ciertos canards explicando yo mismo qué influencias me han formado, qué personas me han ayudado y qué es lo que desearía hacer aún, antes de desaparecer".

Ciertamente, Freyssinet escribió —a retazos— sus propias, pequeñas e inigualables memorias, pero no habló de sí mismo y de su obra como para sobrevivir a la ignorancia de los hombres, a la indiferencia o indolencia de ingenieros y críticos. Su obra va más allá de su propio pensamiento. Además, sus numerosos textos andaban desperdigados y perdidos en cientos de publicaciones, algunas ya desaparecidas, y su obra fecunda y diversa a lo largo de 55 años de intenso trabajo profesional, seguía desconocida por la mayoría de los ingenieros y estudiosos de todo el mundo, ignorada por los estudiantes de ingeniería y arquitectura que hablan con familiaridad de Perret, Nervi o Le Corbusier e ignoran al más grande

constructor de todos los tiempos. Era necesario, pues, para comprender esta personalidad tan sencilla y al mismo tiempo tan fuerte y tan rica, llegar a todos los que le rodearon, acercarse a sus construcciones y estudiarlas con atención, recorrer su infancia, sus antepasados, el paisaje que le vio nacer; porque toda su obra es consecuencia de su actitud ética ante la vida, nacida desde su niñez del orgullo de su origen aldeano y del amor a las tradiciones artesanas de sus mayores, reflejo de una herencia que dejaría profunda huella en su estilo y que haría inconfundibles sus obras.

Freyssinet universalizó el hormigón. Lo aplicó a las más variadas construcciones, formas y necesidades. Descubrió las técnicas fundamentales para su utilización. Inventó los principales sistemas de su empleo. Investigó sus cualidades internas y experimentó y perfeccionó la técnica del hormigón hasta límites hoy no superados todavía. Su figura se irá agigantando con el tiempo. De un material tosco, basto y pesado tal como el hormigón era empleado antes de él, construyó cubiertas de hangares, grandes bóvedas y puentes que eran, hasta entonces, propiedad privada de las estructuras metálicas. Después del pretensado, la difusión internacional del hormigón es el mayor legado que los constructores le adeudan.

Hasta Freyssinet, el hormigón (armado o sin armar) no era mucho más que el usado por los romanos hace veinte siglos. Gracias a él, el hormigón da un gran salto, supera el escalón histórico más importante en la eterna conquista de la ligereza, de la sustitución de la cantidad por la calidad.

El ingeniero dispone hoy de una nueva fuerza capaz de imponer su voluntad a la materia: utilizar el pretensado es, como decía él, un acto de voluntad, una decisión exclusivamente moral. Con el pretensado, Freyssinet transforma el hormigón en un material noble y duradero, capaz de deformarse elásticamente y dotado de una completa reversibilidad. El único sistema de hormigón que vale ya es la **probité technique** que hace que cada obra marque un progreso sobre los precedentes. Desaparecido Freyssinet, la técnica de la ingeniería del hormigón ha ido adquiriendo, tras sus huellas, una mayor perfección, poco creativa y en cierto modo esterilizante.

Cuanto más se estudia su obra, más admirable aparece la abundancia de su ingenio y la capacidad de realizar en la práctica lo que su inteligencia imaginaba, ya fuera el puente más grande del mundo, una pequeña cuña de anclaje o el desplazamiento de 500.000 Tn. de roca. Como Leonardo, tenía un espíritu tan elevado que nunca se conformaba con lo que hacía. El se consideraba un intuitivo, bien entendido "una intuición controlada por la experiencia", un superviviente de una raza de artesanos, mucho menos sometido a su razón que a los impulsos del subconsciente. Sabía que no alcanzaría sus deseos sin riesgo; por ello nunca buscó los atajos y anduvo todo su camino. A través de este camino, Freyssinet encontró la belleza y sin

saberlo, *secretamente*, fue un artista verdadero.

Este es un libro con tres posibilidades de lectura: el texto simplemente para el lector profano; el texto con sus notas de final de cada capítulo para el lector con estudioso; o bien el texto, las notas y los anexos finales que permitirán comprender al estudiante de Ingeniería o Arquitectura, al crítico y a cualquier lector más profundamente interesado, los datos de proyecto y constructivos a un nivel más técnico.

Me ha parecido obligado, no sólo como muestra de respeto a Freyssinet, sino por la claridad y precisión de sus palabras, introducir en el libro los que —a mi entender— son sus mejores textos originales, como si de una antología se tratase. No sé si habré abusado del lector en este sentido, pero he tenido un especial cuidado en no adulterar en nada el pensamiento de Freyssinet y el espíritu que le animaba. Sólo he querido omitir datos inútiles que hubieran destruido la emoción del conjunto. Tengo la certeza de haber expresado, de forma tan nítida como me ha sido posible, la fertilidad de sus invenciones, la fecundidad y originalidad de su obra, la honradez de su espíritu de artista y creador, como un ejemplo permanente para todos los que todavía aspiramos a ejercer una ingeniería que no renuncie nunca a soñar hacia adelante, la única cualidad honrosa de todos los hombres.

Escribí este libro a lo largo de quince años de trabajo íntimo y reconciliador; por esta razón es posible que resulte inconexo, pero así es la verdad. A cambio, una pasión permanente lo preside: el amor y la admiración hacia una obra tan inmensa, hermosa, profunda y revolucionaria que no admite paralelo ni comparación con la de ningún otro constructor de la historia. Con él, ha desaparecido el último de los grandes, el mundo de la ingeniería ha quedado huérfano. Freyssinet llevó el hormigón armado, nacido a mediados del siglo XIX, al límite de sus posibilidades con las soluciones más grandes, técnicas, universales y hermosas que nunca se construyeron con este material. Pero tuvo la inspiración y la lucidez para darse cuenta de que aquella vía estaba cerrada. Y mientras Maillart, Torroja, Nervi y tantos otros seguían construyendo en hormigón armado convencidos todavía de su gran futuro, Freyssinet, a los 50 años, en la cumbre indiscutible de la ingeniería mundial del hormigón, lo abandona todo y se lanza a una de las aventuras más épicas y hermosas de la historia de la construcción: el largo y dramático camino de cinco años que le llevó al triunfo final del pretensado.

