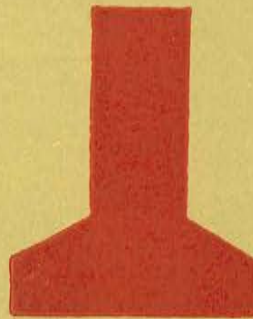
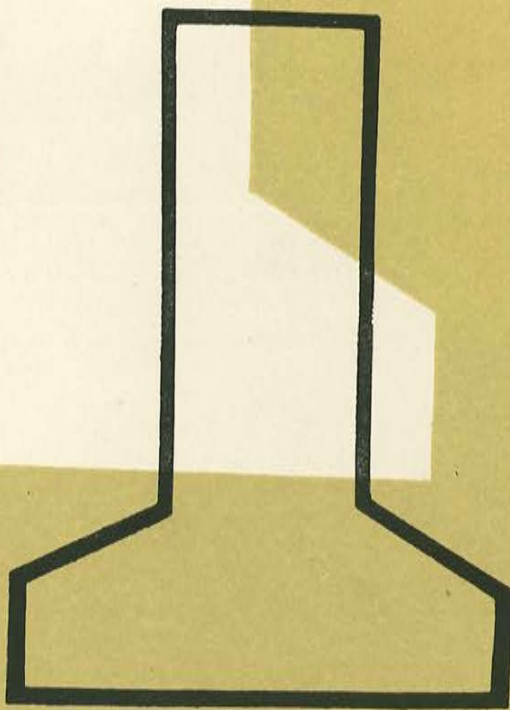


ULTIMAS NOTICIAS SOBRE

# hormigón pretensado



BOLETIN NUM. 28 DE LA ASOCIACION ESPAÑOLA DEL HORMIGON PRETENSADO  
DEL INSTITUTO TECNICO DE LA CONSTRUCCION Y DEL CEMENTO

a

CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTIFICAS  
Patronato "Juan de la Cierva" de Investigación Técnica



U L T I M A S   N O T I C I A S  
Técnicas en Estructuras  
Hormigón Pretensado  
Boletín de circulación limitada  
No 28

Septiembre-October 1955

- INSTITUTO TECNICO DE LA CONSTRUCCION Y DEL CEMENTO -

I N D I C E  
=====

457-0-17	1º.-- Consideraciones prácticas sobre el pretensado con cables: El problema de los rozamientos: M.J. Montagnon	pág. 1
	2º.-- Noticias varias:	
	El Profesor Magnel, ha fallecido .	" 37
	Nuevo Vice-presidente General de la F.I.P. . . . . .	" 39
	II Congreso Internacional de la -- F.I.P. . . . . .	" 40
	Cursillo de hormigón pretensado .	" 43

- - -

Nota: El Instituto, una de cuyas finalidades es divulgar los trabajos de investigación sobre la construcción y edificación, no se hace responsable del contenido de ningún artículo, y el hecho de que patrocine su difusión no implica, en modo alguno, conformidad con la tesis expuesta.



457-0-17 CONSIDERACIONES PRACTICAS SOBRE EL PRETENSADO CON CABLES;  
EL PROBLEMA DE LOS ROZAMIENTOS

(Aspects pratiques de la précontrainte par cables: Le probleme des frottements)

Autor: M. J. Montagnon

"ANNALES DE L'INSTITUT TECHNIQUE DU BÂTIMENT ET DES TRAVAUX PUBLICS",  
Junio, 1954

- S i n o p s i s -

En las obras pretensadas mediante cables o haces de alambres de acero, tesos después de fraguar el hormigón, se producen una serie de rozamientos que se oponen a la transmisión de los esfuerzos introducidos por los gatos, a las zonas de la armadura situadas en las secciones de las piezas en las cuales es mayor la sollicitación.

El conocimiento de las pérdidas de tensión que originan dichos rozamientos, así como el del grado de confianza que cabe depositar en los aparatos empleados, es fundamental para el proyectista que debe disponer, por lo tanto, de un procedimiento cómodo y sencillo para valorarlos.

Después de una serie de laboriosos ensayos, efectuados con el fin de determinar las leyes y coeficientes de transmisión de los esfuerzos, el autor del presente artículo, ha deducido un método gráfico que sirve para valorar dichas pérdidas sin tener que recurrir a los engorrosos cálculos, en los que intervienen leyes exponenciales. Este método permite, con sólo medir las tensiones y los alargamientos producidos por cada operación de puesta en carga, determinar, de un modo rápido y sencillo, las pérdidas originadas por los rozamientos; sin obstaculizar en ningún momento la marcha normal de la obra. Una vez conocidas estas pérdidas, fácilmente, se deduce la ley de distribución de las tensiones a lo largo de las armaduras pretesas.

-- -- --

## I Introducción

El comportamiento de una estructura de hormigón pretensado, tanto durante el período de su vida normal como en su fase de construcción, o bajo un exceso de cargas, está directamente ligado a la magnitud del esfuerzo de pretensado que se ejerce sobre ella en cada instante.

Dicho esfuerzo de pretensado, cuando se crea por medio de armaduras de acero, depende de la sección, posición, orientación de los cables y magnitud de la tensión a que están sometidos. Todos estos parámetros los determina el proyectista en función de las distintas hipótesis utilizadas para efectuar el cálculo.

Los tres primeros factores, una vez conocidos, permanecen prácticamente invariables, tanto en el espacio como a través del tiempo -salvo en el caso excepcional de una destrucción del acero por corrosión-; por el contrario, la magnitud de la tensión no permanece, por lo general, constante ni en el espacio ni a lo largo del tiempo y sus variaciones pueden llegar a representar un tanto por ciento muy elevado del valor de dicha tensión, adoptado en los cálculos.

### Caídas de tensión

Para efectuar el estudio de las variaciones de la tensión, a lo largo del tiempo, es necesario analizar los fenómenos que las originan, y que son:

- Acortamiento elástico del hormigón durante la ejecución del pretensado y su retracción normal.



- Deformación lenta, bajo carga, del acero de los cables que ejercen el pretensado.
- Acortamiento elástico diferido y deformación lenta del hormigón, sometido a una compresión permanente.

El examen aislado de cada uno de estos fenómenos no permite conocer exactamente los resultados de su acción conjunta, ya que, actuando simultáneamente en el mismo sentido, se superponen unos a otros, pero sin sumarse matemáticamente. Su estudio debe prolongarse durante bastante tiempo -dos años por lo menos-. En los "Laboratoires du Bâtiment & des Travaux Publics" se ha iniciado una investigación de este tipo, que ha sido ya objeto de una interesante comunicación presentada por M. Dawance. Un segundo ensayo, efectuado a mayor escala, se ha llevado a cabo durante la construcción del puente de "La Trave", siguiendo el procedimiento que más adelante se indicará.

El análisis de las variaciones, de la tensión a través del tiempo -variaciones que se designarán con el término "Caídas de tensión"- constituye un campo de experimentación extraordinariamente amplio; pero, por no ser este el objeto del presente trabajo, no se hace más que mencionarlo con el fin de dejar perfectamente definido el tema que aquí se estudia.

### Pérdidas de tensión

El estudio de las variaciones de tensión en el espacio se refiere a la distribución de las tensiones, a lo largo de las armaduras, en el momento en que se efectúa el pretensado de la estructura.

Una vez que el proyectista ha determinado la magnitud de las tensiones a que deben someterse los cables, teniendo en cuenta las caídas de tensión que, a lo largo del tiempo, se originarán a consecuencia de los distintos fenómenos señalados anteriormente, es necesario encontrar la forma de poder llevar a la práctica el programa previsto.

Se trata, por una parte, de conocer el grado de seguridad y precisión, tanto de los aparatos utilizados para la puesta en obra como de los que se emplean en las distintas mediciones; es decir, interesa conocer, con la mayor aproximación posible, la verdadera tensión inicial en el extremo del cable. Por otra parte, hay que descubrir y valorar las causas de los errores sistemáticos que se oponen a la propagación de la tensión a lo largo del cable. Dichas causas son, esencialmente, las "pérdidas de tensión" así denominadas para diferenciarlas de las "caídas de tensión" anteriormente definidas; es decir que las "pérdidas de tensión" son las que se producen a lo largo de las armaduras de pretensado, bajo los efectos de los rozamientos que se originan durante las operaciones de teso.

Antes de abordar el estudio del problema de las "pérdidas de tensión" conviene recordar, aunque sólo sea someramente, las condiciones en que se realiza el pretensado:

## II Obtención, en la práctica, de las tensiones prescritas

### I) Medios utilizados

Se considerarán únicamente los cables de pretensado clásicos; es decir, los constituidos por un haz de alambres paralelos



al eje del cable y que se deslizan libremente a lo largo de los conductos, a tal efecto, dispuestos en el cuerpo de la pieza. Estos cables están formados, habitualmente, por doce alambres de 5 ó 7 milímetros, o dieciocho alambres de 5 milímetros, aunque este último tipo tiende a desaparecer.

Las tensiones unitarias de estos cables son, por lo general, las siguientes:

20 toneladas,	para los cables de	12 $\phi$ 5	(fig. 1)		
30	"	"	"	"	18 $\phi$ 5
40	"	"	"	"	12 $\phi$ 7

Estas cifras son sólo aproximadas pudiéndose, según sea la calidad del acero o la magnitud del esfuerzo de pretensado que se desea introducir, aumentarlas sensiblemente.

Para tesar estos cables se utilizan gatos hidráulicos de doble o triple efecto, y se mantienen en tensión mediante los ya bien conocidos conos de anclaje (fig. 2).

El tesado se comprueba, por una parte, mediante la presión ejercida en el gato, y por otra, mediante el alargamiento que sufre el cable. Estos dos métodos, en realidad, se complementan: el primero, indica sólo la magnitud de la tensión aplicada al cable por el gato; en cambio, el segundo, permite comprobar si la tensión se transmite adecuadamente de un extremo al otro del cable. Por lo tanto, es indispensable, efectuar simultáneamente ambas comprobaciones, cuando se quiere conocer si la tensión alcanzada en una determinada sección coincide realmente con la prevista en el cálculo. Para conocer el alargamiento que experimentan los alambres se hacen, sobre --



ellos, unos trazos que disten una longitud dada del cono de anclaje. El recorrido relativo de estos trazos, respecto al cono, medido en milímetros por medio de una reglilla graduada, indica el alargamiento del cable. Este valor puede ser diferente del recorrido del gato, debido a que éste, antes de la puesta en carga, nunca queda exactamente ajustado contra el cono y además porque, a medida que se hace el tesado, los alambres tienden a penetrar ligeramente en las mordazas del anclaje, arrastrando, a su vez, a las clavijas que las fijan.

Durante las operaciones de tesado no debe colocarse nadie detrás de los gatos; ya que en el caso de que, bruscamente, se suelte o rompa uno de los alambres, las clavijas de fijación salen lanzadas, a veces con violencia y siempre hacia atrás. Por el contrario, no se corre ningún riesgo situándose a los lados de los gatos, pudiéndose así medir, sin ningún peligro, los alargamientos de los cables.

