

1.— Orly, puente N° 10 en hormigón precomprimido, sobre la carretera nacional N° 7. Foto L'Architecture D'Aujourd' hui, Octubre 1963.

1

## LA IDEA FRANCESA DEL PRECONTRAÍNE REVOLUCIONA EL ARTE DE CONSTRUIR

E. FREYSSINET

Aparecido en: TRAVAUX N° 273, Julio 1957

Traducción de: LIBERATO AEDO L.

En un artículo de Travaux, de Enero de 1933, introduje la palabra *précontrainte*, para designar las fuerzas obtenidas por la tensión de hilos de acero duro, con las que contrarrestaba las tracciones desarrolladas por las cargas, en construcciones de hormigón, denominadas *Précontraintes*, a fin de evitar con ello las consecuencias de los alargamientos bajo carga de las armaduras clásicas.

No tardé en darme cuenta de que, en muchos otros casos, el constructor podría transformar ventajosamente el estado físico-mecánico de sus sistemas, por la creación de cam-

pos de tensiones, acompañadas de deformaciones. Realicé en Argelia, en Francia, importantes aplicaciones de estas ideas para las cuales creé los medios adecuados a las circunstancias.

Desde hace varios años el hormigón pretensado se está desarrollando en el mundo a una velocidad impresionante, en razón de sus ventajas económicas y de la sencillez de sus medios, y una abundante literatura lo ha convertido en clásico.

A pesar de las ventajas, todavía mayores que las del concreto pretensado clásico, habrá que esperar más

tiempo la vulgarización del *précontrainte generalizado*, que resulta de una ejecución menos fácil.

Pero, desde el presente, gracias al ejemplo dado por nuestro país, los constructores de todo el mundo saben que una modificación artificial de los estados físico-mecánicos de las construcciones, puede llegar a ser, con el mismo derecho que su definición material, un dato cuya introducción en algunos proyectos, puede convertir en fácil la solución de problemas, sin ella, insolubles.

Tal transformación de su arte, apenas esbozada, suscita una curiosidad que no está limitada sólo a los constructores. Estas páginas tienen por objeto satisfacerla tan plenamente como sea posible; al mismo tiempo me esforzaré en denunciar y combatir ideas que estimo perjudiciales para el progreso de otras, a las cuales he dedicado toda mi vida.

### *El précontrainte antes de 1933*

Definido como fuerzas que, por su aplicación a una estructura frente a las que tiendan a destruirla, asegurándole su permanencia, los pretensados han tenido, desde siempre, un papel esencial.

En efecto, ellos constituyen el único medio concebible de reunir varios bloques en un grupo que posee las propiedades de un bloque único.

Es por precompresiones, debidas a la gravedad, que un muro resiste los esfuerzos que tienden a derribarlo. Por iguales razones la permanencia de las acumulaciones realizadas por la naturaleza o por el hombre, está asegurada.

Pero las *précontraintes* debido a la gravitación no pueden realizar los conjuntos móviles, sin los cuales ninguna cosa útil existiría; y la civilización no ha podido nacer más que el día en que un ser que, por tal camino, llegó a ser hombre, inventó la obtención de pretensados, merced a las reacciones elásticas de cuerpos violentamente solicitados.

Gracias a ligamentos fuertemente apretados, que los hacen solidarios, una piedra y un palo se convierten

en un hacha o un martillo. Toda obra del hombre, sólo existe en virtud de reacciones elásticas, obtenidas por pernos, cuñas, tarugos, remaches o zunchos. Su utilización es un reflejo normal del artesano.

### *Nacimiento del hormigón pretensado*

Tal vez será porque heredé los reflejos de una raza de artesanos que, desde que me encontré en presencia de la dificultad mayor del hormigón armado (la imposibilidad del concreto de seguir, sin ruptura, el alargamiento del acero), empecé a pensar en sustituir, en el uso de las armaduras, una compensación a las tracciones, debidas a las cargas, por compresiones provocadas por hilos de acero, tendidos entre puntos del concreto ubicados fuera de la zona sometida a tracciones. Era la idea del concreto pretensado.

En 1907 pude hacer de ella, en Moulins, una primera aplicación, gracias a Francisco Mercier, gran empresario de Obras Públicas, cuya generosa amistad aceptó construir una bóveda de ensayo de 50 m. de luz y 2 m. de flecha, en principio destinada a estudiar el decimbramiento de las bóvedas mediante gatos, de una serie de grandes puentes sobre el Allier. Era necesario hacer también lo menos variable posible la distancia entre ambos estribos de esta bóveda.

Vací entre ellos un prisma de hormigón y comprimí el todo tendiendo alambres trefilados de 9 mm. ubicados por grupos en los alvéolos, estirados a 75 k./mm<sup>2</sup>. y fijados por pares hacia atrás en los estribos. Hacían, en total 2.500 t.

Entonces creía yo, como todo el mundo, que el hormigón obedecía a las reglas admitidas por la circular de 1906.

La observación de los movimientos del arco de ensayo, comenzada en 1909, me reveló la extraordinaria complejidad de las deformaciones del concreto y la existencia de deformaciones diferidas, demasiado importantes para crear serias dudas acerca de la permanencia de las compresiones



2

en el hormigón. De ahí la necesidad de experiencias de larga duración, detenidas por la guerra de 1914. Estas seguían su curso, cuando, el 31 de Julio de ese año debí abandonar en 24 horas mi material y mis archivos, que se perdieron a causa de que el terreno de mis ensayos, en mi ausencia, hubo de sufrir una ocupación militar.

No pude reiniciar esos ensayos más que a principios de 1926; continuados hasta 1928, me dieron la certeza de que, mediante el empleo de aceros duros y de concretos compactos, las deformaciones diferidas no serían de temer.

Decidí entonces, consagrar todos mis esfuerzos al desarrollo de construcciones *précontraintes*. Asociándome con una filial de las grandes redes de distribución eléctrica, establecí en Bezons, en una central fuera de servicio, una usina-laboratorio lo suficientemente provista de material, para estudiar después la formación de una cadena de producción de postes *précontraintes*, cuya longitud alcanzaba hasta 16 m. Montada en Montargis, en una usina existente, fue puesta en marcha en 1933.

Empleaba hilos mecánicos duros, someténdolos, por estiramientos sucesivos, mediante una máquina automática, a una tracción de 90 kg/mm<sup>2</sup>. Las restablecía a su normalidad y las reestiraba a la misma tensión, límite de elasticidad.

La instalación comprendía máquinas semi-automáticas, cuyas funciones eran las siguientes: instalar en medios moldes, aceros tensados a 80 kg/mm<sup>2</sup>. controlados por romanas; agrupar los medios moldes de dos en dos; llenar los medios moldes con concreto Portland; airearlos. Se ob-

tenía un llenado perfecto gracias a la alternancia entre las presiones y depresiones combinada con una vibración intensa. El secado se obtenía bajo una presión interior de 16 kg/cm<sup>2</sup>. Una estufa de vapor aseguraba un calentamiento de 95 a 100° durante una media hora, temperatura que podía ser soportada por nuestros concretos, en razón de su muy alta compacidad.

Después del enfriamiento parcial, se desmoldaba y, a pesar de los *précontraintes* del hormigón, que sobrepasaba, a veces, 350 kg/cm<sup>2</sup>. nunca hubo incidentes en el desmoldaje.

Aunque los pesos del acero y del hormigón fueron reducidos más de la mitad, las deformaciones de mis postes fueron reducidos en un 40% de las antiguas y soportaban indefinidamente esfuerzos alternados que en pocos minutos destruían los postes clásicos. A despecho de sus cualidades extraordinarias y de una magnífica presentación, no pudimos obtener sino pedidos insignificantes.

Para las series que habrían, por sí solas, permitido una fabricación remunerativa, nuestros clientes exigían referencias de duración. No pudiendo vender estos productos, debimos detener la cadena y vender la maquinaria como fierro viejo. Después de 4 años de los más duros esfuerzos, me encontré arruinado. Sólo un milagro podría salvarme con mi obra.

El milagro se produjo. Fue el salvamento de la estación marítima de El Havre.

Imaginad una construcción dos veces más larga y más ancha que el mayor paquebot. Se la había edificado

sobre enormes soportes de concreto armado que descansaban sobre pilotes plantados en un antiguo terraplén de diez metros de espesor. Pero ese terraplén reposaba sobre 20 m. de fango que, bajo su peso disminuía lentamente de volumen. Después de casi terminada la obra gruesa, a mediados de 1933 aparecieron hundimientos. Diferentes según los apoyos, sobrepasaban a menudo los 25 cm. a principios de 1934, y crecían linealmente; enormes fisuras, de día en día mayores, cortaban muros y vigas. Todos los remedios ensayados resultaban ineficaces o perjudiciales. La construcción parecía abocada a un naufragio cercano.

Presenté entonces un proyecto de restauración aceptado sin correcciones del cual, he aquí sus líneas principales.