Yo estaba hacia tiempo resignado a no publicar un libro del que no estaba suficientemente satisfecho, lo que para mí era una constante angustia, una deuda moral que no había pagado ni a mi padre —ya desaparecido— ni a Mme. Freyssinet. Miguel Aguiló, joven y brillante ingeniero de Caminos, por quien siento tanta admiración como afecto —de la estirpe de Freyssinet— me convenció de la necesidad de publicar el libro. Miguel Aguiló, que hace diez años trabaja conmigo, me ordenó las montañas de planos, fotografías, artículos, libros, cartas y papeles que había ido recogiendo a lo largo

de los años, se sentó a mi lado y me obligó a lo que me parecía imposible: rematar este libro.

Reconozco aquí que sin su entusiasmo, acompañado siempre de una voluntad inteligente, habrían pasado otros quince años sobre mi manuscrito. Además, Aguiló ha redactado con gran sobriedad, los anexos A y B recogiendo cronológicamente —con el espíritu atento, reflexivo y crítico que le caracteriza— los aspectos más técnicos de todas las obras de Freyssinet, con un análisis tan cerca siempre de la valoración del detalle como de la desestimación del tópico.

Y, por último, agradezco a María Luisa (mi mujer) y a mi hermano Carlos, su paciencia al acompañarme durante el verano de 1965 en mi larga peregrinación por toda Francia, de puente en puente, tras las huellas de Eugenio Freyssinet, con la vehemencia de quien no ha cesado de buscar, en la expresión del ingeniero, el fondo común humano, que es eterno.

Madrid, febrero 1978

Fragmento del Capítulo III

“En este momento clave de su vida vale la pena hacer un pequeño análisis de los principales inventos y avances técnicos que la obra de Freyssinet había aportado en esta primera etapa de su carrera profesional y que serían el sustento de toda su obra posterior (42).

Su primer invento en 1900, durante su servicio militar, fué la *traille* que lleva desde entonces su nombre en el Ejército francés (43). Se trataba de una barcaza unida a un cable tendido por encima del río y que hacía las veces de pontón.

El descimbramiento por gatos en, 1907, es el invento más decisivo de su juventud. Aparte de los

(42) En este análisis sigo principalmente las huellas de la ejemplar exposición, concisa y clara, que M. Lebellet hizo en el homenaje a su maestro el 21 de mayo de 1954 (Travaux-Paris. Agosto 1954). M. Lebellet, ingeniero politécnico, conocía bien a Freyssinet y por ello es interesante transcribir algunos párrafos de una carta que me envió el 5 de julio de 1965, donde le recordaba especialmente. “M. Freyssinet era, ante todo, un encarnizado trabajador, muy exigente consigo mismo y que no dudaba nunca en recomenzar incluso varias veces un estudio arduo cuando los resultados obtenidos no le satisfacían plenamente. Era plenamente consciente de las cualidades excepcionales que tenía y de sus aportaciones considerables al arte de construir. De ello resultaba un orgullo que nadie juzgaba fuera de lugar. Era a veces violento en las discusiones y no dudaba en emplear vivos términos, incluso desconsiderados, sin guardar recuerdo alguno. Pretendía no tener memoria. Olvidaba, en efecto, bastante fácilmente los nombres de sus colaboradores. En realidad, poseía una memoria fiel, pero extremadamente selectiva, que le permitía decir exactamente en 1960 cómo se había desarrollado la primera operación de descimbramiento por gatos actuando en clave, realizada sobre el puente de Praireals-sur-Besbre en 1907. Lo que caracterizaba la manera de trabajar de M. Freyssinet era su cuidado constante de la perfecta puesta a punto de todos los detalles de las construcciones que él proyectaba. Era frecuente que, sin acabar un croquis que había comenzado, le venía una idea nueva que sustituía a la que estaba desarrollando.

Para mí, que le he conocido bien y que he tenido relación con muy numerosas personalidades de todo el mundo de la construcción, desde hace 35 años, M. Freyssinet es, de muy lejos, el mejor y el más fértil inventor que he conocido. La obra de M. Freyssinet para mí más notable es el puente de Plougastel. Cuando una experiencia, largamente preparada, no daba el resultado esperado, M. Freyssinet decía: “las experiencias más interesantes son las que no triunfan”.

(43) Ver Cap. I.

EUGENE FREYSSINET

premios y honores que le supuso, el descimbramiento de arcos por creación directa de empujes era un gran paso adelante en la historia de las estructuras, que adquiriría de inmediato carácter universal. Es un descubrimiento que lleva la semilla de una idea genial que al cabo de 20 años dará como fruto real el pretensado.

Todo comienza en el Veurdre, donde este joven ingeniero de veintisiete años emplea bóvedas de un rebajamiento inusitado e imagina, para su uso exclusivo, y porque la cimbra que había concebido se lo imponía, el descimbramiento por gatos, es decir, la creación deliberada de deformaciones y de esfuerzos previos.

Ahora bien, esta obra que parece perfectamente lograda, da al cabo de dos años signos de debilitamiento, precursores de una catástrofe. Como Freyssinet consiguió detener el movimiento y volver a dar a las bóvedas su configuración inicial, él mismo lo ha contado, y además fue una de las circunstancias en las que hizo prueba de más valor; pues se trataba simultáneamente de comprender un fenómeno desconocido, y de aportar inmediatamente el remedio.

Pero este accidente ha sido un feliz punto de partida. Pues ha sido el descubrimiento de las deformaciones diferidas. Sobre el mismo Veurdre, el gato —gracias a la reelevación operada— hallado a ser algo más que un instrumento de descimbramiento: se ha convertido en un instrumento de reglaje de deformaciones, que ha conseguido domar las que eran nocivas. A partir de este momento el mecanismo de su pensamiento se ha puesto en marcha.

Mientras que las realizaciones se suceden y afirman su maestría mayor, la idea-fuerza se alimenta a través de ellas. Es necesario llegar a reglar toda la carga, y no pudiendo ser soportada más que por bóvedas, es necesario aumentar los empujes para rebajar estas bóvedas más allá de sus formas naturales para inscribirlas a su voluntad en espacios restringidos, crear por gatos curvas de presión suficientemente tensas para que queden en la materia y hagan imposible la fisuración. Es necesario forzar la materia a obedecer, es necesario obtener la permanencia de las tensiones que se le han impuesto.