En la práctica, las operaciones suelen realizarse de la siguiente forma: un equipo, compuesto por dos operarios para cada grupo gato-bomba, hace el tesado bajo la dirección de un jefe de equipo o vigilante, que es el encargado de ordenar las operaciones de acuerdo con las instrucciones de un cuadro, preparado de antemano, en el que se indican la tensión y el alargamiento que debe darse a cada cable. Pueden hacerse medidas durante las distintas etapas del protensado, pero únicamente deben ser consignados los resultados finales; esto es, la tensión total ejercida y el alargamiento efectivo. La obtención de este último dato constituye realmente la verdadera finalidad de cada operación; puesto que, como se

verá más adelante, el valor de la tensión sólo se anota para conocer el orden de magnitud.

Conviene, ahora, examinar los obstáculos que se oponen a la consecución del esfuerzo de pretensado previsto, así como, las causas de los errores que dan lugar al falseamiento de los resultados de las operaciones realizadas y el orden de magnitud de dichos errores. En efecto, si uno de los cables que se tesan tiene una longitud "L" y debe ser sometido a una tensión máxima "T", a la que corresponde un alargamiento unitario "a"; el alargamiento total "A" no será igual a "a x L", más que en el caso de que el cable sea rectilíneo, está totalmente suelto y la tensión, efectivamente ejercida, sea exactamente la tensión "T" prevista.

## 2) Errores fortuitos

Estos afectan, esencialmente, a los manómetros que son, por naturaleza, instrumentos que se descorrigen muy fácilmente cuando reciben golpes; cosa muy frecuente en las obras.

Por lo tanto, resulta necesario examinarlos periódicamente y, como medida de prudencia, conviene comprobar, cada día, si las medidas de los dos manómetros empleados concuerdan con las de otro manómetro, testigo, cuidadosamente conservado en la obra. La experiencia ha demostrado que, incluso con los instrumentos más perfeccionados (manómetros, en baño de glicerina), resulta ilusorio garantizar sus indicaciones con una precisión superior a + 2%. Este margen es, por otra parte, más que suficiente, como se verá más adelante.



### 3) Errores sistemáticos

#### a) Sección de los alambres

Las normas imponen, para los alambros empleados, una tolerancia, en el calibrado, de  $0 - 0,2$  milímetros; es decir, que el diámetro de estos alambros estará comprendido entre 5 y 5,2 milímetros, o entre 7 y 7,2 milímetros. La sección debe ser exactamente circular. En la práctica, las hileras que se emplean para calibrar los alambres tienen, inicialmente, un diámetro de 5 ó 7 milímetros y se dejan de utilizar cuando su diámetro llega a 5,2 ó 7,2 milímetros. La sección media es, por lo tanto, superior a la teórica en un 4% para el caso del alambre de 5 milímetros y en un 3% para el de 7 milímetros. Si lo que se mide es el esfuerzo de pretensado ejercido, este error no tiene ninguna importancia, pero si lo que se pretende es deducir dicho esfuerzo por el alargamiento observado, se comete un error sistemático no despreciable.

#### b) Pérdidas en el conjunto gato-cono

El funcionamiento de los gatos Freyssinet, para cables de  $12 \phi 5$ , ideados en 1943, se indica en el esquema de la figura 3. Las principales causas que originan pérdidas en la tensión introducida por los gatos, son tres:

- 1<sup>a</sup> La resistencia del muelle de recuperación, que varía, según el recorrido del gato, entre 200 y 400 kg.
- 2<sup>a</sup> Rozamientos internos de los gatos, debidos, principalmente, a los roces de las juntas de cuero con los cilindros y que dan lugar a una pérdida de presión sensiblemente proporcional al esfuerzo desarrollado por el gato, y del orden del 1% de dicho esfuerzo.



3<sup>a</sup> Rozamientos de los alambres al pasar por el cono y sobre el anillo exterior del gato. Este doble cambio de dirección provoca una pérdida de tensión en los alambres, que varía según el estado de la superficie del acero, entre el 6 y el 8%. La diferencia total entre la tensión del cable al salir del cono y la tensión teórica correspondiente a la presión ejercida oscila, para los gatos del modelo antiguo, entre el 8 y el 10%.

En los modelos de gatos, posteriores a 1950 se ha suprimido el cambio de dirección de los alambres en el cuerpo del gato; haciendo que la abertura del haz de alambres en la posición inicial, esto es, cuando se sujetan a las mordazas, sea mayor que en la posición final, es decir cuando el cable está sometido a la máxima carga. Este artificio de construcción, unido a la sustitución de las juntas de cuero por anillos de caucho, permite reducir la pérdida total del conjunto gato-cono a un valor relativo que varía del 4 al 5%. Además, en los gatos, del tipo 53 empezados a utilizar en 1954, (fig. 4) se ha introducido un mecanismo que permite soltar los cables automáticamente sin necesidad de tener que emplear el muelle de recuperación; reduciéndose así aún más la pérdida interna.

c) Rozamientos de los cables en el interior de la pieza

Este es el punto más interesante del problema y su estudio constituye el objeto de los dos siguientes capítulos.

### III Estudio del rozamiento de los cables en el interior de la pieza

Dos son las formas más corrientes de colocar los cables: introduciéndolos en la pieza después de haber fraguado el hormigón o colocándolos en el encofrado antes de hacer el hormigonado (fig. 5). En el primer caso se hacen pasar los alambres por unos conductos especialmente formados en la masa del hormigón al moldear el elemento; en el segundo, la armadura se introduce en unas vainas o fundas aislantes dispuestas adecuadamente en el encofrado y siguiendo el trazado conveniente.

#### 1) Cables introducidos en la pieza ya fabricada

Este método de puesta en obra, sólo se utiliza en el caso de piezas de longitud relativamente pequeña -en la práctica de menos de 25 metros-. Generalmente, en estos casos, el cable desempeña una doble función: la de unir los distintos elementos que constituyen la pieza y la, fundamental, de crear el pretensado de la estructura. Como ejemplo puede citarse el pretensado transversal de las vigas de un puente y los cables suplementarios utilizados para asegurar la continuidad sobre los apoyos de las vigas pretensadas.

Es evidente que los conductos por donde han de pasar los cables deben ser lo más rectos posibles, a fin de facilitar el enfilado de los alambres a lo largo de la pieza. Para formar estos conductos los medios empleados varían desde el tubo metálico rígido al de caucho, rigidizado mediante un fleje de acero, pasando por el "ductube" inflado con aire.



El diámetro del conducto es, generalmente, y por la misma razón, bastante mayor que el diámetro del cable así las pequeñas desviaciones del conducto no dan lugar a desviaciones sensibles del cable. De esta forma no existen rozamientos más que en las partes curvas, en las cuales se produce el efecto clásico de una pérdida de tensión, que viene dada por la siguiente ecuación exponencial, en función del ángulo de desviación:  $T = T_0 e^{-f\alpha}$

Si el cable está colocado, sin recubrimiento alguno, en el interior del conducto, el coeficiente de rozamiento entre el acero y el hormigón es, naturalmente, muy elevado: del orden del 0,5 al 0,6%; pero este coeficiente puede rebajarse engrasando el cable o mediante otro artificio cualquiera que facilite su deslizamiento.- Así, por ejemplo, suele recubrirse la armadura con láminas metálicas muy delgadas, anillos, muelles helicoidales, o simplemente un tubo por cuyo interior corre el cable. Los ensayos efectuados sobre este particular, por la "Cement Concrete Association", han dado los siguientes resultados:

Cables de 12  $\phi$  5 milímetros pasando por conductos especialmente preparados al hormigonar la pieza:

	Valores de f (1)
1 Para conductos de acero	0,55
2 Para ductube	0,55
3 Para "ductube" sujeto, a intervalos regulares, por anillos de acero que se apoyan en el hormigón.	0,35
4 Para "ductube" con tubo de plástico, enrollado en hélice, de 25 mm de paso, alrededor del cable.	0,35

(1) Estos valores de f representan la pérdida total, que más adelante se descompone en: una pérdida normal por deslizamiento  $\lambda$  y en un aumento de pérdida  $\psi$  por desviación angular.



- 5 Para "ductube" con interposición de una funda plástica lubricada. 0,25

Conviene recordar también los resultados de los ensayos citados por M. Guyon, en su libro sobre hormigón pretensado, en donde se indica que para cables de 12  $\phi$  5 milímetros, no engrasados y colocados en tubos metálicos desnudos, el coeficiente  $f$  vale 0,35, coeficiente que se reduce al 0,20 cuando los cables están engrasados y envueltos en una funda metálica.

Se ve, por consiguiente, que según las precauciones tomadas y según la naturaleza y el estado de las superficies en contacto, la pérdida de tensión, originada por la curvatura de los cables, puede variar de uno a tres.

Pero, este no es más que uno de los aspectos del problema de los rozamientos. En él no se tiene en cuenta la pérdida de tensión a lo largo del cable, bien porque no se produce (caso de un cable perfectamente recto introducido en un conducto suficientemente amplio), o bien porque dicha pérdida sea despreciable en comparación con la que se origina en la parte curva de su trazado (cables con fuertes desviaciones o cables suplementarios sobre los apoyos).

## 2) Cables enfundados y embutidos en el hormigón

A continuación, se estudia el caso más general de los cables colocados en los encofrados, antes de hormigonar, y cuya adherencia con el hormigón se impide envolviéndolos en una funda aislante. En la práctica, estos cables pueden alcanzar, con facilidad, una longitud de 60 metros y desviaciones de 20 a 30° en sus extremos.

a) Cables enfundados en papel

Entre 1945 y 1948, para aislar los cables se utilizaban, generalmente, fundas de papel con interposición de un lubricante bituminoso. Primeramente, se impregnaba con betún el haz de alambres y después se le recubría con una o dos capas de papel Kraft, de un modo análogo a como se hace en los cables telefónicos (fig.6)

Evidentemente, este recubrimiento, al oprimir el cable de un modo continuo, originaba una pérdida lineal de tensión bastante sensible. El coeficiente de rozamiento era función de la presión ejercida sobre los alambres por el recubrimiento, y dicho recubrimiento estaba sometido, a su vez, a la presión del hormigón circundante; además, la viscosidad del lubricante empleado influía notablemente.

Con el fin de determinar este coeficiente de rozamiento se han realizado diversas experiencias en el canal de ensayos de Carènes (en Toulouse) y en la pasarela de "Pros-do-Vaux" (en Besançon).

Canal de ensayos de Carènes (fig. 7)

El procedimiento seguido en estos ensayos era el siguiente: En el recubrimiento de los cables se practicaban unas aberturas que dejaban al descubierto trozos de los alambres, sobre los cuales se marcaban unas señales. Durante el tesado, se medía el recorrido relativo de estas señales, determinándose así el alargamiento experimentado por los trozos del cable comprendidos entre las marcas.