Formé, gracias a précontraintes de 1.000 t., ligando las antiguas fundaciones con otras nuevas, elementos rígidos de gran longitud, los que, al uniformar los hundimientos, retardaron los más rápidos. En seguida implanté en pozos trabajados en el nuevo concreto, con gatas, solidarizados con los pilotes existentes mediante collares hidráulicos móviles, capaces de presiones de 320 toneladas, grandes pilotes huecos, cilíndricos. Estos se rellenaron entre el nivel del agua y bajo el primer piso por sectores vibrados y comprimidos a 20 kg/cm<sup>2</sup>., ligados a los precedentes por un précontrainte y endurecido a vapor mientras se estaban instalando los primeros.

El éxito de este plan suponía que antes de la catástrofe temida, yo llegaría a concebir, a perfeccionar y realizar una buena decena de técnicas enteramente nuevas.

Para ello disponía de mi usina de Bezons y de un admirable personal, cuya fe era igual a la mía. Durante los primeros meses de 1934, todos habíamos dormido muy poco. Pero en Agosto, plantados los primeros pilotes, se detuvieron en seco los hundimientos más dañinos y, a corto plazo, todo riesgo de accidente había desaparecido.

Habíamos ganado una batalla en la cual la importancia, desde el punto de vista de la historia del *précontrainte*, iba a ser capital.

Si en Enero de 1934 hubiera yo retrocedido entre los riesgos de una empresa temeraria, el pretensado estaría hoy día, más o menos en el mismo estado que en 1933. Desde muy largo tiempo atrás se buscaba ya la posibilidad de utilizarlo. En 1928 M. Coyne, entonces Ingeniero de Puentes y Calzadas en Brest, a quién yo daba parte de mi primera patente concerniente a la idea del *précontrainte*, me dijo que en tiempos lejanos, cuando él servía en el Finistère, M. Considère había construido un muro de malecón, formado de bloques de granito precomprimidos verticalmente por barras de fierro selladas en la roca de fundación y fuertemente tendidas con la ayuda de tuercas y que él había considerado utilizar el mismo sistema para mejorar la estabilidad de las represas que proyectaba.

Desde que el concreto armado estuvo a la orden del día la idea de tensar las armaduras para retardar la producción de fisuras, sedujo a muchos espíritus, notoriamente a: Considère, Bach, Rabut, Koenan. Después de muchos ensayos, comenzados en 1907, declara éste, en el preámbulo de una patente, que sus ensayos probaban la imposibilidad de mejorar durablemente el hormigón armado, por tensión de las armaduras.

Muchos otros inventores continuaron, sin resultados valederos, tensando aceros en el concreto. Sus fracasos no se explican, sino por la ausencia de una idea directriz. El caso del alemán Hoyer es muy instructivo a este respecto.

Alrededor de 1925, Hoyer tuvo la idea de armar, con varillas estiradas, vigas y planchas en concreto. Pero sus ensayos, hechos preferentemente para la ciudad de Magdeburgo, fueron tan poco convincentes, que abandonó su idea y se abstuvo de hacer los gastos que demandaría obtener una patente.

Mucho tiempo después, conocidos mis éxitos, por las publicaciones he-

chas en Alemania por mis concesionarios, él reinició sus ensayos y, guiado por mis ideas, obtuvo, de inmediato, resultados satisfactorios. Maldiciendo su falta de tenacidad, solicitó patentes, las que los jueces alemanes denegaron, en plena guerra, reconociendo mis derechos anteriores, lo que no le impidió, bajo el amparo de la Wehrmacht, poco respetuosa de consideraciones jurídicas, de inundar la Europa ocupada, de vigas pretensadas. Pero volvamos a 1934.

¿Cómo había progresado la idea del précontrainte desde el muro de Consi-dère, de medio siglo atrás? Sólo existían mis postes que nadie aceptaba y que pronto quedarían olvidados.

Después de El Havre, la situación cambió totalmente.

En efecto, de una visita a mi taller, M. Adme Campenon se impresionó de tal manera que desde ese momento hizo de la empresa Campenon Bernard la Promotora del pretensado, la empresa piloto que en todos los dominios de su aplicación allanaría el terreno, resolvería los problemas de ejecución y se mantendría a la cabeza del progreso. Los Ingenieros del Gobierno de Argelia, los de la Marina Nacional, los del Servicio de Caminos, encuentran en el Havre la información indiscutible que va a permitirles hacer aceptar el empleo del précontrainte para los trabajos públicos de la mayor importancia. Las grandes realizaciones comienzan sin demoras, a un ritmo impresionante.

En Argelia, Campenon Bernard ejecuta bajo la dirección de los servicios del Gobierno General, la vasta red de canalización de Oued Fodda, más de 50 km., con diámetros que alcanzan hasta 1,50 m. y presión de ensayo de 18 kg/cm<sup>2</sup>. Seguirán extensiones numerosas en Africa del Norte; una presa de captación de agua en el Oued Fodda, en la cual, radiers, machones, compuertas, puertas y pedestales son pretensados. Centrales hidroeléctricas con canalización de gran diámetro y alta presión, marcos de reparto, torres de equilibrio, puentes, postes eléctricos por decenas de millares. Incluso el levantamiento de 7 m. sobre el nivel

del agua de la represa de Beni-Badhel en el Tafna, que así resultó una de las más importantes en Africa del Norte.

En Francia, Campenon Bernard ejecuta, en Brest, enormes trabajos para la Marina Nacional con el apoyo de Ingenieros de trabajos marítimos; un gran número de cajones de fundación, algunos de los cuales sobrepasan las 5.000 T., para malecones, muelles y elementos de construcciones de carenas. Su éxito hizo del précontrainte un procedimiento clásico de ejecución para las grandes obras marítimas.

En 1939 introduje los cables con revestimiento plástico o metálico y medios de anclaje, caballetes y conos que, al simplificar y suavizar la ejecución del concreto pretensado, favorecían considerablemente su difusión. Mientras Campenon Bernard aprovecha esta idea en Francia y Argelia, Mantner en Alemania se había convertido en el campeón de *précontrainte*, antes de ser forzado él mismo (*contraint*), por los nazis a huir a Inglaterra. Lo introduje en el Imperio Británico, lo que permitió la construcción, en plena guerra, de dos grandes hangares de aviación de hormigón pretensado, en Karachi. Yo había realizado prensas hidráulicas: al comienzo de la guerra M. Cagnet me pidió para la aviación, una prensa hidráulica de 40.000 t. cuya ejecución fue solamente suspendida a causa de la conflagración.

Durante la guerra, los Aliados tomaron mis patentes, pero casi no las utilizaron. En Alemania mi concesionario de preguerra, la Wayss und Freytag, construyó algunos puentes; Hoyer hizo las vigas de que hablé más atrás; Sainrapt y Brice hicieron con la Stup dos viaductos y una pasarela industrial; Magnell ejecutó dos puentes ferroviarios en Bruselas. Con Campenon Bernard inicié el puente de Luzancy; interrumpido en 1941 por la ocupación, ese puente fue continuado en 1946. La "Stup" nació en 1943 de un exceso de optimismo, mientras duraban las hostilidades.

Pasada la guerra, se descombran y reparan antiguas construcciones. Las condiciones se mantienen muy desfavorables por varios años para el pro-

greso de una técnica nueva. Sin embargo, en Orleans Campenon Bernard hace vigas de pisos, consolidaciones de machones de puentes, un gran depósito municipal, el primer depósito en concreto rigurosamente estanco y termina el puente de Luzancy.

Después de la ejecución de este puente, empezado, como ya se dijo en 1941 y continuado después de la liberación, el concreto pretensado adquiere en Francia un interés suficiente para que pueda nacer la Asociación Científica del Précontrainte (A.S.P.). Pronto nacerán en el extranjero otras asociaciones más y más numerosas. En 1949, las primeras jornadas del précontrainte, organizadas por la A.S.P., reúnen 500 adherentes, de los cuales 225 son extranjeros.

En 1950 nuestros visitantes extranjeros, más numerosos todavía, ven el taller de las galerías cubiertas de Ranan, pilotes, postes, muros de sostén y lozas de caminos, todo en elementos précontraintes prefabricados que cubren más de una hectárea, y un gran puente sobre el Sena, según un proyecto de M. Henry Lossier.

Actualmente se puede resumir como sigue la situación del concreto précontrainte:

**FRANCIA.**—El número de empresas que han construido en hormigón armado, bajo licencia "Stup", sobrepasa la centena. Más de 300 puentes se han ejecutado, de los cuales una treintena en el solo departamento del Norte y del Paso de Calais, bajo el impulso del Ingeniero Jefe, Dumas.

Entre las obras más recientes citamos el puente De l'attre de Tassigny en Lyon; el puente de los Recoletos en Tolosa; las rampas de acceso al puente de Tancarville. El précontrainte juega un papel muy importante en los apoyos de las pilas principales y en los refuerzos.

Las aplicaciones del précontrainte a las construcciones industriales, a los depósitos, a los trabajos portuarios se multiplican. Diez usinas fabrican viguetas en concreto y en cerámica précontrainte para la edificación y otras cinco están en construcción.