Esta idea, la del Pretensado, terminó por llegar a ser en Eugenio Freyssinet la esencia misma del subconsciente; nada podrá en adelante impedirle brotar" (44).

El descimbramiento de arcos por medio de gatos, lo empleará Freyssinet en lo sucesivo en todas sus bóvedas. Pudo así economizar en cimbras, y sin embargo hacer éstas muy resistentes a las avenidas de los ríos, formadas por pies derechos y tornapuntas, sólidamente unidas a los pilotes portantes. En aquellas bóvedas tan rebajadas no era posible sin peligro descimbrar por procedimientos clásicos como el de las cajas de arena. La solución

(44) M. Ives Guyon. "Commemoration Eugène Freyssinet 1963".
Chambre Syndicale Nationale des Constructeurs en Ciment Armé et Béton Précontraint.

era descimbrar por medio de gatos, levantando el arco, creando empujes adicionales en la clave. Lo genial de Freyssinet fue no sólo su descubrimiento teórico sino su aplicación inmediata en el puente del Veurdre y en el Boutiron, cuando aquellos arcos tan rebajados amenazaban ruina.

Es ésta una cualidad inherente a su obra, a su forma de vivir. Tras años y años de enormes dudas, meditaciones, meticolosos ensayos y vacilaciones, en el momento preciso Freyssinet actúa con decisiones arrebatadoras, donde por encima de la reflexión de largos años surge como un latigazo la intuición del artesano viejo que le conduce directamente a las soluciones más geniales, donde no se sabe qué es más grande si el valor o el amor al riesgo.

Concepto muy similar al descimbramiento por gatos, es la puesta en tensión de los tirantes de las bóvedas de cubiertas en naves industriales, operación que ideó igualmente Freyssinet y utilizó en numerosas ocasiones y que tiene además la ventaja de facilitar el descimbramiento, la de compensar los efectos de la retracción y permitir la utilización de aceros bajo tensiones elevadas, ventajas todas ellas decisivas en grandes luces (45).

Hablando a los jóvenes en 1954, Freyssinet decía minimizando su descubrimiento: "en presencia de bóvedas muy rebajadas, cuyo acortamiento por retracción era forzoso prever ¿era tan difícil pensar que acompañarían a la cimbra y se vendrían abajo si no se las apretara fuertemente contra sus estribos?. Es una idea natural para todo carpintero de obra, que sabe por tradición tensar un tensor por medio de cuñas. Yo reemplacé las cuñas por gatos, que son más potentes y más cómodos; y llevé el esfuerzo hasta el valor necesario para descimbrar, lo que simplificaba mis cimbras y las hacía menos vulnerables a las avenidas. ¿Dónde está el genio en todo eso? Es trabajo de artesano. ¿No lo había hecho nadie antes que yo? Antes y después. A lo sumo, todo eso justificaba apenas un ensayo. Como no me gusta correr riesgos sin necesidad, hice ese ensayo. Pero si, después de haber demostrado que un determinado dispositivo era bueno y útil, yo hubiera vacilado en emplearlo con la excusa de que no se había usado antes, me habría considerado como el último de los cobardes" (46).

(45) Al hablar del descimbramiento por gatos, se lamenta Lebellet de que el gran Timoschemko, al describir este método en dos de sus obras más célebres consagradas a la resistencia de materiales y a la teoría de estructuras, confunda el principio de reglaje con la idea de pretensado. El hecho de ser éste el único procedimiento francés que cita el gran profesor en sus libros demuestra el desdén que sigue mostrando en general la técnica de ingeniería civil anglo-germana hacia la francesa, siendo ésta una de las razones que han contribuido al silencio que durante tantos años ha rodeado el nombre, la persona y la obra de Freyssinet.

(46) El ensayo al que se refiere Freyssinet es un arco de 50 m. de luz y 2 m. de flecha que hizo construir —y se conserva todavía— en la Gare de Merchandises de Moulins; de él hablé ya en el Capítulo II, con una explicación detallada del propio Freyssinet. "El tirante de esta bóveda — dice Lebellet — era un prisma de hormigón atravesado en sentido longitudinal por 1.200 hilos de 10 mm., no adheridos al hormigón, tensados por pares, apoyados contra él y anclados por medio de cuñas metálicas. Bajo la acción de cargas puestas en juego en el curso de los ensayos, el hormigón de este tirante permanecía siempre comprimido. La pieza, así realizada, era pues —de hecho— la primera obra de hormigón pretensado, en el sentido que Freyssinet ha dado a esta expresión".

EUGENE FREYSSINET

Las tensiones del hormigón que se obtenían en las bóvedas de Freyssinet no eran admisibles de acuerdo con el reglamento de 1906, más que a condición de zunchar el hormigón. Para las secciones rectangulares, muy oblongas, los zunchos helicoidales no iban bien. De ahí que diseñara en 1910 unos nuevos zunchos en forma de sinusoides y las propias máquinas que permitían fabricarlos económicamente.

No zunchado, el hormigón es un cuerpo muy frágil; el margen de plasticidad entre su límite de elasticidad y su límite de ruptura a la tracción es muy débil (47). El problema del zunchado del hormigón está íntimamente ligado a la resistencia de los hormigones y los medios para aumentarla, tema que fué una obsesión constante en las sucesivas obras de Freyssinet, y al que dedicó gran parte de sus investigaciones. En efecto, en 1910, cuando un hormigón con una resistencia a rotura de 200 kgs./cm.² era considerado como muy satisfactorio, él estaba consiguiendo hormigones de 500 kgs./cm.², con una densidad de 2,35 Tn. por m.³, "buscando la máxima compacidad, introduciendo en el volumen dado la más grande cantidad posible de agregados y, en los intersticios de este modo mínimos, la pasta de cemento lo más compacta posible" (48). Y en 1930, escribía que "resistencias de 2.000 kgs./cm.² me parecen perfectamente realizables hoy día.

Desde Considerare se venía estudiando el aumento de resistencia conseguido con el zunchado. Pero Freyssinet es el primero en darse cuenta que el zunchado helicoidal es peor —sobre todo en secciones no circulares— que un sistema de armaduras transversales consistente en armaduras en planos normales a las presiones formadas de dos series, perpendiculares entre sí, de hilos sensiblemente paralelos y enlazados por elementos en semicírculo. Freyssinet emplea este tipo de zunchado en casi todas sus obras y especialmente cuando realiza sus articulaciones de bóvedas muy rebajadas, sometidas desde 1912 a presiones medias de servicio de 250 kgs./cm.². En resumen, pensaba que en los puentes de hormigón bien concebidos, cualquiera que fuera su luz, la armadura longitudinal debería permanecer siempre como algo secundario.