Los ensayos se hicieron con dos cables, de gran longitud (65 metros), tesos por uno solo de sus extremos, y las señales de los alambres distaban entre sí 15 metros. Las lecturas se hicie-



ron con una aproximación de medio milímetro. De esta forma, se pudo determinar, con bastante precisión, la ley de distribución de las tensiones. Esta ley resultó ser, exactamente, una función exponencial de la distancia al gato. Según se pudo comprobar durante los días siguientes al ensayo y bajo los efectos de las variaciones térmicas originadas por la insolación, las tensiones presentaban una cierta tendencia a igualarse, tendencia que desapareció a los pocos días, pero que hizo bascular el diagrama de tensiones en la forma indicada por la figura 8.

Se hizo, entonces, un retesado que permitió aumentar en algunos centímetros el alargamiento de los cables, observándose después un nuevo basculamiento del diagrama, que, finalmente, quedó, -prácticamente, estabilizado a los cinco días.

En las experiencias hechas sobre esos dos cables de 65 metros de longitud se dedujo, como ley de distribución inmediata de tensiones, la siguiente:  $T = T_0 e^{-\frac{x}{52}}$  y como ley de distribución después de la estabilización:  $T = T_0 e^{-\frac{x}{57}}$ . Como consecuencia se ve que la pérdida lineal de tensión por rozamiento fué del orden del 1,8% por metro.

Posteriormente, se comprobó la exactitud de esta ley en todos los demás cables longitudinales de la obra, cuyas longitudes estaban comprendidas entre los 20 y los 70 metros.

Para ello, se hizo lo siguiente: Sobre un gráfico, se dibujó la ley de distribución de tensiones, en función de las distancias al gato, y después se trazó, por puntos, la curva de alargamientos unitarios correspondiente al acero utilizado. En estas condiciones el área comprendida entre esta última curva y el eje de las



x, desde el origen hasta una abscisa "L", representa el alargamiento de un cable, de longitud "L", cuya ley de distribución de tensiones coincida con la señalada anteriormente.

De esta forma, se calcula la media de los alargamientos correspondientes a cada clase de cables, y los valores así obtenidos se llevan sobre el gráfico, representado en la figura 9. Según se ve, los puntos así determinados coinciden, con suficiente aproximación, con la curva integral de los alargamientos, lo que demuestra que la ley encontrada se ajusta mucho a la realidad.

Hay, sin embargo, una excepción que confirma la regla. El punto representativo de los cables de 20 metros está situado por debajo de la curva. Esto se debe, sencillamente, a que para los cables de corta longitud, el alargamiento prescrito se obtuvo antes de alcanzar, en el extremo del cable, la tensión máxima autorizada, de  $115 \text{ kg/mm}^2$ .

Los resultados obtenidos en el canal de ensayos de Carones resultaron bastante desfavorables; pero conviene señalar que el producto utilizado para facilitar el deslizamiento era secante y relativamente espeso; que los cables, que habían sido preparados con un mes de anticipación, no llevaban más que un enrollamiento, esto es, dos espesores de papel Kraft, y que, además, estaban rodeados de un hormigón bastante plástico que originaba una presión hidrostática bastante fuerte.

#### Pasarela de "Prés de Vaux"

El segundo estudio sobre cables con recubrimiento de papel Kraft fué hecho en la pasarela de "Prés de Vaux". Para este en-

sayo se mejoró la preparación de los cables, a la vista de los resultados obtenidos en Toulouse. Como lubricante se empleó "Road Oil" y los cables se recubrieron con cuatro capas de papel Kraft. En estas condiciones los resultados obtenidos fueron más satisfactorios. La ley de distribución de tensiones venía dada por la fórmula:  $T = T_0 e^{-\frac{x}{2T_0}}$  es decir, que el coeficiente lineal de pérdida se redujo a menos del 0,5% por metro. Este ensayo se describe, con todo detalle, en el libro, de M. Guyon, sobre hormigón pretensado.

Actualmente, estos dos ensayos no tienen ya más que un interés histórico, porque el recubrimiento con papel ha quedado abandonado, habiendo sido sustituido por las fundas metálicas dobladas. No obstante, en ciertos países, y en Inglaterra principalmente, se utiliza como recubrimiento una materia plástica, -más o menos flexible-, cuya presión sobre el cable debe producir un efecto semejante al del recubrimiento con papel.

#### b) Cables con funda metálica

Al generalizarse, en 1949, el empleo de la funda metálica, para proteger los cables de pretensado, se pensaba que, con ello, se eliminarían las pérdidas lineales de tensión, puesto que, teóricamente, el cable quedaba libre dentro de su funda y ésta ofrecía una resistencia suficiente a la presión del hormigón y a la vibración. Sin embargo, posteriormente, se ha comprobado que estas pérdidas subsisten. La comprobación se obtuvo en un ensayo realizado, en Louviers, en 1950. Las condiciones de este ensayo no permitían alcanzar una precisión en las lecturas, comparable con la de las obtenidas en las experiencias de Toulouse y de Besançon, ya que,



tanto la longitud de los cables ensayados como la distancia entre los trazos de los alambres, eran demasiado pequeñas. Se comprobó, no obstante, que, en este caso particular, la pérdida lineal de tensión era del orden del 0,3% por metro.

¿A qué se puede atribuir esta pérdida lineal de tensión en los cables rectos? Varias son las causas posibles. A continuación se señalan las más importantes:

- 1<sup>a</sup> Entrada de la lechada de hormigón en los tubos metálicos, por no ser éstos suficientemente estancos.
- 2<sup>a</sup> Deformaciones y aplastamiento de las fundas durante su colocación, hormigonado, o vibración.
- 3<sup>a</sup> Ondulaciones de los cables entre los puntos de sujeción.

Después de numerosas observaciones, hechas de forma sistemática en diversas obras, se puede decir que, la primera causa es accidental y sólo se produce rara vez.

Las roturas de los tubos durante su colocación son frecuentes e, indiscutiblemente, originan un punto anguloso en el perfil del conducto en que va alojado el cable. Hay que señalar, a este respecto, que un tubo holgado se quiebra más fácilmente que otro más ajustado al cable. Por otra parte, es probable que un cable se desplace o se deforme bajo el empuje del hormigón, al verter la mezcla en el encofrado; pero la experiencia parece demostrar que las fundas actuales de 20/100 de espesor y con un huelgo de 4 a 5 milímetros alrededor del cable que protegen, apenas se aplastan bajo la presión del hormigón.

Pero, en cambio, ocurre que el cable, entre los puntos de suspensión, toma la forma de una catenaria, lo que da lugar a que se produzcan una serie de curvas y contracurvas en las cuales la tensión decrece siguiendo una ley exponencial. Estas catenarias se producen siempre, de forma más o menos acusada, según la distancia entre los puntos de suspensión y la rigidez de la funda. Esta última causa influye, de un modo fundamental, en el trazado que adopta el cable; así, un cable de 12  $\phi$  5 presenta, entre sus puntos de apoyo, una flecha dos veces más acusada si está protegido por una funda metálica flexible y enrollada helicoidalmente que si lo está por una funda rígida, de 20/100 de espesor, con los bordes soldados.

¿Qué sucede durante el hormigonado? ¿Se acentúan las catenarias bajo el peso del hormigón vertido en el encofrado? ¿Se enderezan bajo el empuje del hormigón vibrado? (la densidad aparente de un cable enfundado es semejante a la del hormigón). Hasta ahora no es posible contestar de un modo concreto a estas preguntas. Parece ser que todo depende de las circunstancias específicas de cada caso; tanto es así que, según se ha podido observar, el coeficiente de pérdida lineal de tensión varía como de 1 a 3, de una obra a otra, aun cuando las condiciones de colocación de los cables sean sensiblemente las mismas en todas ellas y, sin embargo, se mantiene prácticamente igual en todos los elementos semejantes de una misma obra.

### 3) Medida directa de la tensión de un cable en un punto dado.

La determinación de la tensión en un punto de un cable mediante la medida, en las proximidades de este punto, de la defor-



mación del acero es, seguramente, el método más directo y sencillo; pero tiene el inconveniente de no ser válido más que inicialmente, ya que, desde el momento en que la fluencia del acero comienza a manifestarse, las conclusiones que se obtienen midiendo las deformaciones carecen de garantía. Por consiguiente, este método sólo podrá ser utilizado para determinar las pérdidas de tensión durante el tesado. Sin embargo, permite conseguir una buena aproximación, dada la constancia del módulo de deformación del acero hasta tensiones bastante elevadas; en la práctica hasta los 90 ó 100 kg/mm<sup>2</sup>.

Existen otros métodos que no se basan, como éste, en el fenómeno de la deformación longitudinal del acero bajo la tensión. Entre ellos pueden citarse los dos siguientes:

El método utilizado en los "Laboratoires du Bâtiment & des Travaux Publics", que deduce la tensión del acero de la frecuencia de la vibración del propio alambre, considerado como cuerda vibrante.

El nuevo método "Telemac", mide el esfuerzo de aplastamiento ejercido por los doce alambres de un cable sobre un dinamómetro de duelas (figs. 10 y 11) introducido, entre los hilos, en un trozo del cable limitado por dos anillos bien calibrados y convenientemente espaciados. La presión de los alambres sobre las duelas hace que éstas se enderezcan, alargándose; este alargamiento se mide mediante un testigo sonoro, dispuesto en el interior del dinamómetro. El aparato, previamente calibrado en un ensayo efectuado en laboratorio, da las indicaciones a través de un puesto de escucha, del tipo clásico (fig. 12). El conjunto del dispositivo, constituido por el dinamómetro y los anillos extremos, es muy manejable y puede ser empleado, sin dificultad, en una obra cualquiera,

como se ha podido comprobar en el curso de los ensayos realizados sobre el puente de "La Trave" para medir, sucesivamente, las pérdidas y las caídas de tensión experimentadas por dos cables de 12  $\phi$  7, cada uno, y 40 metros de longitud.

Estos dos métodos acústicos exigen el empleo de un material relativamente costoso y delicado, por lo que su utilización no es muy corriente. En consecuencia, resultan, principalmente, interesantes para medir las caídas de tensión que se originan después de bloquear los anclajes. En la actualidad, para determinar las pérdidas durante el tesado, se dispone de procedimientos mucho más sencillos.

#### IV Determinación sistemática de las pérdidas de tensión por rozamiento

##### 1) Método de investigación

Una vez practicadas, en el recubrimiento de los cables, las oportunas aberturas, -tal como se ha explicado anteriormente-, el método estadístico, que a continuación se expone, no exige más observaciones o medidas de las que normalmente se efectúan durante el tesado; es decir, que es suficiente ir anotando las distintas presiones y los correspondientes alargamientos.