**ALEMANIA.**—En este país mis ideas sobre el précontrainte habían encontrado desde 1930, un defensor adicto en la persona del Dr. Mautner, Director de la Wayss und Freytag. Construyó sobre mis planes, una maquette al 1/3 de una viga de 60 m., repetida en Stugar; estas maquettes han sido sometidas a ensayos de carga, muy completas, con estudio de las deformaciones locales, publicados por el Dr. Morsch.

Apresado por los nazis, Mautner llegó a refugiarse en Inglaterra. La Wayss und Freytag hizo en una serie de numerosas obras, puentes, construcciones industriales y estadios.

La sociedad Dickerhoff et Wiedmann, animada por el Dr. Finsterwalder utiliza barras con resaltes, con notable éxito, para el célebre puente de Warms.

El Dr. Leamhardt, por un procedimiento inspirado por el de las grandes vigas del Havre, construyó un gran número de puentes.

**INGLATERRA.**—Una sociedad de explotación, creada por el Dr. Mautner, realiza hangares de aviación notables, en plena guerra, en Karachi; más tarde en Londres, además numerosos puentes y edificios.

**BELGICA.**—El Dr. Magnell, adicto a mis ideas desde 1938 termina, tan pronto como concluye la guerra, dos puentes de ferrocarril en Bruselas. Diversos constructores han realizado buenos puentes, hangares, usinas, etc.

**HOLANDA.**—Es de todos los países, el que tiene la proporción más fuerte entre las obras de concreto précontrainte. Los holandeses han realizado, entre otras construcciones, importantes cubiertas delgadas de formas variadas, depósitos y puentes notables.

Los países nórdicos, Dinamarca, Noruega, Suecia, siguen el ejemplo de Holanda. Citemos, en particular, numerosas construcciones circulares (depósitos, silos para azúcar, etc.).

**ESTADOS UNIDOS.**—Los Estados Unidos llegaron tarde al précontrain-

te. Es todavía el único país en donde no se ha podido obtener hilos de acero, en rollos de gran diámetro lo que, en un país de mano de obra cara, resulta una pesada desventaja. Allí se usan mucho, los alambres adherentes. A mi juicio, más de lo debido. Para el puente de Pontchartrain, propuse una solución con cables que habría permitido una apreciable economía; nunca he podido comprender las razones que hicieron descartarla.

CANADA - MEXICO.—El Canadá construye numerosos puentes y México parece iniciar un buen comienzo con puentes y una usina de viguetas prefabricadas.

BRASIL.—Mi amigo Etéve de Campenon, muerto durante una misión de estudios, alcanzó a promover la construcción de puentes de consideración (Gabión en Río de Janeiro, Joazeiro); trabajos marítimos de importancia (Recife); una inmensa presa en el suelo basáltico de Ernestina.

Los puentes del Camino de Caracas en Venezuela, son célebres. La calzada sobre los arcos es totalmente prefabricada. Se construye actualmente un gran puente en Uruguay. (Mercedes).

En Africa, fuera de las obras considerables construidas por Campenon Bernard en Africa del Norte, presas, puentes, cañerías, centrales, hay que citar el enorme puente sobre el Wauri en Doivala (Camerun) y en Unión Sud-Africana el Ellis, Brown Viaduct, entre muchas otras construcciones.

En Asia, en Australia, el concreto précontrainte, se desarrolla con extraordinaria velocidad; en Japón, en Nueva Zelandia y, sobre todo en la India, en donde, a continuación del gran puente de Coleroan (14 tramos de 48 metros) en servicio desde hace 2 años, más de 20 km. de calzada van a ser próximamente realizadas. La U.R.S.S., China, Indonesia, se interesan muy seriamente por el précontrainte.

#### *Ventajas del hormigón précontrainte*

La extensión del hormigón pretensado clásico tropieza con dificultades,

tales como insuficiencia de las armaduras, cuando los medios de producción no alcanzan a satisfacer la demanda; imperfección del equipo todavía en pleno desarrollo. La obligación de crear sin detenerse, nuevos especialistas. Si ella sigue tan rápida a pesar de todo, es porque el hormigón précontrainte sustituye muy frecuentemente al concreto armado, con ventajas importantes.

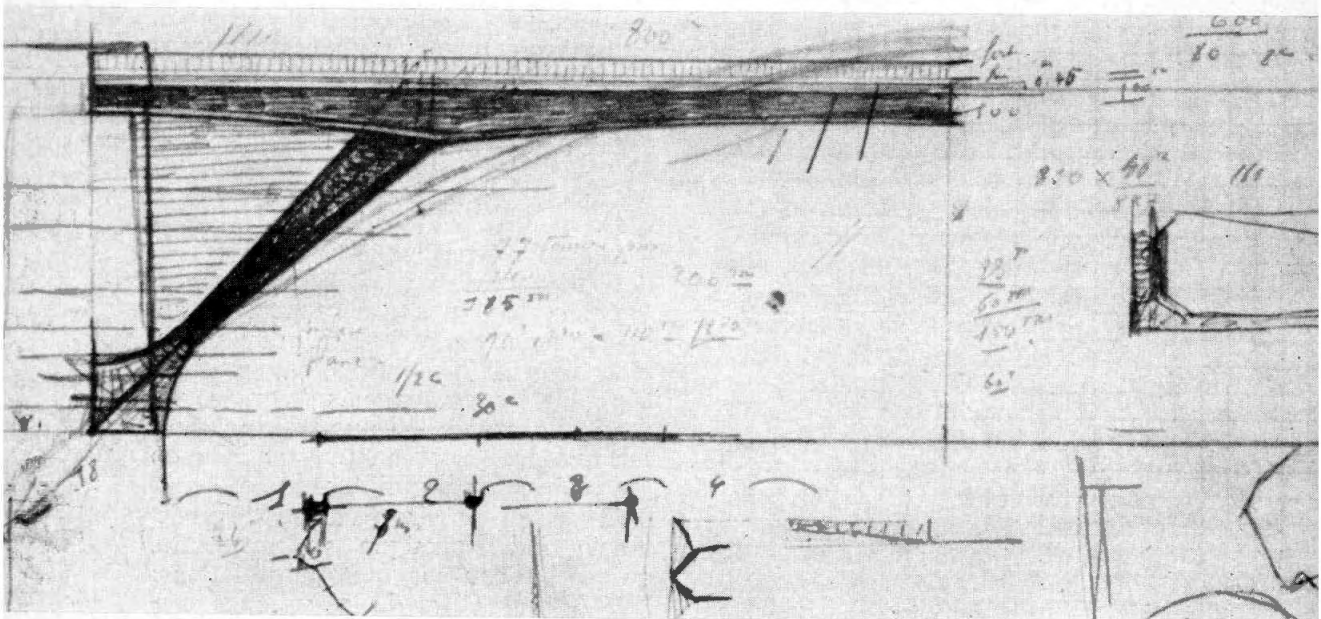
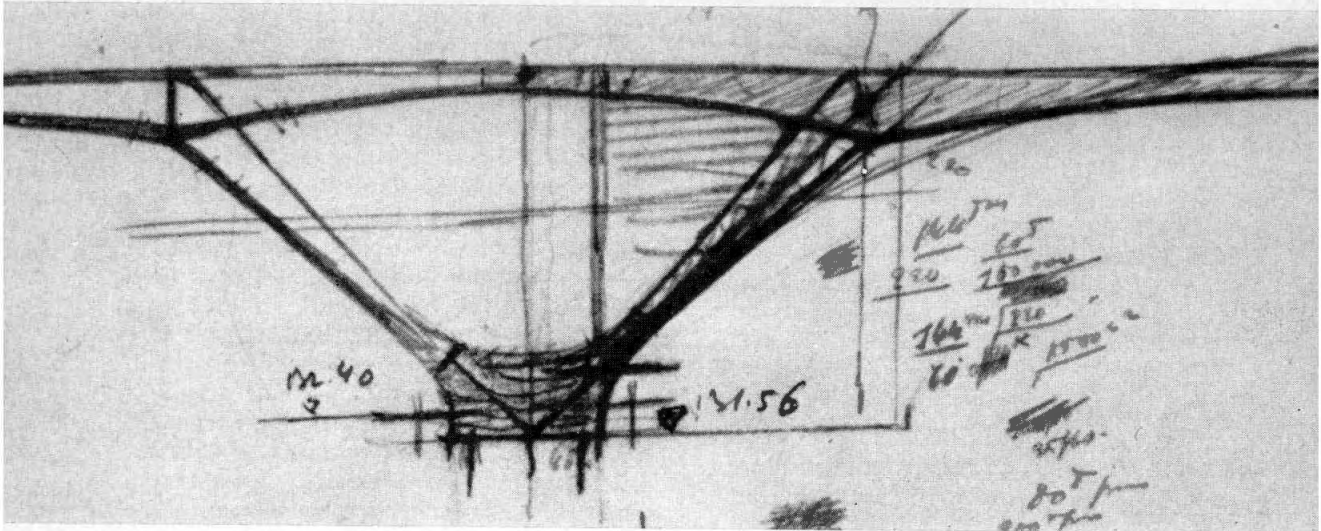
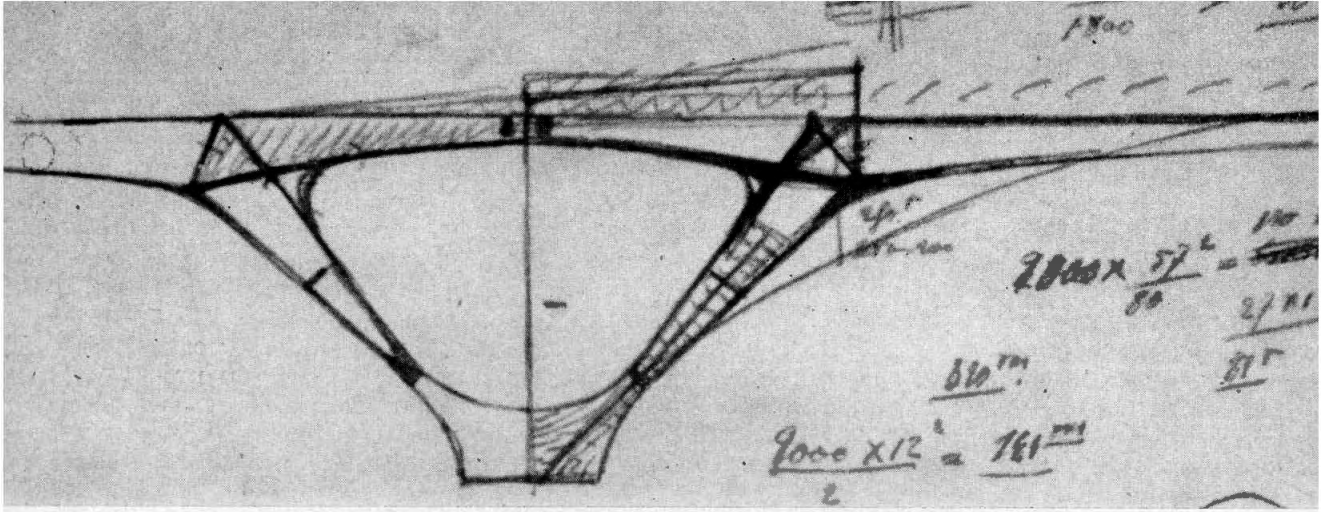
Las verificaciones son sencillas. Tomando, por ejemplo, una losa uniformemente cargada. El cálculo prueba que, introduciendo "precontraintes" convenientes, se puede llevar la resistencia de flexión y de cizallamiento de la losa, a lo menos, al triple de la misma losa armada normalmente.