Cuando más adelante, inventa el cono de anclaje de las armaduras de hormigón pretensado, vuelve a usar este tipo de zuncho sinusoidal para armar la zona de hormigón de transmisión de los esfuerzos de pretensado.

Bien conocidas en el mundo de la ingeniería civil, donde todavía se usan con largueza, las articulaciones llamadas "Freyssinet" en homenaje a su inventor, son de tipo plástico y en ellas Freyssinet hacía trabajar al hormigón a tensiones insólitas en su época. Sin embargo el hormigón no podía romper sin pandear al estar muy fuertemente zunchado

La primera vez que se utilizaron estas articulaciones fue en el puente de Boutiron en 1911. En aquellos años las articulaciones convencionales estaban formadas por dos superficies cilíndricas en piedra u hormigón con radios de curvatura muy semejante. En el puente del Veudre Freyssinet las ejecutó de este tipo en mortero rico provisto de una fuerte armadura transversal. En la práctica, estas articulaciones eran de difícil construcción y reglaje y los intersticios entre las dos superficies se llenan de fangos, desperdicios o limos alterando su funcionamiento. De ahí que Freyssinet concibiera mejorarlas, lo que supuso, como siempre sucedía cuando afrontaba un problema, la creación de una articulación basada en un nuevo concepto (49).

Estas articulaciones Freyssinet no deben confundirse con las articulaciones de barras de armadura llamadas **Mesnager**, capaces de transmitir una reacción mucho más pequeña. En la articulación de Freyssinet la armadura tiene por objeto absorber eficazmente los esfuerzos de tracción desarrollados en el hormigón por el punzonamiento muto de las dos semiarticulaciones. La armadura paralela a las compresiones tiene sólo por objeto evitar la separación accidental de las dos semiarticulaciones durante la ejecución de los arcos, y no un carácter resistente como en la articulación **Mesnager**, en la que se crean graves problemas secundarios y posibles fisuraciones por falta de acoplamiento en el trabajo a compresión entre el hormigón y el acero longitudinal. En el puente Candelier, Freyssinet transmitía con sus articulaciones 700 Tn. por metro lineal.

Freyssinet vió, ya en sus primeras obras, los inconvenientes, a veces graves, que tenían las cimbras de madera construidas por procedimientos tradicionales: su excesiva rigidez, su enorme costo cuando las luces de los arcos sobrepasaban las normales, la dificultad de encontrar carpinteros especialistas en este tipo de estructuras. Las cimbras, como los demás elementos auxiliares de la obra, fueron siempre objeto primordial de su dedicación. El era un constructor integral y, por tanto,

(49) En 1923, Freyssinet publica en "Annales de Ponts et Chaussées" un artículo con la descripción del Puente Candelier sobre el Sambre, donde explica el funcionamiento de estas articulaciones. Se trata de poner en contacto dos masas de hormigón, fuertemente armadas en ambas direcciones de un plano perpendicular a la compresión principal, por medio de una zona central de pequeño espesor realizada con el mismo hormigón y sin armadura. Cuando las masas principales sufren un giro relativo, la zona central, de pequeño espesor y sometida a fuertes tensiones de compresión, se comporta como "una masa líquida contenida en una envoltura inextensible, sin presentar nunca discontinuidades ni síntomas de desorden".

El espesor de la parte central debe ser lo más pequeño posible —Freyssinet señala de uno a dos centímetros— y la superficie de contacto con las masas principales se dimensiona "adoptando como presión media la tensión de rotura del hormigón sin armar. La separación de la línea teórica de empuje nunca es superior a un sexto de anchura de la zona central, con lo que las articulaciones de este tipo funcionan prácticamente como articulaciones teóricas.

La armadura de las masas principales tiene por misión absorber los esfuerzos de punzonamiento provocados por la zona central. Las armaduras que atraviesan la articulación tienen pues una misión exclusivamente constructiva y para evitar esfuerzos accidentales y no intervienen en el cálculo.

(47) "Eugene Freyssinet", por J. R. Robinson.
"Annales des Ponts et Chaussées", julio-agosto, 1963.
(48) Ver (3.47).

EUGENE FREYSSINET

cuando creaba una obra no se limitaba a proyectarla **acabada**, sino que diseñaba personalmente todos los elementos necesarios para su construcción. El plan de obra, la manera de la obra, su proceso, su realización; he aquí lo que distingue a los verdaderos constructores de los meros proyectistas.

"El clavo, viejo medio de unión de la construcción naval, no había sido prácticamente utilizado en estructuras de madera, en cimbras. Eugenio Freyssinet imagina emplearlo en su forma de simple punta con cabeza plana (tal como se vende en el comercio) para ensamblar elementos finos de madera, los menos costosos, tablones y tableros. Una mano de obra inteligente, entrenada en pocas horas, puede con el clavo realizar rápidamente ensambladuras muy superiores a las de la carpintería tradicional, que requieren carpinteros experimentados. De hecho había sido creada una modalidad esencial de las estructuras de madera" (50).

Habitualmente las cimbras se construían de madera ensamblada por medio de bulones. Freyssinet comenzó a utilizar planchas o tiras flexibles de madera, en número variable según los esfuerzos, que rigidizaba por medio de clavos. Con ello evitaba los graves problemas de las uniones por bulones, en las que los agujeros para los mismos se ovalizaban siempre, variando la presión entre dos elementos con las alternativas de retracción o al hincharse la madera, constituyendo entramados sujetos a deformaciones a veces muy importantes. El elemento fundamental de sus cimbras era el mástil (bigue) en forma de prisma de sección triangular variable constituido por tres nervios principales que marcan la forma del huso, rigidizados entre ellos por diagonales en los tres planos. Los cabrios del andarivel de Plougastel son otro magnífico ejemplo de este tipo de mástiles.