Ante todo, conviene señalar que las catenarias y las desviaciones de los cables entre sus puntos de suspensión existen, tanto en las partes curvas de su trazado como en las partes, teóricamente, rectas. Por esta razón, la pérdida lineal de tensión originada por dichas causas, se produce desde un extremo al otro del



cable y puede expresarse por una función exponencial de la distancia al gato; la pérdida correspondiente a la curvatura general del cable puede superponerse a la anterior bajo la forma de una función exponencial del ángulo de desviación.

Por consiguiente, para expresar la ley de distribución de tensiones, en las partes rectas de la armadura, podrá establecerse una fórmula del tipo:  $T_x = T_0 e^{-\lambda x}$  y para las partes curvas:  $T_{x+\alpha} = T_0 e^{-(\lambda x + \varphi \alpha)}$ .

Si se considera un semi-cable, constituido por una parte recta de longitud "d" y una parte curva "c", levantado según un ángulo  $\alpha$ , siendo  $T_0$  la tensión ejercida en el extremo, se tendrá:

- Al final de la curva, una tensión:  $T_1 = T_0 e^{-(c\lambda + \alpha\varphi)}$
- En la sección central del cable, una tensión:  
 $T_2 = T_1 e^{-\lambda d}$

La representación gráfica de esta distribución de tensiones toma la forma indicada en la figura 13. Haciendo que se correspondan el gráfico de tensiones con el de alargamientos unitarios, y tomando el área comprendida entre esta última curva y los ejes que limitan el diagrama, se obtiene el valor del alargamiento total del cable, que es igual al medido por el gato.

En la práctica, no se conoce más que la tensión lineal y el alargamiento total; y para un cable aislado, que tenga una desviación  $\alpha$ , existe una infinidad de valores  $\lambda$  y  $\varphi$  correspondientes al alargamiento medido; es decir, al valor del área rayada. Estos valores están, sin embargo, ligados entre sí por una relación que expresa la constancia de dicha área; o sea, del alargamiento ob

tenido. Si los coeficientes  $\lambda$  y  $\varphi$  son los mismos para todos los cables de una misma obra, y siempre que dichos cables sólo seande distinta longitud o distinto ángulo de desviación; las curvas  $\varphi = f(\lambda)$ , correspondientes a cada uno de los cables, tendrán un punto común - que será el que se buscaba.

En la práctica, esta función  $\varphi = f(\lambda)$  se asimila a una función lineal, lo que equivale a considerar, únicamente, los términos de primer grado del desarrollo en serie de las funciones exponenciales citadas anteriormente (la demostración es muy fácil). Para cada cable se determinan dos parejas de valores correspondientes de  $\lambda$  y  $\varphi$  y se traza la recta.

Este sistema se ha utilizado en un cierto número de obras, operando en la forma siguiente, a fin de eliminar los riesgos de error:

1°) Tesados escalonados, anotando el alargamiento obtenido para cada escalón de carga;

2°) Trazado de la curva de alargamientos de cada cable, con objeto de eliminar el error de partida (corrección del 0);

3°) Trazado de la recta  $y = f(x)$  correspondiente a una cierta magnitud de la tensión, para la cual el alargamiento del acero sea perfectamente elástico, y

4°) Determinación de los coeficientes reales  $\lambda$  y  $\varphi$  para la obra estudiada.

## 2) Resultados obtenidos

Según se deduce de los gráficos que se incluyen, este método da resultados bastante satisfactorios; sobre todo si se compa-



ran las cifras obtenidas en las diferentes obras (figs. 14 y 15).

Al hacer estas comparaciones se ve que, de una obra a otra, las diferencias pueden ser muy sensibles. Así ocurre que para el puente de "La Trave", donde las vigas tienen 41 metros de longitud, se obtiene  $\lambda = 0,5$  y  $\varphi = 0,15$ ; mientras que en el puente de "Rosbrück", con vigas de 46 metros de longitud, los coeficientes han sido  $\lambda = 1\%$  y  $\varphi = 0,25$ .

Esta diferencia debe atribuirse, en primer lugar, a la separación entre los puntos de suspensión de los cables, que en "Rosbrück" era de dos metros, aproximadamente, mientras que en el de "La Trave" era sólo de un metro. También influye el estado de la superficie de los alambres y de las fundas. En el último de los puentes citados la armadura estaba recubierta de una película de aceite soluble.

En un ensayo análogo efectuado, en Valenciennes, sobre dos cables, de 65 metros de longitud, del puente de Saint-Wast; los coeficientes de pérdida obtenidos fueron muy pequeños. Desgraciadamente, los dos cables ensayados tenían la misma forma y longitud, por consiguiente, el valor de los coeficientes  $\lambda$  y  $\varphi$ , propios de la obra, quedaba indeterminado.

Atribuyendo, arbitrariamente, a  $\varphi$  el valor 0,2 se deduce para  $\lambda$  el valor 0,25% por metro; y para  $\varphi = 0$ , se obtiene  $\lambda = 0,35$ . A pesar de esta indeterminación se ve que los coeficientes de pérdida son muy bajos; de todos modos, conviene recordar que los doce alambres de siete milímetros que constituían estos cables estaban engrasados con aceite pesado y que la funda de protección, formada por láminas delgadas, estaba, a su vez, protegida por una

envoltura de papel Kraft bituminoso. Finalmente, la colocación de los cables en los encofrados había sido efectuada con el máximo cuidado, como lo atestigua el artículo, de M. Dumas, publicado en la revista Travaux de Enero de 1952.

Queda, por lo tanto, demostrado que, con un mínimo de precauciones, es posible conseguir unos coeficientes de pérdida por rozamiento, inferiores al 0,5% por metro en las partes rectas y al 0,2% por radián en las partes curvas.

Basta para ello que el trazado de los cables sea perfectamente regular y sin ondulaciones y que las partes curvas vayan lubricadas, en caso necesario, con aceite soluble. La presencia de este aceite no supone ningún obstáculo para la adherencia del mortero, que se inyecta posteriormente, siempre y cuando, antes de efectuar la inyección, se proceda a un lavado con agua, del cable seguido del paso de un chorro de aire comprimido.

El método, anteriormente indicado, puede ser fácilmente aplicado para obtener, en cada obra, el valor real de los coeficientes  $\lambda$  y  $\psi$ , a condición de que se realicen, con todo cuidado, las operaciones de tesado y, en particular, las lecturas de los alargamientos. Para ello es necesario, fundamentalmente, realizar con todo esmero la corrección del cero en las medidas de los alargamientos. Hay que tener en cuenta que el fenómeno que se desea conocer depende solamente en segundo grado del que se mide. Por esta causa es útil contar con un gran número de resultados, para poder prescindir de los errores accidentales y considerar únicamente los valores que se repitan en el mayor número de casos posible.



### 3) Métodos sencillos para prever y vigilar las operaciones de tesado

Después de haber efectuado un cierto número de ensayos de esta clase, en diferentes obras, puede considerarse el problema como suficientemente conocido. Ello permite proponer un método sencillo para prever y vigilar las operaciones de tesado, tanto en lo que se refiere a la tensión como en lo que concierne al alargamiento. Conviene recordar que estos dos fenómenos se encuentran ligados por la ley de deformación del acero empleado. Este método o, mejor dicho, estos métodos son gráficos, lo cual tiene la doble ventaja de evitar penosos cálculos y poner de manifiesto el orden de magnitud de los distintos fenómenos.

#### a) Descomposición gráfica de los diferentes fenómenos

El primer gráfico ha sido deducido para cables, simétricos, de acero laminado (fig. 16).

La parte izquierda del gráfico sólo es válida para los cables rectilíneos. Las abscisas de esta parte indican las distancias desde el centro del cable a los distintos puntos considerados.

En el cuadrante superior izquierdo se representan los gradientes de tensión correspondientes a los coeficientes de pérdida lineal del 0,5%, 1% y 1,5% por metro; y en el cuadrante inferior izquierdo se señalan los alargamientos.

Del gráfico se deduce que si, por ejemplo, se tiene un cable cuya semilongitud es igual a 20 metros, y se quiere que la tensión en su centro valga  $100 \text{ kg/mm}^2$ , habrá que ejercer en su extremo una tensión de  $111 \text{ kg/mm}^2$  para  $\lambda = 0,5\%$  o de  $123 \text{ kg/mm}^2$  para  $\lambda = 1\%$ . Los alargamientos correspondientes serían, respectiva-

monto, de 112 milímetros o de 121 milímetros, en lugar de los 106 milímetros que bastarían si no hubiera rozamientos.

La parte derecha del gráfico sirve para deducir los aumentos de tensión que es necesario introducir en el caso de cables levantados, y se divide en dos partes: en la superior se dan los datos correspondientes a las tensiones; y en la inferior, los relativos a los alargamientos. Las dos familias de curvas que aparecen en la parte superior se refieren a los distintos valores del producto  $\alpha \psi$ , viniendo  $\alpha$  expresado en radianes. La familia de curvas, más a la derecha, señala la tensión que hay que ejercer en el extremo del cable levantado, y que, en el caso examinado anteriormente, con  $\lambda = 0,5$  y  $\psi = 0,2$  y con un ángulo de elevación de  $23^\circ$  ó  $0,40$  radianes, será de  $120 \text{ kg/mm}^2$ .

La otra familia de curvas  $\alpha \psi$ , situada a la izquierda de la anterior, sirve para determinar la abscisa que, combinada con la ordenada correspondiente a la longitud de la curva, da el suplemento del alargamiento necesario por el levantamiento del cable. Como se ve, para el ejemplo estudiado y siendo 6 metros la longitud de la curva, este suplemento será de 3 milímetros.

Una primera conclusión se deduce inmediatamente: este suplemento del alargamiento es muy débil; el 3% con relación al suplemento de tensión del 9% que exige el levantamiento del cable. Esta proporción sería aún menor para cables de mayor longitud.

#### b) Cálculo de errores

Se ha visto anteriormente que si el coeficiente de pérdida lineal pasaba del 0,5 al 1% era necesario aumentar la tensión en



el extremo del cable en un 12%; mientras que el alargamiento correspondiente no variaba más que en un 9%. Se deduce, por lo tanto, que para un cable rectilíneo, la tensión es mucho más sensible al rozamiento lineal que el alargamiento total del cable.

Para un cable con trazado curvo, el fenómeno es aún más claro. En efecto, si se considera que el coeficiente suplementario de pérdida en la parte curva es del 0,3; en lugar del 0,2 supuesto, la tensión en el extremo del cable debería entonces alcanzar los  $125 \text{ kg/mm}^2$ , o sea sufrir un aumento del 4% con relación al valor antes encontrado. El suplemento de alargamiento por pérdida en la parte curva sería entonces de 5 milímetros en lugar de 3.

Si al efectuar el tesado sólo se hubiese tenido en cuenta la presión ejercida por el gato, la operación se habría suspendido al alcanzar los  $120 \text{ kg/mm}^2$ , lo que supondría, con los coeficientes reales  $\varphi = 0,3$   $\lambda = 0,5\%$ , una tensión de solamente  $95 \text{ kg/mm}^2$  en el centro del cable. En cambio, si lo que se considera es que el alargamiento del cable ha de alcanzar los 115 mm prescritos, el tesado no se detendrá hasta los  $124 \text{ kg/mm}^2$ . El error así cometido será, de este modo, cinco veces menor que en el primer caso.