La ventaja es mucho mayor todavía para las cargas aisladas. En concreto armado, la acción de la armadura es local y está limitada con respecto al concreto vecino. En hormigón pretensado toda la armadura contribuye a crear un campo de précontrainte en el conjunto de la construcción; puede, sin que su eficacia disminuya, ser notoriamente exterior a la masa sobre la cual actúa. La posición y la forma de las líneas de fuerza de tal campo dependen esencialmente de las deformaciones del concreto; se estrechan en las zonas correspondientes a cargas aisladas, donde se generan tendencias a un alargamiento elástico; más todavía cuando ese alargamiento llega a ser plástico. Las consecuencias prácticas de este fenómeno son considerables.

Algunos experimentos han probado, en efecto, que las áreas précontraintes continuas son capaces de soportar antes de la fisuración aparente, y de manera indefinidamente reversible, cargas enormes, más de cuatro veces superiores a las que puede soportar una losa cortada por uniones en las vecindades de un ángulo.

A más de la superioridad de resistencia del hormigón précontrainte, quiero indicar dos ventajas prácticas:

1<sup>o</sup>—La sencillez de las uniones prefabricadas, mediante cables tendidos sobre los elementos ligados por juntas de mortero, incluso si sus caras



3  
4  
5

3. 4. 5.—Bosquejos ejecutados por Freyssinet para el proyecto del puente Saint Michel en Toulouse. Reproducidos de la Revista Travaux. Noviembre 1963.



son planas, (particularidad que no ofrece ningún sistema constructivo).

2º.—Condiciones de seguridad muy particulares, sobre las cuales habré de insistir.

### *Mejor calidad del hormigón*

En las obras précontraintes las armaduras son menos numerosas que en concreto armado. La utilización de concretos menos ricos en agua y elementos finos es allí pues, más fácil.

Es más, todo aumento de la resistencia del concreto hace posible el aumento proporcional de la de las vigas, lo que está muy lejos de ser verdad para el hormigón armado.

La consecuencia es que los concretos précontraintes, son, en término medio, más adhesivos y más resistentes a la compresión que los armados; de donde emana una tendencia justificada de las oficinas de estudios a sobrepasar los límites de los esfuerzos admitidos en concreto armado.

Es de notar que el endurecimiento bajo compresión de los concretos, al reducir en ellos la formación de microfisuras, aumenta su resistencia, principalmente a la tracción.

### *Procedimientos para poner en tensión los aceros*

#### *a) Tensión antes del vaciado*

En este procedimiento se colocan los aceros sujetos provisoriamente en órganos exteriores al concreto, a menudo en grandes longitudes, cuando se trata del amoldado en serie de piezas iguales.

Después de aflojar las fijaciones provisionarias, se cortan los hilos de acero.

La unión entre armadura y concreto que asegura la suma de las tensiones sobre éste, resulta de la adherencia; se la puede reforzar por salientes de diversas formas, por la torsión de los alambres, en grupos de dos o tres,

o, por las deformaciones sinuosas de los mismos en las zonas de adherencia. Contrariamente a una opinión difundida, aunque faisa, el valor de las adherencias es independiente de la escala de diseño.

El empleo de este procedimiento se limita a vigas independientes, generalmente de poca capacidad de carga, armadas con hilos rectos y de sección constante. Por otra parte, las tensiones totales disminuyen con las relajaciones debidas a todas las causas de contracción del concreto que actúan a partir del amoldado.

El rendimiento del acero es pues, mediocre, salvo el empleo de tasas muy elevadas de tensión.

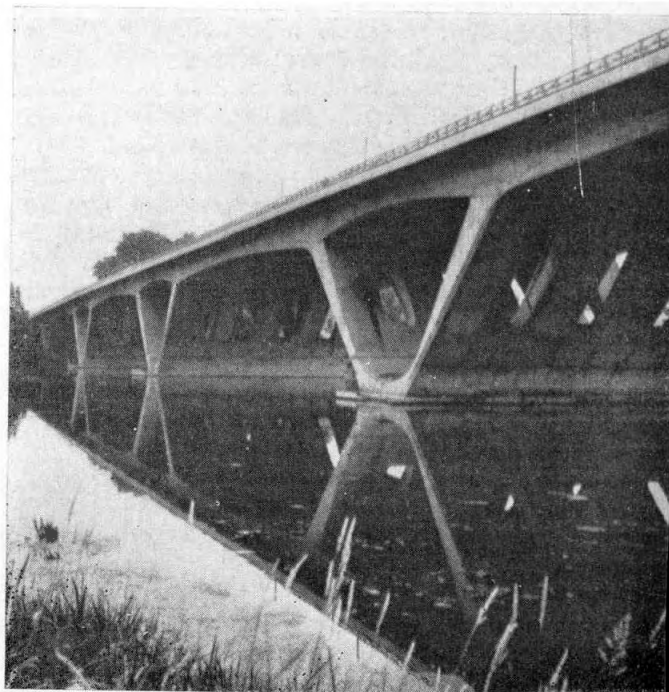
Como contrapartida de estos defectos se obtiene con facilidad un buen revestimiento de las armaduras y la mecanización puede llegar a ser muy completa. Es por esta causa que este método es muy aceptado en los EE. UU.

Se puede economizar en acero de 25 a 30% disponiendo los anclajes en puntos de moldes correspondientes a longitudes óptimas de armaduras. Yo lo he hecho en mis postes de Montargis y en las vigas de los puentes en Argel y en Alemania.

Se ha buscado, sin gran éxito, aplicar la tensión antes del vaciado en la ejecución de grandes obras amoldadas

Foto: Pierre Joly - Vera Cardot.

6



6.—Puente Saint Michel en Toulouse. Hormigón precomprimido, cinco tramos. L'Architecture D'Aujourd'hui. Octubre-Noviembre 1963.

en su emplazamiento y en armaduras curvas, apoyándose para la puesta en tensión de un grupo de hilos, sobre un núcleo de acero duro hecho de trozos sucesivos, articulados concéntricos a este grupo (Sistema Chalots Beteille)

Se puede, en fin obtener la tensión de aceros colocados en su lugar antes del vaciado, por cambio de dimensiones en el concreto, todavía plástico, hecho solidario de los hilos por fuertes presiones (Tubos de Oned Foda; pilotes de El Havre).

#### b) *Tensión después del endurecimiento*

En las obras amoldadas en su lugar se obtiene la tensión por apoyo sobre el concreto, una vez duro, lo que ofrece la ventaja de eliminar las deformaciones producidas antes de establecer este apoyo, además de disminuir los relajamientos.