Este procedimiento de cimbras de madera que ideó Freyssinet, conocido con el nombre de **charpentes clouées**, le permitía realizar sus obras más conocidas, los hangares de Orly y las bóvedas de Plougastel. En este último puente, y para el hormigonado de sus tres arcos idénticos, proyectó una inmensa cimbra-arco de 150 m. de luz, construyéndola en una orilla y trasladándola flotando sobre dos barcas sucesivamente a cada uno de los arcos.

Cuando fue reconstruido el arco destruido en la segunda guerra mundial, 20 años después de su construcción, no se encontró mejor técnica ni más moderna forma de hormigonado que reproducir exactamente la misma cimbra e idéntico proceso que ideara Freyssinet.

La cimbra de Plougastel sigue ocupando hoy el primer lugar entre las estructuras de madera de todos los tiempos, difícil de superar por su técnica genial, su grandiosa belleza y su audacia razonada. "Tan osadas, sin embargo, serían las cimbras de los puentes en arco de la autopista de

(50) Ver (3.47).

Caracas, en Venezuela, si no hubieran sido construídas en tierra. Allí, en 1950, Freyssinet perfeccionó más su técnica de la estructura de madera clavada. A las tablas serradas se asocian tableros contrachapados. La idéntica resistencia de estos últimos en todas las direcciones, les permite funcionar como cartelas de unión. Las formas de las cimbras, de una gran esbeltez, se acercan a las de las estructuras metálicas" (51).

Preocupado siempre por la economía y rapidez de las obras, en 1916 Freyssinet idea el sistema de una cimbra desplazable horizontalmente, paralela a sí misma. La utilización de estas cimbras y encofrados deslizantes permitiría un gran desarrollo a la construcción de naves abovedadas de hormigón.

Ripando una sola pieza, se sustituye una enorme y costosa cimbra. Pero ello no sería posible sin un desencofrado rápido y sencillo que deje la cimbra intacta e inmediatamente utilizable. Por medio de un reglaje a base de deformar transversalmente los tirantes, formados por parejas de hilos o cables, Freyssinet facilitaba el descimbramiento, compensaba los efectos de la retracción y además permitía la utilización de aceros de alta tensión con su consiguiente economía. Con este ingenioso detalle constructivo, que puede considerarse como otra nueva utilización anticipada del pretensado, conseguía llevar a la práctica el concepto de las cimbras deslizantes.

El principio de cimbra única desplazándose horizontalmente había sido ya aplicado por Saint-Benezet en el puente de Avignon. Sólo la perfección técnica con que Freyssinet utilizó esta idea, la hizo universal a partir de sus primeras bóvedas, y sobre todo cuando construyó los hangares de Orly en 1921, cuya cimbra, movida sobre railes, sólo tenía la anchura de una onda de su sección plegada, hormigonándose a un ritmo de un anillo por semana.

Durante la primera guerra mundial, Freyssinet, capitán de Ingenieros, tuvo ocasión de construir numerosas barcasas y gabarras de hormigón armado que se lanzaban de través, así como de inventar una gran cureña o batea para un mortero de 305 mm. enyesada con éxito bajo 8.000 disparos. Estas construcciones, de paredes muy finas, presentaban grandes dificultades en su hormigonado. Para solucionar este problema, en 1917 idea y aplica por vez primera el que sería decisivo invento de la vibración mecánica del hormigón. Al principio utiliza los bastos vibradores empleados desde hacía tiempo en las cimentaciones. Sin dejar de investigar nuevas formas de vibración y de perfeccionar nuevos métodos en cada una de sus obras, en pocos años, Freyssinet transformó la vibración del hormigón en una técnica mundial, que pertenece ya sin discusión al acervo común de todos los constructores. Fue en Orly donde aplicó esta técnica de un modo ya masivo a todas las mezclas de hormigón. La primera patente de la vibración del hormigón fue registrada por la Sociedad Limousin en 1917. La intención era

(51) Ver (3.47).

“utilizar morteros muy fluidos para hormigonar entre armaduras complicadas, eliminando por vibración el exceso de agua” (52).

Su procedimiento de hormigonar, encofrar y descimbrar le exigían una mayor rapidez en el endurecimiento del hormigón. “¿Mi descubrimiento del método de endurecimiento rápido de los hormigones? —se preguntaba Freyssinet— ¿Era preciso ser tan lince para notar que, reduciendo de cien a uno el valor de los intersticios entre partículas, al comenzar el fraguado, se reduciría en una proporción del mismo orden el volumen de los hidratos necesarios para asegurar el endurecimiento, y también, que se disminuiría el tiempo requerido para su formación? Y observad que yo tenía el antecedente y el ejemplo de las juntas calafateadas, de las baldosas de cemento comprimido, y de los enlucidos alisados con el fretacho. Estas ideas pueden parecer asombrosas a un matemático que no ve la naturaleza más que a través de una nube de *x* o de *y*; pero, creedme, eran muy sencillas para un artesano que siente la materia con sus dedos y que, con sus propias manos, ha calafateado juntas y alisado revoques”. Freyssinet quiere, con estas palabras, transmitir su espíritu de constructor a los jóvenes que le escuchaban durante una conferencia en 1954; mostrarles cómo sus descubrimientos geniales son fruto de una experiencia adquirida desde la base y de una entrega total a su trabajo, no de una inteligencia excepcional (53).

Una de las razones que contribuyeron más al desarrollo de las bóvedas de hormigón armado en el período de entreguerras fue un descubrimiento muy simple de Freyssinet de 1913: colocar por encima de las bóvedas —no por debajo como era habitual— los arcos formeros, formando bóvedas con nervios

(52) “Influence de la quantité d'eau de gachage sur la qualité des betons examinée du point de vue des chantiers”, E. Freyssinet, “Le Génie Civil”, 21 de julio de 1928.

“Los constructores de fin de siglo XIX no pudieron realizar *tours de force* como las grandes bóvedas de Tourtay o Séjourné más que evitando con cuidado el exceso de humedad de sus morteros, a fin de permitir la compresión por ajuste directo. No valiendo, ni de lejos, sus aglomerantes lo que los actuales, estaban obligados a emplearlos en condiciones de realizar su resistencia máxima y, por otra parte, no sabían obtener morteros compactos a partir de mezclas líquidas.