Volviendo ahora sobre lo anteriormente expuesto en relación con las causas de error debidas al mal funcionamiento de los manómetros, se compronde que la importancia de estos errores es sólo muy relativa, puesto que midiendo el alargamiento de los cables puede conocerse la verdadera tensión de éstos con mucha mayor precisión que a través de la presión ejercida por el gato.

Otra conclusión, que cabe igualmente deducir, es la de que los aparatos, de gran precisión, preconizados en ciertos países

para poder conocer exactamente el esfuerzo ejercido por los gatos, sin tener que recurrir al empleo de los manómetros cuyas indicaciones ofrecen siempre poca garantía, sólo tienen una apariencia de seguridad muy ilusoria, aun en el supuesto de que las cualidades de precisión, sensibilidad y fidelidad, atribuidas a estos delicados aparatos, sean realmente alcanzables en la práctica.

De todo lo dicho, se deduce que el mejor indicador de la verdadera tensión de pretensado introducida en una pieza es el propio cable, a condición de que se conozca bien su sección y de que no se alcance el límite de fluencia del acero. En el ejemplo expuesto anteriormente, al elevar la carga de 120 a 125 kg/mm<sup>2</sup>, el alargamiento del acero pasaba de 7,1 al 8,4%; es decir, que el alambre estaba muy próximo a alcanzar la zona de los grandes alargamientos. No obstante, el suplemento total de alargamiento necesario era sólo de 3 milímetros, pues realmente no se aplicaba más que sobre una pequeña longitud de cable.

La representación gráfica, que queda indicada, tiene la ventaja de poner de manifiesto, geoméricamente, la importancia relativa de los diferentes factores, y además, aunque su empleo es un poco complicado, resulta mucho más sencillo que el cálculo directo. Presenta, sin embargo, el inconveniente de no ser válida más que para una clase de acero, para aquélla, precisamente, a la que correspondan las curvas de alargamientos trazadas. Finalmente, tal como se representa en la figura 16 es sólo aplicable al caso de cables que se quieran someter a una tensión de 100 kg/mm<sup>2</sup> en su parte central. Únicamente cabrá hacer una afinidad cuando las deformaciones del acero sean perfectamente elásticas, entre los límites de dicha afinidad.



o) Abacos de puntos alineados (fig. 17)

El siguiente método, debido a M. Roger Du Bois, está basado en el principio de los ábacos de puntos alineados. Su aplicación es más general y su empleo más sencillo que el del presentado anteriormente.

Es más general, porque es válido cualquiera que sea la tensión de partida y tanto si se trata de una tensión en el extremo como de la tensión en un punto cualquiera del cable; es aplicable, incluso en el caso de cables asimétricos.

Es más sencillo, porque consta sólo de cuatro escalas y de un diagrama tensión-deformación del acero utilizado.

El único inconveniente que tiene consiste en que la influencia de cada uno de los distintos fenómenos físicos, que intervienen en el proceso del tesado, no quedan tan de manifiesto como en el método anterior. Esta es la razón por la cual se ha expuesto primero el procedimiento a que hace referencia la figura 16.

Las tres escalas verticales son escalas de tensiones: la de la derecha y la de la izquierda tienen la misma graduación y son homotéticas con relación al punto  $O_0$ , origen de la escala inclinada. En esta última se llevan, siguiendo una graduación exactamente calculada, los valores de los exponentes que figuran en las fórmulas:  $T = T_0 \circ^{-\lambda d}$  ó  $T = T_0 \circ^{-(\lambda c + \varphi \alpha)}$  que representan la ley de distribución de tensiones en un trozo cualquiera de cable.

Para el manejo del gráfico se ha de conocer, lo mismo para los cables rectos que curvos, el valor de los exponentes  $\lambda d$  ó

$\lambda_0 + \varphi \alpha$ , los cuales se deducen en función de los valores  $\lambda$  y  $\varphi$  considerados. Una vez conocido el exponente, se lleva su valor sobre la escala inclinada y se une, el punto así definido, mediante una recta, con el punto representativo de la tensión fijada para uno de los extremos del cable. Esta recta, en su intersección con la otra escala vertical, determina la tensión en el otro extremo de la armadura.

El alargamiento del cable se deduce a partir de su tensión media, que no es ni la semisuma de las tensiones de los extremos, ni la tensión en el centro, sino la media ponderada de las tensiones intermedias, o sea:

$$\frac{1}{L} \int_0^L T_0 \circ - \lambda \times dx$$

Esta tensión media viene dada por la intersección de la recta que une las tensiones en los extremos con la tercera escala vertical, situada entre las otras dos.

Una vez conocida dicha tensión media, se lee, en el diagrama tensión-deformación relativo al acero utilizado, el alargamiento correspondiente a la citada tensión, y con él se calcula fácilmente el alargamiento total del cable considerado.

Al hacer esta última operación se corre el riesgo de cometer un error si los alargamientos quedan fuera de la zona perfectamente elástica. En este caso, bastará dividir el cable, en un número suficiente de trozos, para que el resultado obtenido responda, con suficiente aproximación, a la realidad.



Este ábaco permite además deducir el punto de mínima tensión y, por consiguiente, calcular con exactitud el alargamiento de un cable de trazado asimétrico; por ejemplo, de un cable en el que los ángulos de doblado y las longitudes de las partes curvas sean distintas en cada extremo y además, estos extremos, estén sometidos a tensiones diferentes. En tales casos es preciso encontrar el punto de tensión mínima; para ello, se sustituye: 1° el exponente de cada una de las partes curvas por un exponente, del mismo valor, correspondiente a una parte recta (es decir, se hace:  $\lambda c + \varphi \alpha = \lambda c'$ ); y 2° la longitud de la parte curva  $c$  por la longitud de la parte recta equivalente, o sea:  $c' = c + \frac{\varphi \alpha}{\lambda}$ . El punto de mínima tensión dividirá al cable equivalente en dos partes proporcionales a las tensiones aplicadas en los extremos respectivos.

Inversamente, conociendo los alargamientos obtenidos en los cables de una obra, en función del esfuerzo de pretensado introducido, será fácil determinar los coeficientes  $\lambda$  y  $\varphi$  correspondientes, aunque en algunos casos haya que realizar varios tanteos.

#### V Pérdidas de tensión por deslizamiento de los anclajes

Finalmente, conviene mencionar también otra pérdida de tensión, aunque no se produzca por rozamiento, que es la provocada por el deslizamiento experimentado por el cono de anclaje cuando se retira la presión del gato de tesado (fig. 18).

En ese momento, aunque el cono macho se haya introducido entre los alambres con un esfuerzo de 15 a 20 t, se produce siem

pro una ligera penetración del conjunto como macho-alambres en el cono hembra.

En los actuales conos de anclaje, fabricados con mortero de cemento Portland y vibrados, esta penetración es del orden de 5 a 7 milímetros. En realidad, este fenómeno es prácticamente inevitable por ser, precisamente, lo que permite al cono del anclaje deformarse plásticamente para asegurar una presión uniforme sobre todos los alambres de un mismo cable.

Este deslizamiento reduce, evidentemente, el alargamiento producido en los alambres durante su tesado y provoca, como consecuencia, una disminución local o general de la tensión en el cable.

Si el cable no está sometido a ningún rozamiento, su tensión sufrirá una reducción inversamente proporcional a la longitud del cable. Si el cable es muy corto, esta pérdida puede llegar a ser importante y peligrosa. Sin embargo, es posible atenuar su efecto realizando el bloqueo de los conos de anclaje de cada extremo de un modo sucesivo en vez de simultáneamente.

Si, por el contrario, y como es normal, se producen rozamientos en el cable, es necesario recurrir de nuevo al diagrama de tensiones para poder apreciar el efecto de este deslizamiento. El gradiente de tensiones se hace, ahora, de signo contrario hasta alcanzar un punto, tal como el A de la figura 18, de forma que el área punteada del diagrama corresponda a la pérdida de alargamiento registrada. En general, esta pérdida es pequeña y únicamente en el caso de cables muy cortos y sin rozamiento puede, el deslizamiento de los anclajes, resultar realmente perjudicial para la tensión de la armadura.



Pero, precisamente, en estos casos de cables cortos y sin rozamiento, la capacidad de carga del gato de tesado resulta muy superior a la necesaria y puede, con toda seguridad, introducirse una sobretensión en la armadura sin peligro de que se alcance el agotamiento del gato. Por otra parte, el margen de tensión que habitualmente se destina a vencer los rozamientos en los cables largos y curvos, puede servir ahora para compensar las pérdidas ocasionadas por el deslizamiento de los anclajes.

## VI Conclusiones y sugerencias de orden práctico

Como consecuencia de todo lo expuesto pueden deducirse algunas conclusiones, entre las cuales las más importantes son las siguientes:

1<sup>a</sup> Que las pérdidas de tensión por rozamiento de los cables, en sus conductos, plantean un problema que no puede ni debe ser ignorado por el ingeniero.

2<sup>a</sup> Que la estimación de esas pérdidas puede hacerse fácilmente, sin necesidad de recurrir al empleo de dispositivos complicados; basta con utilizar los aparatos corrientes de medida: manómetros y reglillas.

3<sup>a</sup> Que es posible, adoptando un mínimo de precauciones, reducir, los coeficientes de pérdida de tensión en los alambres, a valores inferiores al 0,5% para las partes rectas y al 0,2 para los trozos en curva.

4<sup>a</sup> Que la determinación de la tensión de los cables debe basarse, principalmente, en la medida de su alargamiento, sirviendo el manómetro únicamente como indicador.

5<sup>a</sup> Que el deslizamiento del anclaje puede tener importancia en los cables de pequeña longitud.

A la vista de estas conclusiones se pueden hacer algunas sugerencias de orden práctico. La primera se refiere al establecimiento de los programas de puesta en carga de los cables de las estructuras pretensadas; la determinación de la magnitud de la tensión y de los alargamientos que deben alcanzarse puede hacerse, con suficiente aproximación, mediante el ábaco de Dubois. Un cálculo riguroso carece de sentido, ya que las pérdidas de tensión no obedecen a leyes exactas y los coeficientes de rozamiento varían de un cable a otro.

La estabilidad de la estructura debe comprobarse, tanto bajo el esfuerzo máximo de pretensado que haya de introducirse como bajo el esfuerzo mínimo; y esta comprobación debe de ir acompañada de la valoración de las posibles deformaciones.