En El Havre, en 1934, empotraba los extremos de las armaduras largas, (colocadas en paquetes en las ranuras), en masas de hormigón, accionando con gatos, después del endurecimiento de todos los concretos, gatos que reemplazaba por anclajes definitivos al final de la puesta en tensión.

Desde 1940 utilizo, exclusivamente grupos de hilos paralelos (llamados cables) aislados del concreto amoldado, por pinturas plásticas, vainas de papel bituminoso de diversas materias, y lo más frecuente, de acero delgado; se puede así enhebrar los cables en agujeros trabajados en el concreto. Un gato portador de los medios de fijación provisoria, realiza la tensión. Un segundo gato, contenido en el primero, realiza el anclaje definitivo, por acoplamiento entre un cono hembra, fuertemente guarnecido y un cono macho, en el concreto, el cual bajo compresión de varios millares de kg. por cm<sup>2</sup>, se vuelve plástico y asegura una unión perfecta a cada alambre a despecho de las imperfecciones de los hilos y conos.

Un canal central en las paredes constituidas por un tubo de acero muy resistente, atraviesa los conos machos y permite la inyección de todos los

vacíos entre hilos y vainas con productos a base de cemento; ello asegura la adherencia y la protección química.

Este procedimiento es todavía susceptible de perfeccionamiento, y trabajo en ello todavía. Ha suscitado un gran número de imitaciones y de variantes; a pesar de todo, mis conos equipan a la mitad de los cables que hay en uso en el mundo.

#### *Las relajaciones*

Las tensiones creadas por los estiramientos, no se mantienen en su totalidad por tres razones:

1º—La puesta en carga de un anclaje se hace con deformaciones y deslizamientos, de donde surge una relajación de anclaje importante para los cables muy cortos.

2º—Un acero tendido entre dos puntos fijos pierde una fracción de su tensión, creciente con ésta. Esta relajación varía con los aceros; es muy pequeña para ciertas calidades.

3º—Pero la causa principal de las relajaciones reside en las deformaciones del concreto, posteriores al anclaje (retracción y deformaciones diferidas).

Un gran número de medidas dan por valor medio de relajación de los cables la longitud corriente, alrededor de un 18% de la tensión inicial.

#### *Los aceros del concreto précontrainte*

En EE. UU., en Inglaterra y en Alemania, la industria suministra barras terrajadas, con límites de elasticidad relativamente elevados, que se pueden acomodar entre sí y anclar en los extremos mediante cilindros atornillados.

Mucho más frecuentemente se emplean hilos de 2 a 10 mm. de acero, mejorado con adiciones de manganeso.

Producidos al estado de alambre mecánico, son tratados por la vía térmica y por trefilado, en que un pase es suficiente para asegurar la constancia de la sección, cualidad muy importante en el estiramiento. Estos procedimientos son, con frecuencia, asociados. Los límites de ruptura van

desde 220/240 para los 2 mm. a 140/150 kg/mm<sup>2</sup>. para los 10 mm. Las aceras han aceptado (excepto en U.S.A.) despacharlos en rollos de diámetro suficientemente grande para que, al desembalarlo, el alambre esté prácticamente derecho.

#### *Cualidades que deben tener los aceros*

Las cualidades que deben pedirse a los alambres están determinadas por el aspecto muy particular que ofrecen los problemas de seguridad y de ruptura en el concreto précontrainte.

Cuando, en el curso de la carga de una construcción clásica se sobrepasa el límite de elasticidad en zonas importantes, uno es advertido por la relación carga/flexión; pero demasiado tarde; porque las deformaciones adquiridas son irreversibles y las alteraciones de la obra, definitivas.

En hormigón précontrainte, el aviso precede a la alteración y es una preciosa ventaja. Cuando se carga progresivamente una viga de igual resistencia, de hilos adherentes, se advierten primero flexiones mucho más débiles que las de una viga corriente del mismo grueso.

A partir de un primer límite de carga, después del fin de la compresión del concreto de la zona tendida la obra se comporta como una viga de concreto armado de sección de armadura anormalmente débil. La relación flexión/carga aumenta de 5 a 10 veces, aparecen numerosas fisuras; está disminuida la resistencia al cizallamiento. Pero, si se suprime la sobrecarga, antes de que alcance un segundo valor límite, correspondiente a traspasar el límite de elasticidad de la armadura, flexión y fisuras desaparecen completamente, la construcción se halla inalterada en su estado primitivo.

Para el sólo hormigón précontrainte existe pues, una carga de aviso, que corresponde más o menos a las cargas límites de las obras de tipo antiguo y que indican, al seguir, por un gran aumento las flexiones, un riesgo que no se realiza sino cuando se traspasa un segundo límite, separado del primero por un margen, siempre importante.

En efecto, el segundo límite corresponde al límite de elasticidad del acero, al menos, igual a la tensión inicial; está, pues, separado del primero por la suma de las relajaciones, aumentadas eventualmente con la diferencia existente entre el límite elástico y la tensión inicial. Un mínimo de relajación, lejos de ser perjudicial, es pues, necesario para garantizar la existencia de este margen de seguridad.

El restablecimiento de la tensión inicial que, lo más a menudo, al menos en las construcciones que yo he controlado, es superior al límite elástico del acero al salir de la usina, tiene pues, por efecto, restablecer la carga por la cual la viga pierde, a título reversible, las cualidades de concreto précontrainte.

Por consiguiente, a medida que la tensión inicial es, a lo menos, igual al límite de elasticidad, el margen que separa la carga de advertencia de la que provoca en la viga desórdenes permanentes se ensancha por el aumento de las relajaciones, consecuencia inevitable del aumento de las tensiones iniciales.

Hay, pues, interés en tensar al máximo las armaduras del précontrainte, observando solamente dos limitaciones:

—La primera resulta de la necesidad de evitar las rupturas en el curso del estiramiento, lo que impone un margen entre la tasa de tensión y la tasa de ruptura que no es función, sino de la regularidad del metal. Este margen interesa sobre todo a los ejecutantes que estiman, en general, que un valor de 10% es suficiente.

—La segunda limitación se relaciona con la seguridad de evitar la ruptura en el elemento ejecutado. Desde este punto de vista hay que distinguir dos categorías de construcciones, según el tipo de unión de las armaduras entre sí y con el concreto:

a) Hilos no adherentes y no solidarios del concreto y otros alambres.

En este caso la fragilidad de la obra es una consecuencia inevitable de la de los alambres; porque el efecto de la ruptura de un hilo, interesando toda su longitud, puede provo-

car otras rupturas, hasta el hundimiento de la viga. En este caso, la resistencia de la armadura no es sino la suma de la resistencia mínima de cada alambre.

Siendo la ausencia de fragilidad una cualidad esencial, debe obtenerse aunque sea en detrimento de la resistencia y del costo.

Por tal causa se impone una limitación de las tensiones.

Estas vigas tienen aún otro inconveniente; siendo mínima la resistencia alrededor de la aparición de la primera grieta, ésta tiende a profundizarse sin que aparezcan otras y la ruptura de la viga por destrucción del hormigón sigue muy de cerca a este primer estado, en razón a una limitación muy localizada de la altura del área comprimida del hormigón.

Es una falla muy importante de las construcciones que utilizan cables libres que no son ni económicos, ni seguros.

En las experiencias hechas en Toluca por la S. N. C. F. la carga de ruptura de las vigas inyectadas desde largo tiempo atrás, sobrepasó considerablemente a las de las vigas cuyo mortero de inyección no estaba aún endurecido.

b) Los alambres se adhieren entre sí y al concreto.

En este caso la resistencia de la armadura es la suma de las resistencias medias de los alambres (en lugar de mínima, pudiendo la diferencia ser grande). Además, son los alargamientos locales de diversos hilos en una misma sección y no ya sus tensiones, las que son iguales. Entre los efectos de una misma sección, siendo proporcionales a los módulos de alargamiento, las diferencias pueden ser considerables; un hilo puede trabajar en fase plástica entre otros todavía en fase elástica.

Si entre el alargamiento en servicio y el alargamiento de ruptura de un alambre existe un margen de alargamiento plástico, sensiblemente igual al alargamiento elástico total, el esfuerzo soportado por cada alambre, será inferior a su resistencia, aún en caso del descenso notable de ésta (a

condición que el hilo conserve su capacidad de alargamiento plástico). Esto ocurre hasta el momento en que todos los alambres, acercándose a su límite de resistencia se alargan plásticamente provocando un aumento de flexión súbito e importante que advierte que la ruptura está cercana.

En el caso de disminución de resistencia de un hilo, con alteración de su facultad de alargamiento (por destemple o corrosión) la ruptura se hace posible. Pero la pérdida de resistencia de la viga, localizada por adherencia, es insignificante, porque en una armadura hay siempre muchos kilos y es raro el caso en que, en una misma sección, varios de ellos tengan el mismo defecto, ya que normalmente su objeto es impedir la producción de tales tensiones; prácticamente el peligro en referencia, será nulo.

La fragilidad relativa de un hilo no entraña necesariamente la de la viga, cuya cualidad esencial es la resistencia misma, aunque esto signifique sacrificio de su ductibilidad.