Fueron los utilizadores del hormigón armado los que imaginaron los medios de eliminar las enojosas consecuencias de los excesos de agua, en lo que concierne a las resistencias. Observaron empíricamente, en efecto, que golpeando los moldes a golpes de martillo, se provocaba la decantación del agua en exceso y su salida por las juntas de encofrado. Consideró fue el primero en establecer, por experiencias precisas, desde el principio de sus estudios sobre el zunchado, que se podía emplear un gran exceso de agua como vehículo del hormigón a través de armaduras complicadas, sin perjudicar las resistencias obtenidas, a condición de eliminar dicho exceso de agua. Consideró provocaba la decantación a golpes siguiendo el procedimiento normal en las obras, y terminaba de absorber el agua con una capa de mortero seco que podía apisonar”.

El problema del exceso o la falta de agua en mezclas muy armadas fue un tema sobre el que Freyssinet reflexionó mucho desde que terminó su carrera de ingeniero, ya que estaba íntimamente ligado al de las resistencias elevadas de los hormigones, asunto primordial para él desde que se planteó realizar en 1907 el puente del Veurdre, primero de la serie de tres puentes sobre el Allier, con una luz de 72,50 m. y un rebajamiento cercano a 1/15 inusitado en aquella época. Su invento de la vibración fue el resultado de esas meditaciones y experiencias, probando desde los procedimientos de centrifugación hasta los de mesas vibrantes pasando por los de vibración neumática o eléctrica.

(53) “Para hacer lo que he hecho no he necesitado, en ningún momento, una inteligencia excepcional” (ver nota 3.1). Es curioso observar la insistencia con que Freyssinet manifiesta que su “carrera excepcional” sólo es debida a su total entrega al arte de construir y no a sus cualidades intelectuales.

exteriores. Su ventaja fundamental era la posibilidad de aplicar, gracias a su intradós liso, la técnica de cimbras de muy pequeña anchura, desplazables por medio de un sencillo ripado. “Ya en 1913 había yo inventado las bóvedas con nervios superiores, y en 1916, las cimbras deslizantes. Si las hubiera patentado, me hubiera hecho millonario. Por otra parte es un hecho que sólo las patentes estúpidas enriquecen a sus autores” (54).

Freyssinet necesitaba crear bóvedas con nuevas formas. La bóveda de cañón no era económica para las grandes luces que cada vez más se solicitaban y permitía una deficiente iluminación aplicada a naves industriales. Sus bóvedas más conocidas son las parabólicas de Orly, que pueden considerarse las primeras bóvedas plegadas del mundo, cuya sección ondulada, más o menos modificada, se ha repetido después hasta el infinito aplicada a superficies de todo tipo, incluso planas, y a las más variadas estructuras como puentes, naves, cubiertas de estaciones, aeropuertos, estadios, y por supuesto han servido de inspiración a famosos arquitectos que la emplearon en cerramientos arquitectónicos, buscando a veces sólo el efecto estético. Freyssinet aplicó también la utilización de **paredes ondulant** en los grandes depósitos de agua.

En segundo lugar, las ingeniosas bóvedas conoides, que, “aseguran un excelente reparto de la luz en los locales que cubre, muy robustas gracias a la doble curvatura de su superficie media y que, en general, presentan una estanqueidad mucho mejor que las bóvedas de cañón” (55). Por ejemplo, las justamente poco conocidas bóvedas conoides de la estación de Chatillon para un depósito de locomotoras, en Bagneux, al sudoeste de París, que llevan nervios de refuerzo al exterior. “Placas de cemento armado delgadas como una cáscara de huevo y curvadas como el cartón” llama Giedion a estas bóvedas de Bagneux en su célebre libro “Espacio, Tiempo y Arquitectura”. Giedion no supo apreciar ninguno de los grandes avances técnicos, resistentes, constructivos y estéticos que suponían las bóvedas de Freyssinet. Resulta lamentable y digno de una mayor reflexión que, en todo su libro, sea ésta la única y mezquina mención a toda una obra tan ingente, rica y universal como la de Freyssinet, mientras dedica docenas de páginas a Maillart, con un evidente desenfoque objetivo.

Otra ingeniosa invención de Freyssinet fue la rigidización por triangulaciones interiores, puestas en tensión antes del descimbramiento, disposición que le permitiría alcanzar los 70 m. fácilmente.

(54) “Este detalle, en apariencia poco importante, ha tenido una influencia considerable sobre el desarrollo de este género de construcción, porque simplifica considerablemente la ejecución y reduce mucho el coste. En efecto, colocando nervios salientes sobre el extradós, se reduce muy rápidamente por una mano de obra sencilla, y se presta a un desencofrado rápido por grandes elementos, sin demolición de moldes. Los nervios se ejecutan después de la bóveda, con ayuda de pequeños encofrados auxiliares que pueden ser desmontados después de 24 horas de fraguado y vueltos a emplear un gran número de veces”. E. Freyssinet, “Génie Civil”, 22 de setiembre de 1923.

(55) M. P. Lebel. “Jubilé de M. E. Freyssinet”. Travaux-agosto 1954.

En 1918, Freyssinet construye sus primeras bóvedas laminares. Siempre guiado por una estricta utilización de los materiales, lejos de toda especulación teórica o estética, dominando la técnica del descimbrado, desencofrado y hormigonado —gracias a la vibración, al endurecimiento rápido del hormigón, a las cimbras rodantes y al descimbramiento por medio de gatos— realiza bóvedas de arista invertidas, trabajando como membranas en tracción, en fondos de depósitos y hace volar esa pequeña maravilla que son las marquesinas laminares de la Gare d'Austerlitz. Estas bóvedas tienen entre cuatro y seis centímetros de espesor y llevan un tirante horizontal pretensado justamente en el punto donde atacan los tirantes inclinados. A pesar de su espesor y de los años transcurridos, las marquesinas de Austerlitz presentan un formidable aspecto. No se aprecian grietas ni flechas. Su hormigón, ya viejo, ha tomado ese color indefinido y hermoso entre gris y siena de la piedra antigua, de las esculturas de hormigón de Chillida. Son muy bellos los encuentros en las pechinas que se forman al encajar las marquesinas en las naves laterales. Esta obra, pionera de las láminas de hormigón armado, muy anterior a las de Maillart y Torroja, arrinconada y olvidada en una vieja nave de expediciones de una estación de París, desconocida de la mayoría de los ingenieros, críticos o estudiosos, como tantas obras de Freyssinet, impresiona con su soberbia y solitaria dignidad.