La segunda sugerencia se refiere al método para comprobar, a posteriori, la magnitud del esfuerzo de pretensado realmente introducido. Se ha visto que, en los ensayos realizados, la corrección del cero, para los alargamientos medidos durante la puesta en carga, es prácticamente nula. Ello se debe a que los trazos de referencia se marcaron, en los alambres, antes de la fijación del gato, y a que la posición de tales trazos se determinó con relación al hormigón y no con relación al anillo de apoyo del gato, como debiera ser, ya que dicho anillo no queda nunca perfectamente adaptado al cono de anclaje. En consecuencia, se recomienda marcar los trazos de referencia, sobre todos los alambres, a una distancia fija del hormigón (y por fuera de la zona del anclaje de los gatos, naturalmen-



te) y medir, después del tesado, la distancia entre dichos trazos. De esta forma, en el resultado obtenido, se refleja, evidentemente, el deslizamiento de los anclajes.

Finalmente, la tercera sugerencia, interesa a los fabricantes de acero. Las caídas de tensión pueden alcanzar, corrientemente, hasta el 25% de la tensión final prevista; es decir, que un cable cuya tensión final haya de ser de  $85 \text{ kg/mm}^2$ , habrá de tener, en la sección más cargada de la estructura, -la cual, frecuentemente, coincide con el punto de mínima tensión de los cables-, una tensión mínima de  $106 \text{ kg/mm}^2$ .

Por lo tanto, considerando un coeficiente de pérdida, por rozamiento, del 0,5% por metro de trazado recto y otro de 0,15 por radián, como suplemento por pérdida en la parte curva, en un cable de 50 metros de longitud doblado, en los dos extremos, según ángulos de  $23^\circ$ ; el esfuerzo de pretensado que debe introducirse, en los extremos, deberá ser de  $126 \text{ kg/mm}^2$ ; lo que, teniendo en cuenta la pérdida que origina el deslizamiento de los anclajes, supone una tensión efectiva del orden de los  $130 \text{ kg/mm}^2$ , en la sección de sujeción de los alambres al gato.

Por todo lo expuesto resulta: que con los alambres, actualmente disponibles en el mercado francés, se alcanza el límite de las posibilidades del acero, ya que, a partir de los  $130 \text{ kg/mm}^2$ , se entra en la zona de fluencia del material. Por el contrario, con los alambres de  $145$  ó  $150 \text{ kg/mm}^2$  de límite elástico convencional que, corrientemente, se encuentra en los mercados extranjeros, se podrían aplicar unas tensiones un 10 ó un 15% superiores a las actuales. Esto traería, como consecuencia, una reducción equivalente en las can

tidades de acero necesario, sin aumento en el costo de las operaciones de pretensado; pues lo único que haría falta sería dar algunos golpes más de bomba durante la puesta en carga de la armadura. En definitiva se obtendría una rebaja muy sensible en el precio de costo del kilogramo de pretensado, sin alteración alguna en el coeficiente de seguridad de las obras, puesto que la relación entre la tensión de trabajo de las armaduras y la tensión de relajamiento del acero permanecería invariable.

- - -



EL PROFESOR MAGNEL, HA FALLECIDO

El Profesor Gustavo Magnel, miembro de la Academia Real de Bélgica, y una de las figuras señeras en el campo de la técnica del hormigón pretensado, ha fallecido, inesperadamente el pasado día 5 de Julio, en su domicilio de Gante.

Resulta muy difícil resumir en unas líneas, de un modo completo, los múltiples trabajos, publicaciones, proyectos, obras, estudios, etc., realizados por el Profesor Magnel. Nacido el 15 de Septiembre de 1889 en Esschen (Bélgica), obtuvo en 1912 el título de Ingeniero en la Universidad de Gante. Después de siete años de ejercicio libre de su profesión, fué atraído al campo de la investigación y la enseñanza, en donde tan meritoria labor ha realizado. En 1919 fué nombrado Jefe de Trabajos del Laboratorio de Resistencia de Materiales, dirigido por el Profesor Koelhoff.

Su paso por la industria le hizo sentir la urgente necesidad de una enseñanza universitaria de la técnica del hormigón armado, apoyada en un laboratorio adecuadamente equipado. Durante toda su vida luchó por conseguir este objetivo. En 1922 fué autorizado a desarrollar, en la Facultad de Ciencias y con el carácter de asignatura libre, su curso de "Práctica de Cálculo del Hormigón Armado". En 1930 sucedió al Profesor Morten en la enseñanza del curso de "Estabilidad de las Construcciones". Por este tiempo también, su asignatura de "Hormigón Armado" pasó a ser obligatoria. En este aspecto de la enseñanza el Profesor Magnel se caracteriza por saber colocarse siempre al nivel de sus alumnos.

Su Laboratorio de Hormigón Armado, fundado en 1926 dentro de la Administración de Ferrocarriles, pasó en 1930 a depender de la Universidad. Su interés por la investigación científica fué constante. Era Vice-presidente del Consejo de Administración del "Fondo Nacional de la Investigación Científica" y miembro del Consejo de Administración de la "I.R.S.I.A.". En 1934 fundó con el Profesor E. Francois el "Bureau S.E.C.O.", cuya finalidad era promover la seguridad de la construcción en Bélgica.

Colocado en la vanguardia del desarrollo del hormigón armado, su inigualable perspicacia le hizo entrever las posibilidades que la nueva técnica del hormigón pretensado ofrecía a los ingenieros y constructores. Desde 1937 realizó en su laboratorio ensayos sobre elementos constructivos fabricados según la nueva técnica, y llegó a patentar un procedimiento original de pretensado que tuvo la satisfacción de ver aplicado a la realización de numerosas obras, tanto en Bélgica como en el extranjero.

Solamente el transcurso del tiempo será capaz de darnos la perspectiva necesaria para poder apreciar todo lo que, para el mundo científico en general y el de la construcción en particular, su pérdida representa.

Confiamos en que la "TORRE DE MAGNEL" por él proyectada, será construída en fecha inmediata y pueda servir de homenaje póstumo a esta figura de la ciencia que la muerte, tan de improviso, nos ha arrobado.



NUEVO VICEPRESIDENTE GENERAL DE LA  
FEDERACION INTERNACIONAL DEL HORMIGON PRETENSADO

En la reunión de Delegados de los diferentes países, celebrada en Amsterdam, el día 1 del pasado mes de Septiembre, se acordó, por unanimidad, nombrar, a Don Eduardo Torroja, Vicepresidente General de la Federación Internacional de Hormigón Pretensado.

La Asociación Española, desea expresar, con este motivo, la profunda satisfacción que le produce tal nombramiento, satisfacción que no duda será compartida por todos los técnicos especializados en la materia. España ocupa así un puesto privilegiado en una de las más representativas Organizaciones mundiales de Ingeniería.

\*\*\*

## II CONGRESO INTERNACIONAL DE LA F.I.P.

Durante los días 29 de Agosto a 3 de Septiembre se ha celebrado, en Amsterdam, el anunciado II Congreso de la Federación Internacional del hormigón pretensado.

Más de 1200 miembros, sin contar los acompañantes, participaron en las sesiones del Congreso. La organización, a pesar de la extraordinaria asistencia de congresistas, fué perfecta en todos los órdenes. El grupo holandés puede, con justicia, sentirse satisfecho de la eficacia de la labor por él desarrollada.

Días antes de la celebración del Congreso, la Comisión Permanente de la F.I.P. se reunió en Amsterdam para tratar de las cuestiones generales de la Federación y del Congreso en particular.

La primera reunión de Delegados de todos los países se celebró el mismo día 29, en sesión previa, para nombrar nuevo Vicepresidente General. Después de una votación, se acordó diferir el nombramiento hasta unos días después en memoria del Profesor Magnel.

Media hora después se celebró la sesión de apertura. Después de un breve concierto de música de Cámara, el Excmo. Sr. Ministro de Transportes de Holanda, declaró inaugurado el Congreso, pronunciando seguidamente, los Sres. Torroja, Freyssinet y Janssonius, unos discursos; en memoria del Profesor Magnel el primero, de orden general el segundo y, finalmente, de bienvenida el tercero.

La primera sección técnica, en la tarde del mismo día 29, fué presidida por D. José M<sup>a</sup> Aguirre Gonzalo. Las restantes, pre



sididas por M.L. Baes, Mr. Ch. Ostenfeld y Ir. A.M. Haas, se desarrollaron los días 30, 31 y 1.

El día 1 de Septiembre, antes de comenzar la cuarta sesión técnica, tuvo lugar la segunda reunión de Representantes nacionales. En esta reunión, y por unánime acuerdo de todos los Delegados, se eligió, a D. Eduardo Torroja, Vicepresidente General de la Federación.

Terminadas las sesiones técnicas, y tras unas breves palabras finales de los representantes de los cinco continentes, el Vicepresidente General, Sr. Torroja, pronunció un breve discurso de agradecimiento a la nación y al grupo holandés por las atenciones recibidas. Finalmente M. Freyssinet, como Presidente Honorario, hizo un breve resumen de las sesiones técnicas.

El gran número de aportaciones presentadas, hizo imposible el amplio desarrollo de las discusiones sobre los trabajos presentados. De las dos contribuciones españolas, una del Sr. Barredo y otra de los Sros. Ruvira y Mortes, sólo la primera se repartió entre los asistentes a las sesiones, por llegar la segunda fuera del plazo de presentación de las memorias preliminares.

En un local anejo al salón de reuniones se montó una exposición de dispositivos, sistemas y materiales empleados en la técnica del hormigón pretensado. Entre los expositores figuraba el Sr. Barredo, con el sistema de anclaje y tesado de alambres descrito y comentado en el trabajo presentado a las sesiones técnicas.

La organización de las excursiones técnicas y turísticas fué tan perfecta como la de las reuniones. Entre las obras de hormi-

gón pretensado visitadas, destacó la gran nave industrial de Oosterhout (Rotterdam). La estructura, una amplia cubierta laminar en diéu te de sierra con luces de 40 m, proyectada por el Profesor Haas, fué ensayada, durante su estudio, a esca 1:10, en el Laboratorio Central de Ensayo de Materiales de Madrid.

En próximos números de este Boletín, se irán publicando los informes generales sobre las comunicaciones presentadas a las distintas sesiones técnicas de este Congreso.

-- -- --



CURSILLO DE HORMIGON PRETENSADO

El día 28 de Noviembre, comenzará un cursillo de 26 conferencias sobre hormigón pretensado en los locales del Instituto Técnico de la Construcción y del Cemento, con arreglo al siguiente programa.

1ª Semana - Ejecución

- |           |    |   |
|-----------|----|---|
| Lunes     | 28 | - Razón del pretensado.<br>- Puentes.   |
| Martes    | 29 | - Estructuras.<br>- La ejecución del pretensado.  |
| Miércoles | 30 | - Sistemas y métodos de pretensado.<br>- Sistemas y métodos de pretensado (continuación).                           |
| Jueves    | 1  | - Las piezas prefabricadas. Viguetas y traviesas. La ejecución.<br>- Las piezas prefabricadas. Las características. |
| Viernes   | 2  | - Vibración del hormigón.<br>- Discusión libre.   |

2ª Semana - Teoría

- |       |   |  |
|-------|---|--|
| Lunes | 5 | - Propiedades mecánicas del hormigón y del acero.<br>- Aplicación. Piezas sometidas a esfuerzos de tracción. |
|-------|---|--|

- Martes 6 - Piezas sometidas a esfuerzos de flexión. Teorías clásicas.  
- Piezas sometidas a esfuerzos de flexión. Objeciones.
- Miércoles 7 - Piezas sometidas a esfuerzos de flexión. Cálculos en rotura y pretensados parciales.  
- Piezas sometidas a esfuerzos de flexión. Dimensionamiento práctico.
- Viernes 9 - Disposición de armaduras. Esfuerzos cortantes y pretensados múltiples.  
- Discusión libre.