No solamente es el mejor hilo el más resistente a la ruptura, sino aquél en que las deformaciones son más insignificantes. En efecto, las rupturas de las vigas, salvo condiciones excepcionales, se deben a aplastamiento del concreto por reducción del espesor de la zona afectada por la exagerada curvatura de deformación. De esto se deduce que la tasa de tracción útil máxima del metal, no es su tasa de ruptura sino la tasa de compresión que provoca la curvatura de la viga, que rompe el concreto.

En definitiva, los mejores aceros son aquéllos cuyo diagrama, primero rígido, produce en seguida un margen de deformación plástica que duplica o triplica la deformación elástica total, ya que ésta es necesaria para evitar rupturas sin previo aviso.

Ciertas personas que me han parecido poseían una experiencia insuficiente de los problemas del concreto précontrainte han exagerado mucho la importancia de su fragilidad, atribuyendo a ello accidentes debidos, en realidad, a errores de concepción que

han llevado a rupturas de tubos por disminución local de su resistencia o por traspaso fortuito del límite de tensión admisible.

Ciertos deslizamientos, originados en la trefiladora pueden producir desgarraduras del material o recalentamientos superficiales que provoquen temple muy duros y el consiguiente destemple. Causas químicas (corrosión fisurante) pueden también disminuir localmente la resistencia, con supresión del alargamiento plástico. Tales hilos pueden romperse sin que sea necesario hablar de fragilidad que, en este caso fue adquirida a causa de condiciones de uso defectuoso.

Así mismo, algunas cargas fortuitas imprevisibles pueden producir accidentes muy graves.

En los cables retorcidos, por ejemplo, los cordones pueden, en el curso de manipulaciones violentas, experimentar desplazamientos relativos, cambiando la carga de algunos de ellos en detrimento de otros. En Plougastel constaté personalmente una ruptura de cordones bajo una carga inferior al tercio del límite de ruptura del cable.

La utilización de cables retorcidos para précontraintes es, pues peligrosa, y si por razones particulares, hay que enfrentarse a ella, debe hacerse con grandes precauciones.

#### *Las aplicaciones del précontrainte clásico*

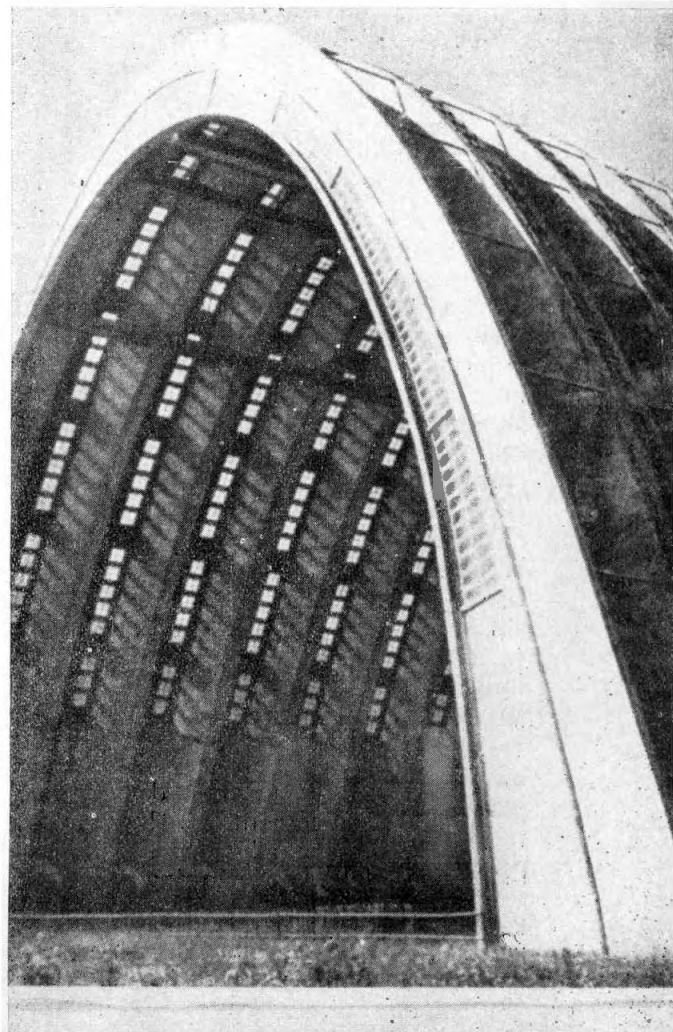
El dominio de las aplicaciones futuras del précontrainte clásico es tan vasto que las realizaciones ya hechas no pueden dar de ello, sino una idea débil. Cada día determina nuevas "direcciones y, en los medios conocidos, no estamos más que en los primeros pasos.

Cuando M. M. Brocard y Muner vinieron a pedirme que les ayudara a construir máquinas voladoras de précontrainte, creí al principio, en una broma de mal gusto. Sin embargo, los ensayos realizados, con colaboración

de los Stup han probado que, con el empleo de las técnicas antiguamente empleadas para mis postes en Bezons, el hormigón précontrainte puede llegar a ser uno de los mejores materiales para las máquinas que, más allá del sonido, se enfrentan a la muralla del calor.

El concreto pretensado o sucedáneos darán una solución que otros medios no pueden resolver, tales como las máquinas sometidas a vibraciones internas, pudiendo el précontrainte extenderse a elementos de cualquier naturaleza, fundición, acero, etc.

En este orden de ideas Sainrapt y Brice, con los consejos de la Stup, realizaron en 1951 en U. S. A., una construcción para un martillo pilón (martinete) de 8 t. de gran velocidad para la International Nickel Company. Las vibraciones engendradas por este martinete habían, casi instantá-



7.—Hangar en Orly.

neamente demolido una primera construcción de concreto armado. El edificio précontrainte sigue en pie.

Sobre un pedido de M. Caquot, estudié en 1930, para la Aviación, una prensa de 40.000 t. cuya ejecución, no fue posible debido a la invasión. Su estudio, llevado hasta el detalle hizo aparecer de enorme superioridad los edificios précontraintes con relación de los de sistemas clásicos. Sería más cara y apenas más difícil si, al multiplicarse por tres las cotas de los planos, propusiéramos una prensa de 360.000 t. Esto sería irrealizable por los medios clásicos.

El dominio de la construcción de máquinas no abordado aún en profundidad, es inmenso y ofrece posibilidades inauditas. Su única dificultad consiste en hacer colaborar albañiles y mecánicos.

Un problema como el del refugio de Lourdes es casi imposible concebir en concreto armado. El précontrainte ha hecho de él un problema fácil. Se podría, sin dificultad, triplicarle las dimensiones, lo que permitiría alojar allí 200.000 personas.

Para los cuerpos huecos: tubos, silos, el concreto précontrainte, domina sin oposición. Admite todos los diámetros y todas las presiones, sin límites. Así mismo ocurre con los puentes sobre lo que volveré más lejos.

Pero el más vasto dominio del hormigón pretensado está todavía virgen: es el mar. No cito, sino de memoria los cajones flotantes realizados en Brest, Cherburgo, El Havre, siendo sus dimensiones minúsculas, en relación con lo que será, no solamente posible, sino fácil. El mar es, en efecto, el dominio de grandes organismos y, si hasta aquí el hombre se ha mostrado modesto en sus realizaciones navales, es que, para continuarlas o para repararlas, hace de los cuerpos flotantes, objetos terrestres embarazosos y pesados.

El précontrainte al permitir establecer y suprimir uniones de enorme potencia entre elementos a flote, aporta nuevos medios a la solución de los problemas del mar: máquinas navales

a flote o submarinas, muelles flotantes o realizados en tierra, islas o torres marinas pueden, gracias al précontrainte, alcanzar dimensiones impensadas en el cuadro de los medios clásicos.

#### *Aplicaciones del pretensado diferentes del hormigón précontrainte clásico*

Al principio de estas notas señalé que la idea del précontrainte tiene posibilidades de aplicación a otros materiales que el concreto clásico y no menos importantes. Desde 1935, mis colaboradores y yo mismo, lo hemos probado por muchas realizaciones importantes y variadas. Pero esos ejemplos no han sido imitados. Estas posibilidades no han recibido todavía ninguna aplicación.

Una razón del desarrollo privilegiado del concreto précontrainte clásico es que con él se sustituye al hormigón armado en un dominio en plena explotación. No ha tenido más que extenderse en ese terreno creando su propia técnica de utilización.

Su intervención en los problemas del futuro no está aún delimitada. Sus progresos estarán ligados al nacimiento de nuevas necesidades aún difíciles de prever. Creo, sin embargo, que adquirirán un día gran importancia.

#### *El précontrainte de construcciones no dilatables*

Hay construcciones en concreto, como canalizaciones enterradas, radiers, malecones, revestimiento de subterráneos, en que la dilatación está impedida por sus uniones con el suelo, siendo muy útil y efectivo el pretensarlos.

Toda estructura está más o menos sometida a tracciones o retracciones que determinan variaciones en sus esfuerzos internos. Si se supone la creación de esfuerzos, la deformación diferida determina en tal caso, una relajación progresiva limitada.