Pueden considerarse como nuevas aplicaciones cuyas originales el sistema de bóvedas invertidas utilizadas como zampeados en cimentaciones, así como el sistema de bóvedas prolongadas hasta el suelo con el que se construyen los primeros hangares del mundo en hormigón, iniciando una tradición que continuarán los mejores ingenieros del siglo, Caquot y Nervi, entre otros.

La necesidad de economizar acero llevó a los Servicios Públicos franceses a recomendar el empleo de hormigón para la construcción de barcos. Así, el 29 de julio de 1918, el Comisario de transportes marítimos encargó a diversos constructores un importante pedido de barcos de 1.000 Tn. Los constructores se lanzaron a ello y esta industria llegó a tener un desarrollo considerable (56) entre 1918 y 1921. Freyssinet tomó parte con Limousin en este movimiento. Fue administrador-delegado de la sociedad de barcos de hormigón armado de Rouen, con astilleros en Grand-Quevilly y varios concesionarios. En 1921 consiguieron la botadura de más de 16 navíos del tipo "Lezard" de 55 m. de longitud (57). Los barcos se construían

(56) De 1918 a 1920, en Rouen y en Bordeaux, se lanzaron numerosos "chalands de mer" ("Le Génie Civil", 21 de agosto de 1920 y 23 de abril de 1921).

La revista "Le Génie Civil" se ocupó del tema en varias ocasiones:
—Las construcciones navales en hormigón armado (tomo 72, n.º 1 y 2).
—Los barcos de hormigón armado en Estados Unidos (tomo 73, n.º 7).
—Chalands en hormigón armado, sistema Lossier (tomo 75, n.º 14, y n.º 12-3 1921).

—Chalands de mer en hormigón armado (tomo 77, n.º 8).

(57) Las características del "Lezard" eran las siguientes:

Longitud: 55 m.
Desplazamiento total: 2.150 Tn.
Peso total de acero: 165 Tn.

sobre un terraplén, uno al lado de otro y se botaban siempre de través. Los nervios de rigidización del casco se prefabricaban quedando integrados en la estructura al hormigonar el casco. Para desencofrar, los barcos se lavaban por medio de sacos de cuero que se llenaban de agua formando una especie de gatos flexibles.

Estos gatos flexibles son otra invención muy ingeniosa de Freyssinet. Tienen importancia histórica porque son el primer paso hacia sus formidables gatos planos, que tantas y tan variadas aplicaciones tendrían en el futuro de la construcción pretensada. Eran de cuero, en forma de tubos cerrados o globos que, al inflarse de agua, se constituían como verdaderos gatos suaves con una gran capacidad de carga.

Aparte de los ya citados, Freyssinet inventó y puso a punto nuevos métodos de aplicación de técnicas ya conocidas, e innumerables medios auxiliares originales para las obras que iba realizando, según se le presentaban los problemas por diferentes que fuesen. Por ejemplo: inventó un nuevo método de empleo de aire comprimido para cimentar el puente de Tonneins; inventó el anclaje de cables en el hormigón por adherencia (58), que empleó en los

Peso de hormigón: 500 Tn.

Peso del aparejo: 135 Tn.

Capacidad de carga: 1.350 Tn.

Densidad del mortero empleado: 2.250 kgs/m.³

Los defectos que normalmente se achacaban al empleo de hormigón para la construcción naval eran:

1) Falta de flexibilidad; 2) falta de estanqueidad; 3) ataque del cemento por agua de mar; 4) dificultad de obtener formas convenientes. 5) dificultad de fijar sólidamente apartos y accesorios de aparejo; 6) ineptitud para soportar choques; 7) dificultad en obtener solidez suficiente con poco peso.

En una comunicación presentada al Congreso de Rouen, de la "Asociación Francesa para el Avance de las Ciencias", en 1921, Freyssinet refuta dichos argumentos sistemáticamente, deteniéndose especialmente en los puntos 6 y 7. Para combatir la fragilidad, señala: "Abordando de frente el problema y notando que la fragilidad del cemento es debida a su falta de resistencia a la tracción he llegado a obtener hormigones no frágiles. Para ello sólo es necesario que las deformaciones causadas por los choques sean enteramente absorbidas por una armadura apropiada". La armadura la disponía a base de barras de pequeño diámetro completamente diseminadas en la masa. Respecto al punto 7, manifestaba Freyssinet que el peso del casco se compone de: peso del hormigón de recubrimiento, peso del hormigón activo y peso del acero.

El hormigón de recubrimiento era muy compacto. A pesar de que los recubrimientos tienen un espesor de 2 cm. al exterior y 1 cm. al interior, el peso de este hormigón era del orden del 20 % del total. Como es independiente del tamaño, los cascos grandes eran más ventajosos que los pequeños.

El hormigón activo debía ser el imprescindible para unir las capas de barras finas y muy numerosas que resisten por sí mismas todos los esfuerzos dejando al mortero el papel de unión entre ellas y de asegurar la estanqueidad. Su espesor es también independiente del tamaño. "Considero más fácil hacer un casco de 10.000 Tn. que uno de 2.000", decía Freyssinet.

El peso de acero era mucho menor que el equivalente a un casco tradicional ya que se eliminan todas las piezas de unión y el espesor reservado a proteger la chapa de la oxidación.

(58) El anclaje de cables en macizos de hormigón por adherencia de sus hilos es utilizado numerosas veces por Freyssinet, en todos los tirantes de sus bóvedas y en gran parte de los cables empleados en los medios auxiliares de obra. Pero alguno de estos anclajes, como el utilizado en los mecanismos de las cimbras de Orly y el anclaje del cable principal del andarivel de Plougastel tienen un interés especial.

En el andarivel, se trata de anclar el cable a la cabeza del cabrio de 55 m. de altura que lo soporta. Con el fin de evitar las tensiones derivadas de las flexiones producidas por los movimientos verticales y horizontales del cable se precisa una articulación en cardan. Freyssinet utiliza el hormigón para trasladar los esfuerzos del cable a las piezas metálicas que se articularán al extremo superior del soporte, y para ello separa los hilos del cable y los rodea de un hormigón fuertemente zunchado por una armadura de perfiles metálicos de forma apropiada.