3ª Semana - Problemas generales

- Lunes 12 - Estructuras hiperestáticas.  
- Plasticidad e inestabilidad de láminas pretensadas.
- Martes 13 - Prefabricación y empalme de elementos.  
- Ensayo en modelos reducidos de cubiertas de hormigón pretensado.
- Jueves 15 - Instrucciones de hormigón pretensado  
- Hormigón pretensado DYWIDAG
- Viernes 16 - Algunas realizaciones españolas.  
- Aspecto económico del hormigón pretensado.

NOTA.- Todas estas conferencias estarán a cargo del Sr. Páez, excepto la primera del día 2, las segundas de los días 13 y 15 y la primera del día 16 de Diciembre que estarán a cargo de los Sres. Angulo, Benito, Ugalde y Roglá respectivamente.



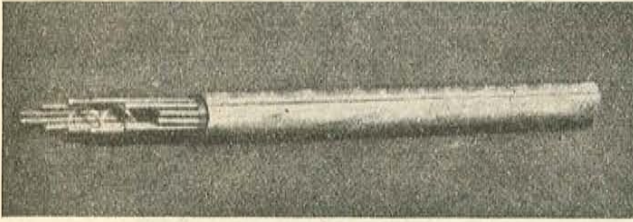


Fig. 1.—Trozo de cable de 12 Ø5 con el muelle central y funda metálica.

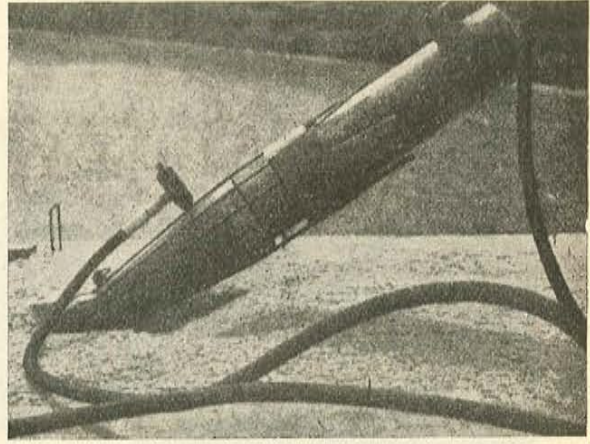


Fig. 2.—Gato Freyssinet para el tesado de cables 12 Ø5. «Modelo 43».

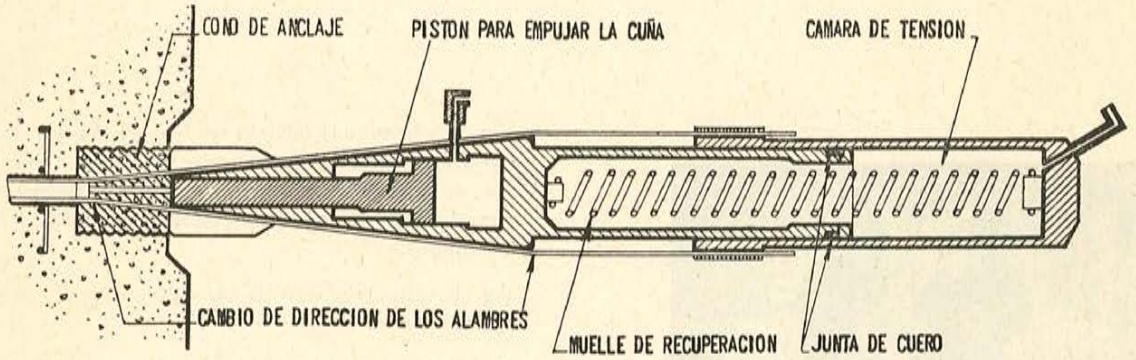


Fig. 3.—Gato para 12 Ø5. «Modelo 43».

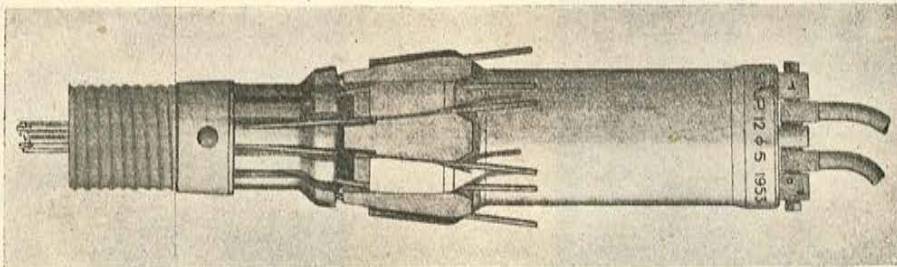


Fig. 4.—Gato de desbloques automático para 12 Ø5. Recorrido 200 mm. «Modelo 1953».



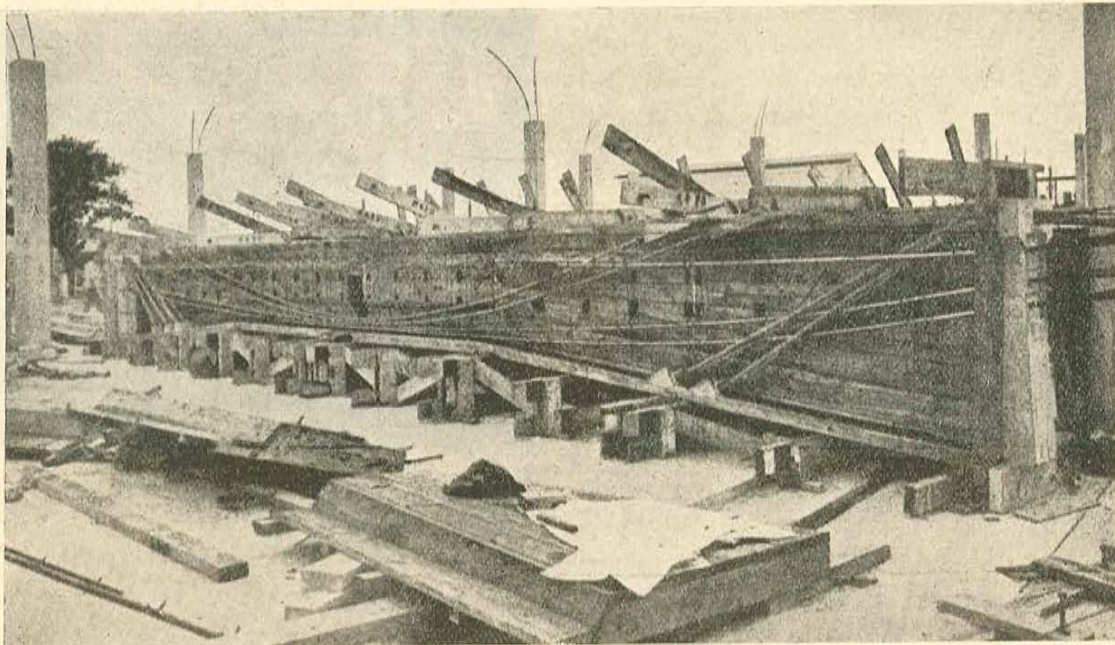


Fig. 5.

Fig. 5.—Encofrado abierto en el que pueden apreciarse los cables con sus fundas metálicas y los tubos de caucho destinados a formar el alojamiento para los cables suplementarios de continuidad sobre los apoyos.



Fig. 6.

Fig. 6.—Recubrimiento de los cables 12 Ø5 con papel bituminoso,

Fig. 7.—Extremo sur del Canal de ensayos de Carènes.

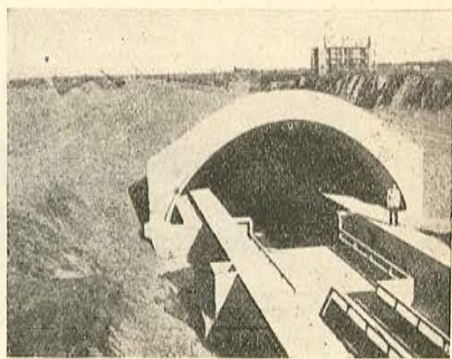


Fig. 7.



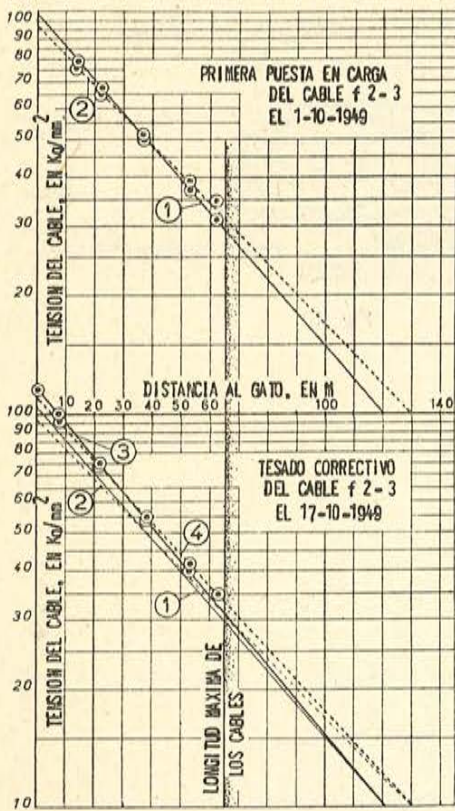


Fig. 8.

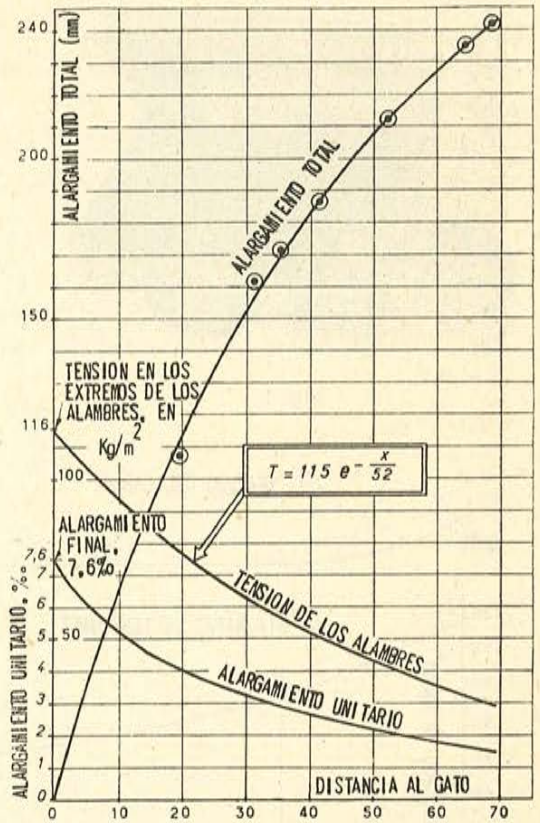


Fig. 9.