Pero esta creación de esfuerzo está en contradicción con nuestra hipótesis de indeformabilidad. Vamos a cortar la construcción en trozos, lo su-

ficiente pequeños para que, a una indeformabilidad absoluta, sustituyan acciones de frotamientos que no sobrepasan ciertos límites que juzgamos aceptables.

Se pueden comprimir estas tajadas de dos maneras:

—Por las tracciones que actúan entre las caras opuestas de una misma tajada.

—Por compresiones entre las caras opuestas de una unión.

La primera solución implica el mantenimiento de juntas de libre dilatación cuyo espesor medio aumenta por la deformación diferida del concreto. Además que su aplicación es generalmente onerosa, este método divide la masa precomprimida, en elementos independientes, lo que es incompatible con las condiciones prácticas de la obra.

El segundo método implica el emplazamiento de las uniones de gatos hidráulicos potentes, para los cuales, una carrera corta será, en general, suficiente.

He proyectado gatos muy delgados formados por dos láminas unidas entre sí, periféricamente. Al introducir entre las láminas un líquido a presión, éstas se separan y el conjunto entero aumenta entonces de volumen.

Utilizando chapa de acero con repujado profundo de 2 mm. aproximadamente, se alcanzan presiones comprendidas entre 150-200 Kg/cm<sup>2</sup> con desplazamiento de unos pocos centímetros.

Estos gatos permiten realizar importantes precompresiones a poco costo. Uno de ellos, de 1 m<sup>2</sup>. que pesa no más de 40 Kg. ejecuta empujes de millares de toneladas.

Utilizando líquidos o agentes autofraguantes (cemento o resinas) y bloqueo entre los gatos, se pueden obtener las compresiones permanentes después de cumplidas las relajaciones inmediatas.

Se llega así a dotar a construcciones muy extensas de las propiedades de un monolito, sometido a compresiones variables entre un mínimo y un máximo, fijado después del término de las relajaciones.

Hice la primera aplicación de esta técnica al radier de la presa de las "Puertas de Acero" sobre el Oued Fodda (1935-1937). Este radier de más de 100 m. de longitud proyectado para resistir a las presiones inferiores, utilizando en ello el peso de la superestructura, estuvo comprimido contra las orillas rocosas muy sólidas, por conjunto activo central, bajo una presión inicial del orden de los 60 Kg./cm<sup>2</sup>. de la sección del concreto mantenida durante alrededor de un mes, lo que permitió materializar una fracción importante de la deformación diferida. El bloqueo se obtuvo por una adición de mortero entre dos gatos.

Mis colaboradores de la "Stup" y "Campeon Bernard" han empleado sistemas similares en las siguientes obras:

—Dique de carena en Tolón.

—Canalización subterránea o terraplenes en el norte de Africa.

—Depósitos subterráneos de petróleo.

—Diversos radies.

Hace algunos años, esperaba realizar una vasta aplicación de estos sistemas fuera de Francia. Se trataba de una gran esclusa marítima. Las autoridades, muy interesadas, aceptaban en principio mi solución. La inmensidad de fuerzas y de masas en juego hacían posibles enormes economías. Pero, cuando la empresa debió resolverse sobre un precio, los calculistas, el servicio de estudios de precios y la Dirección General, agobiados por un miedo terrible a lo nuevo, se escudaron en diversos rubros no consultados, cuyo total sobrepasaba con mucho el de las economías y que arrastraron el proyecto al fracaso.

Actualmente, la aplicación del précontrainte a masas de dilatación contenida o limitada, se revela como susceptible de vasto desenvolvimiento. Tomemos como ejemplo la pistas de aterrizaje para aviones pesados. Las cargas impuestas por los aviones modernos sobrepasan las 100 t. por rueda. Parece que se irá todavía más lejos en el porvenir. Las pistas clásicas más gruesas resisten mal estas enor-

mes cargas y se han producido ya graves accidentes.

He afirmado que las áreas pré-contraíntes continuas soportan extraordinariamente bien las cargas concentradas.

En 1949 realicé en Orly una pista de 0,16 m. de grueso precomprimido a 35 Kg. en todos sentidos, de 420 m. por 60 m. Esta pista libremente dilatada, después de 10 años de un servicio muy duro, no presenta aún señales de fatiga. Ha resistido perfectamente ensayos de sobrecarga de 100 t., repetidos un gran número de veces. Pero los artificios que permiten su dilatación sin interrupción de su continuidad mecánica son demasiado complejos para permitir su empleo generalizado.

Las juntas de dilatación de funcionamiento perfectamente seguro bajo cargas de 100 t. animadas de enorme velocidad son muy caras y gravan pesadamente el precio del m<sup>2</sup>. si están próximas. Desde que se aumenta la distancia entre las juntas para reducir su número, el frotamiento de la pista sobre el terreno introduce variaciones del esfuerzo de precompresión que alcanza a los 20 kg/cm<sup>2</sup>. al medio de un tramo de 200 m. entre juntas, lo que convierte en extremadamente oneroso un pretensado con cables. Es por eso que el empleo de losas continuas, sin juntas prácticamente soldadas al piso por el pré-contraínte y no dilatables, ha sido adoptado a pesar de las dificultades enormes que ocasionan las grandes variaciones climáticas en los pretensados que, en Francia y Argelia sobrepasan probablemente 60 kg/cm<sup>2</sup>.; necesidad de evitar las menores salientes sobre la pista de rodamiento; fijación de los extremos de las pistas por estribos capaces de resistir sin ninguna deformación permanente, al máximo de choques aún muy excepcionales y de corta duración.

La dirección del puerto de París ha hecho construir en Orly, en 1953, por Campenon Bernard una taxi-vía de 25 x 400 m. x 0,18 m. de espesor, dotada de precompresión transversal de 18 kg/cm<sup>2</sup>. suministrada por cables.

Longitudinalmente la dilatación no es libre, salvo en los extremos, donde son posibles ciertas deformaciones, gracias a una acción elástica entre el empalme de las pistas y los topes, establecida a fin de limitar la acción local de los empujes sufridos por éstos, bajo el efecto de las dilataciones. Los pré-contraíntes longitudinales varían, pues, muy notablemente alrededor de un medio diverso.

En 1955, el aeropuerto de Argel hizo construir por Campenon Bernard la pista de Casa Blanca y su taxi-vía (2.430 x 60 m. de 2.430 x 25 m.) pretensados transversalmente a 18 kg/cm<sup>2</sup>. por cables; su dilatación está impedida por los extremos por 2 apoyos a los cuales están unidos directamente, como en Orly. El papel de esta ligazón elástica es limitar el empuje de las vecindades del valor medio del pretensado, en lugar de un valor máximo, desconocido y probablemente, muy elevado. Perfectamente bien realizado por la empresa Campenon Bernard, esta pista se comporta bien hasta el presente. Es admisible que estos ejemplos sean imitados, con los perfeccionamientos sugeridos por la experiencia.

Se procura actualmente extender estas técnicas a calzadas camineras a las cuales darán resistencia sobresaliente, aún en suelos muy malos.