Fue la primera vez que se realizó un anclaje para un cable de esta importancia con ayuda del hormigón y realizaron muchos ensayos para

EUGENE FREYSSINET

hangares de Orly y luego en Plougastel; se anticipó a la técnica de voladizos sucesivos en Plougastel, así como intuyó en la misma obra los elementos mixtos de acero estructural-hormigón y los de madera-hormigón, usando clavos como conectores entre ambos materiales.

Por último, es necesario resaltar el desarrollo y aplicaciones prácticas de una idea fundamental de Freyssinet en la que estaba implícito el germen del pretensado: la introducción de deformaciones elásticas sistemáticas. La idea no era nueva, pero Freyssinet la utiliza numerosas veces, la mejora sustancialmente y la define (59) con total perfección: "La idea general del método es no aceptar como necesario el estado elástico de una construcción, tal como resulta de sus condiciones habituales de ejecución, sino por el contrario, intentar, si es posible modificarlo favorablemente por medio de una deformación inicial impuesta artificialmente a ciertos elementos en una cierta etapa de la construcción". Quizá sea ésta la primera vez en que Freyssinet establece con absoluta claridad el principio conceptual del pretensado.

Las numerosas aplicaciones de esta idea desarrollada por Freyssinet se pueden agrupar en dos grandes categorías. En la puesta en carga del tirante del arco de ensayo de Moulins y en la corrección de momentos parásitos en arcos mediante la actuación de gatos en clave, Freyssinet había manejado una deformación en el sentido principal de trabajo de la estructura. Pero también se pueden emplear para este fin los acortamientos derivados de una deformación transversal y la utilización por Freyssinet de este segundo tipo de deformaciones dio lugar a aplicaciones muy diversas e interesantes.

En el puente colgante de Laon, de finísimas péndolas y cables principales recubiertos de hormigón, las tensiones parásitas debidas a la retracción, al acortamiento del tablero y al alargamiento de los cables son muy fuertes. Para suprimirlas —condición indispensable para realizar un puente de este tipo— Freyssinet introdujo en tres puntos, unos gatos hidráulicos con los que alargó los cables antes de hormigonarlos, elevando sus apoyos algunos centímetros, (en A, 30 mm.; en B y en C, 23 mm.). Después de levantar los apoyos, se acuñaron y se hormigonaron (60).

En Plougastel, la cimbra de los arcos de 180 m. se apoyaba en los arranques de éstos, que volaban unos 15 m. del eje de la pila, con lo que se producía un momento de 4.700 m. Tn. que creaba problemas en el arranque de los arcos. Freyssinet superó el problema disponiendo horizontalmente dos capas de cables anclados en el hormigón por adherencia, tensándolos al levantar su punto central con un gato.

comprobar su comportamiento. La principal precaución de Freyssinet fue zunchar el hormigón especialmente en el punto de salida del cable y tomar todas las medidas de limpieza y separación de hilos para garantizar la adherencia.

(59) E. Freyssinet. "L'amélioration des constructions en béton armé par l'introduction de déformations élastiques systématiques". "Le Génie Civil", 15-9-1928.

(60) Eduardo Torroja realizó, en aquellos años y con una solución similar, el acueducto de Tempul en Jerez de la Frontera (España).

En los hangares de Palyvestre anula la deformación longitudinal del tirante que aguanta los empujes horizontales de la bóveda actuando por medio de gatos sobre cables anclados en el trasdós de la bóveda y sujetos al tirante que al tensarse levantaban el tirante horizontal, consiguiendo controlar la deformación de éste.

En las marquesinas de la estación de Austerlitz, Freyssinet actúa de forma similar sobre los tirantes de 30 bóvedas consecutivas de 10 m. de luz por medio de una deformación vertical obtenida con unos cables anclados en el trasdós de cada bóveda. Con estos procedimientos Freyssinet consigue realizar grandes superficies cubiertas, sin juntas en los elementos de recogida de agua, ni bajantes en los interiores.

Lebelle recuerda que, en el Congreso de la Asociación Internacional de Ponts et Charpentiers de 1928 en Viena, pudo ver el filme del puente de Plougastel, entonces en construcción, que Freyssinet proyectó a los congresistas. Fue tan grande el asombro entre aquellos técnicos que formaban "l'élite des ingénieurs du monde entier", que hubo de repetirse la proyección en dos nuevas ocasiones, y gran parte de los congresistas se trasladaron a Plougastel al finalizar el Congreso.

Es difícil imaginar hoy, en un universo técnico, arquitectónico y constructivo tan mediocre y monocorde, huérfano de grandes maestros, en un mundo manierista que se limita a depurar y a explotar al máximo los hallazgos ya conseguidos, con la frialdad de las computadoras y las cuentas de pérdidas y ganancias, lo que significaba Freyssinet en aquellos años veinte, cuya figura despertaba por todas partes admiración y respeto, reclamado desde Berlín, Londres o Bruselas, donde dictaba conferencias con auditorios que superaban fácilmente los mil ingenieros (61). Por ello, sólo su mujer y cuatro amigos verdaderos (62), "rares esprits hors classe", comprendieron su decisión de dedicar el resto de su vida a realizar el gigantesco progreso técnico que había imaginado. Lo que para los demás significaba una desertión en su carrera profesional, para Freyssinet era el único camino, la calle mayor que conducía directamente al pretensado. Entregar el mensaje del que se sentía portador, era su única y absoluta necesidad.

El día 2 de octubre de 1928, Eugenio Freyssinet y su buen amigo Seailles registraban en París la patente n.º 680.547, definiendo con toda precisión la idea teórica de la precomprensión permanente de los hormigones o de otras materias y todas sus formas posibles de realización. La suerte estaba echada. A partir de entonces, de la nada, Freyssinet habría de crear absolutamente todo en el pretensado."

(61) Sin embargo, "fue siempre fiel a sus amigos, y la fortuna que había ganado con su cabeza y su trabajo nunca le embriagó", como me escribía E. Pontzen, al poco de morir Freyssinet. Pontzen fue amigo suyo desde 1902 y compañero de servicio militar. Siendo estudiante de la Escuela de Ponts et Chaussées, Freyssinet visitaba con frecuencia a su amigo en París y conversaba con su padre que era también ingeniero de Caminos, con quien discutía cuestiones de la profesión.

(62) Ver Cap. IV, nota (4.4).