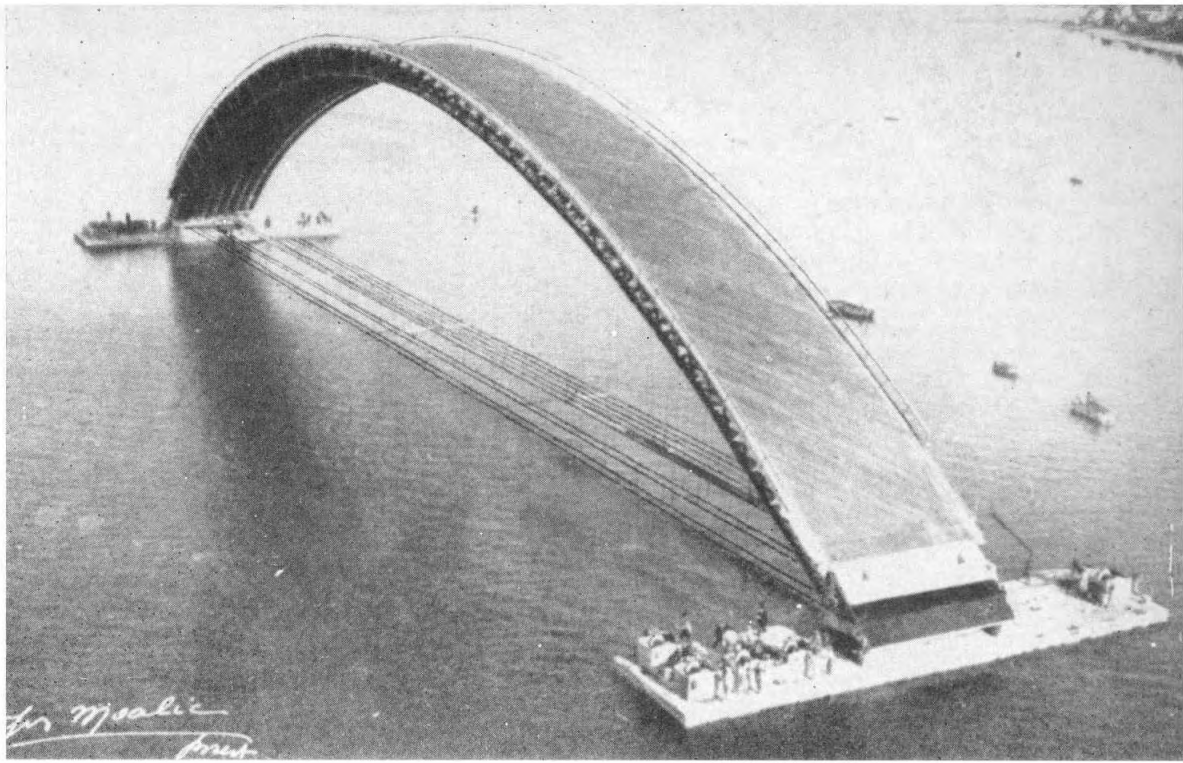
#### *El pré-contraínte de los suelos*

Este dominio es tan variado que debo limitarme a esbozar algunas aplicaciones. Hay técnicas muy antiguas, como la compresión del fango por cargas o por pisones en forma de conos truncados practicado desde muy antiguo en Holanda. Disponiendo gracias a mis gatos planos, de medios de compresión baratos y muy potentes, me ha venido la idea de utilizarlos para transformar la reacción de los suelos de apoyo de las obras.

#### *Presa de Beni Badhel*

En 1938 tuve que resolver los problemas presentados por la elevación en 7 metros de altura, ya muy grande, de la presa de bóvedas múltiples de





8

8.—Cimbra flotante para el puente de Plougastel. Reproducida de Razón y Ser de los tipos estructurales de Eduardo Torroja.

Beni-Badhel sobre el Tafnar (Argelia, Departamento de Orán).

Se había pensado en alargar los contrafuertes unos 10 metros río abajo; pero en razón del cambio de condiciones de ejecución del apoyo entre las partes antiguas y las nuevas, agravado por la irregularidad del terreno, se temieron fisuraciones. Ya lo que pasa en un contrafuerte de 100 m. de longitud y ejecutado en condiciones normales y expuesto a violentas variaciones termo-higrométricas y a variaciones de carga, no es ni fácil de comprender, ni tranquilizador.

Propuse conservar los contrafuertes antiguos salvo verticalizar la parte superior de su sección baja y el reforzamiento de la parte alta, con vigas pretensadas por cables. Pero sometí la base a empujes, cuya cuantía y direcciones las hice independientes de las deformaciones eventuales del suelo, mediante baterías de gatos planos que se apoyaban mediante prismas de concreto, en los macizos establecidos más abajo, de las antiguas fundaciones. Estas presiones que, para ciertos contrafuertes pueden sobrepasar las 20.000 t., en el caso de

máxima coincidencia de temperatura y de altura del agua, se combinan con el peso y los empujes para crear condiciones de equilibrio que resultan ser más favorables, a pesar de la sobre-elevación, que las condiciones antiguas.

Otra dificultad importante de la reedificación provenía de que las condiciones de apoyo de las bóvedas terminales en los flancos del valle, ya mediocres, se hacían muy malas a causa de la mayor elevación lo que hacía casi paralela a las fisuras de la roca, la dirección de los empujes.

Esto lo resolví por un précontrainte del terreno, paralelo al muro de la presa, obtenido por apoyos normales a los contrafuertes que iban de la primera a la última bóveda, puestos en précontrainte por juntas activas creadas entre dos contrafuertes sucesivos.

L. E. G. A. ha empleado las mismas soluciones, en escala superior, para la enorme represa de bóvedas múltiples del Djem-Djem (Argelia, Departamento de Constantina). La potencia del muro activo podrá, en efecto, sobrepasar las 40.000 t. por contrafuerte.

Además, 5 contrafuertes dirigidos perpendicularmente a los que reciben las bóvedas, darán un pretensado de 5x8.000 t. al terreno de apoyo de la última bóveda de la izquierda que, sin este reforzamiento, no podría soportar el muro de estribo de la misma.

#### *Pretensados de los suelos fangosos*

Gracias al benévolo apoyo del señor Inspector General Rumpler, Director de Caminos, hemos podido tener éxito en el Marne en una experiencia consistente en la construcción, en una usina central, con elementos transportados por vía acuática de 5 grandes puentes pretensados, en forma de arcos quebrados cerca de los apoyos notables por su rebaje desacostumbrado, (distancia entre articulaciones 74 m., flecha 4,35 m., capacidad máxima 2.000 t.) en consecuencia muy sensible al menos desplazamiento de los estribos.

Además, los arcos se apoyan casi siempre en terreno de muy débil consistencia, por cuanto las posibilidades económicas excluyen toda idea de buscar apoyo en terreno sólido que habría sido necesario buscar a gran profundidad.

Siendo la carga máxima de 2.000 t. se puede considerar que una masa de terraplén de 10.000 t. formaría un estribo suficiente si se la pudiera solidarizar rígidamente con el arranque de los arcos.

Para realizar esta solidarización se lleva primero el peso de cada medio arco a un estribo sobre pilotes, sin resistencia al empuje horizontal; se les apoya en 2 apoyos de concreto longitudinales, formados de elementos sucesivos que se afirman cada uno por juntas provistas de gatos, contra láminas transversales embutidas en el terraplén al nivel del agua. Comenzando por la más lejana del puente, cada lámina recibe un empuje dirigido hacia atrás netamente superior al esfuerzo máximo y, por el cual esta lámina debería contribuir a la estabilidad del puente, bajo este empuje que crea un verdadero précontrainte del terreno. La lámina sufre un desplazamiento

hacia atrás lento y progresivo, y se mantiene al impulso X en tanto que no cese de moverse. Es por lo demás, necesariamente limitado si el impulso X es menor que la diferencia entre los empujes mínimo y máximo del terreno y, una vez que haya terminado, la lámina queda inmóvil bajo todos los impulsos menores que X, como Y por ejemplo.

Los puentes tienen ya 8 años y ningún estribo ha fallado.

—Túneles y canalizaciones.

Sí, tratándose de un revestimiento de túnel se ejerce, entre trozos sucesivos de una parte, entre el revestimiento y la tierra, de otra parte, una presión suficiente, se obtiene un doble resultado. Se mejora el equilibrio del suelo, acercándolo a lo que existía antes de la apertura del túnel y, si el revestimiento es continuo, el túnel resiste a toda presión líquida interior, inferior a la presión radial creada. Esta presión radial puede ser obtenida, sea directamente por gatos colocados entre el concreto y el terreno que se ha reemplazado, a veces por inyecciones de colgraut bajo presión, sea indirectamente por aumento del diámetro del revestimiento mediante gatos colocados en las juntas normales. Se puede aún imaginar procesos de perforación en los cuales la aplicación de presiones entre revestimiento y suelo serían condicionados a manera de prevenir toda descompresión.

Los empresarios Campenon Bernard han utilizado en numerosas reparaciones esquemas de este género en diversas obras: canalización o depósitos.

Me propongo indicar en un próximo artículo medios que permitan realizar canalizaciones de este género, por diámetros y presiones nunca contempladas todavía.

#### *Los "précontraintes" internos*

Cuando se rompe un prisma de concreto entre dos superficies de apoyo engrasadas, se divide en prismas, bajo la acción de fuerzas interiores normales a la presión.

Se puede oponer précontraintes a estas fuerzas interiores.

Entre la acción de tales fuerzas y un zunchado hay la misma diferencia que entre la acción de un précontrainte y una armadura de concreto armado. Se sabe que, cuando se comprime el concreto zunchado, los zunchos no actúan sino después de ponerlos en tensión, es decir, después de importantes deformaciones plásticas del concreto, sin aumento de la carga, lo que en particular, suprime toda resistencia al pandeo de una pieza zunchada, sometida a una carga del orden de la resistencia a ruptura de una pieza no zunchada.

Al contrario, el concreto sometido a précontraintes internos conserva su estructura y leyes de deformaciones regulares.

Se obtiene por este medio, materiales de resistencia tan elevada como uno lo desee.

Supongamos un cilindro zunchado por un hilo de acero en tensión, a manera de crear una presión hidroestática  $P$ , por ejemplo, por un sistema de gatos planos, localizados en el concreto, aumentaremos a  $KP$  la resistencia del cilindro.  $K$  se puede determinar por ensayos.

Utilizando agregados muy duros y una granulometría adecuada, se pueden obtener concretos que posean un límite elástico de más de  $2.000 \text{ kg/cm}^2$ , equivalente, a pesos iguales, a aceros del tipo de los que pueden trabajarse o soldarse semejantes a los obtenidos por forja, y esta resistencia podría aumentarse todavía, incorporando en el concreto armaduras longitudinales, de muy alto límite elástico. Por procedimientos derivados de este principio, se pueden crear elementos de puentes de tal resistencia que ningún otro método permitiría obtener, y dar al problema de la gran distancia entre apoyos, soluciones muy diferentes a la de los puentes colgantes, sin los graves defectos que estas obras acusan.