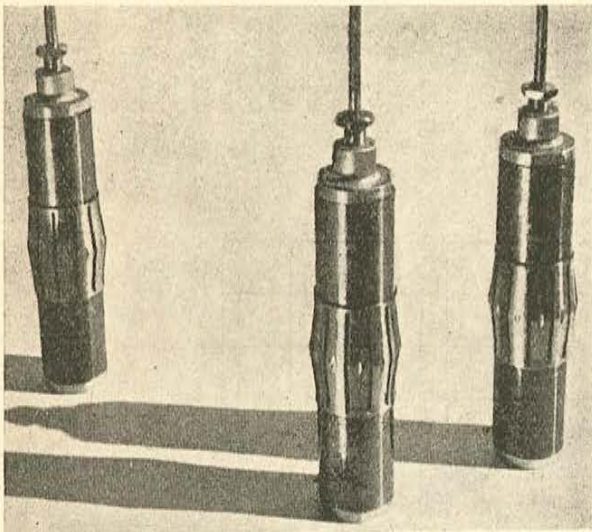


Fig. 11.

Fig. 8.—Canal de ensayos de Carènes. Diagramas de distribución de tensiones a lo largo de los cables de 65 m de longitud.

Fig. 9.—Canal de ensayos de Carènes. Curvas de tensión y alargamiento correspondientes a la ley de tensiones  $T = 115 e^{-\frac{x}{52}}$

Fig. 11.—Dinamómetros de duelas.

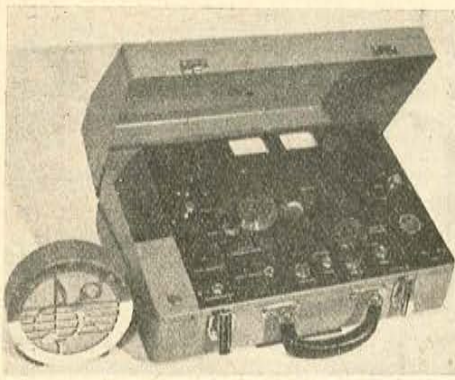


Fig. 12.

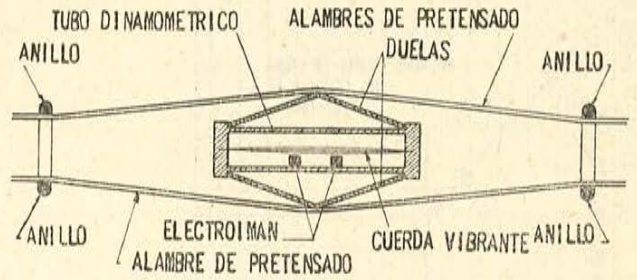


Fig. 10.

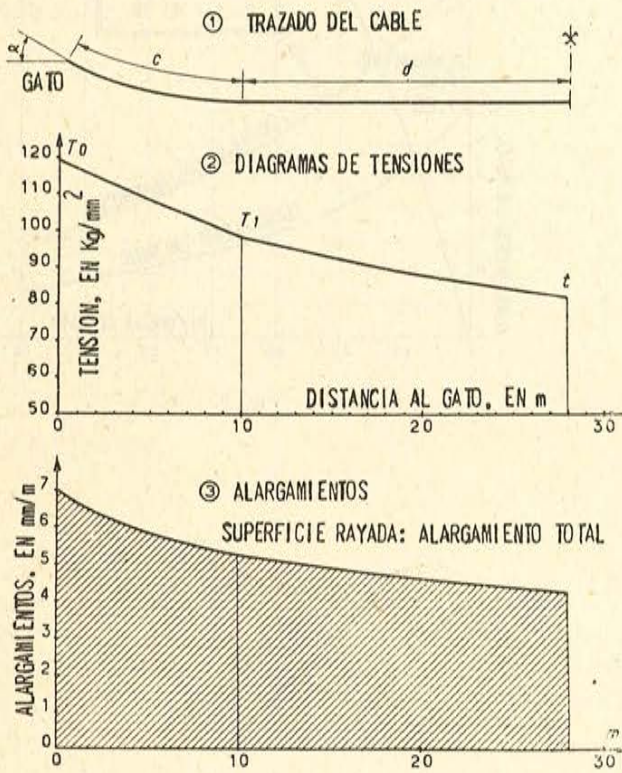


Fig. 13.

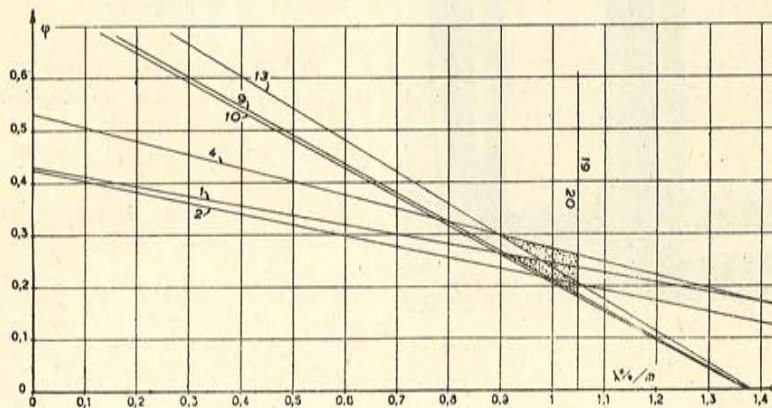
Fig. 10.—Fundamento del dinamómetro de duelas.

Fig. 12.—Puesto de escucha.

Fig. 13.—Diagramas tipo de tensiones y alargamientos para un cable levantado.

Fig. 15.—Punto de Rosbrück. Curvas  $\varphi = f(\lambda)$ .

Fig 15





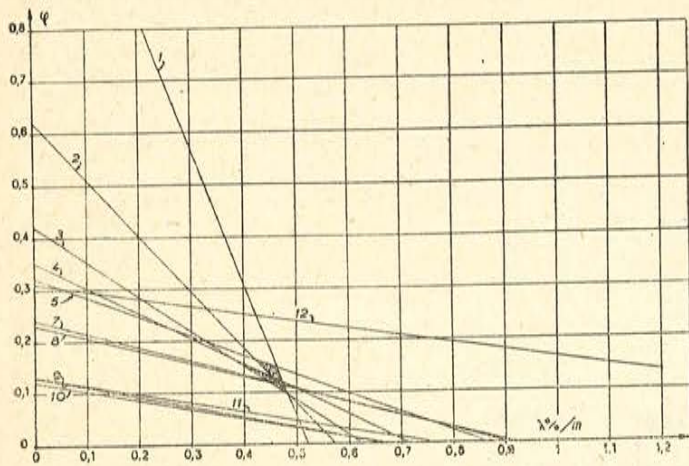


Fig. 14.

Fig. 14.—Puente de la Trave. Curvas  $\varphi = f(\lambda)$ .

Fig. 16.—Determinación gráfica del alargamiento de un cable para una tensión mínima inicial de 100 kilogramos/mm<sup>2</sup>.

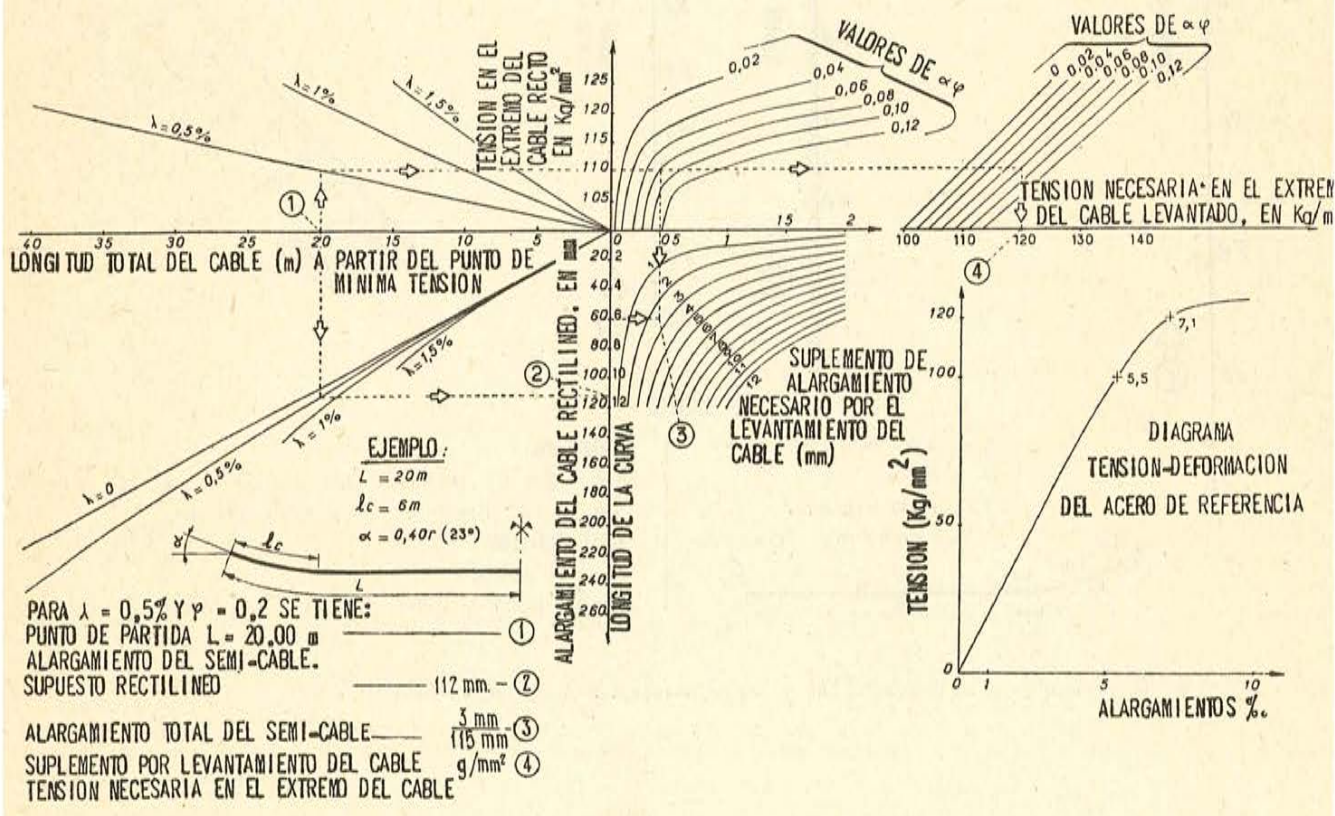


Fig. 16.

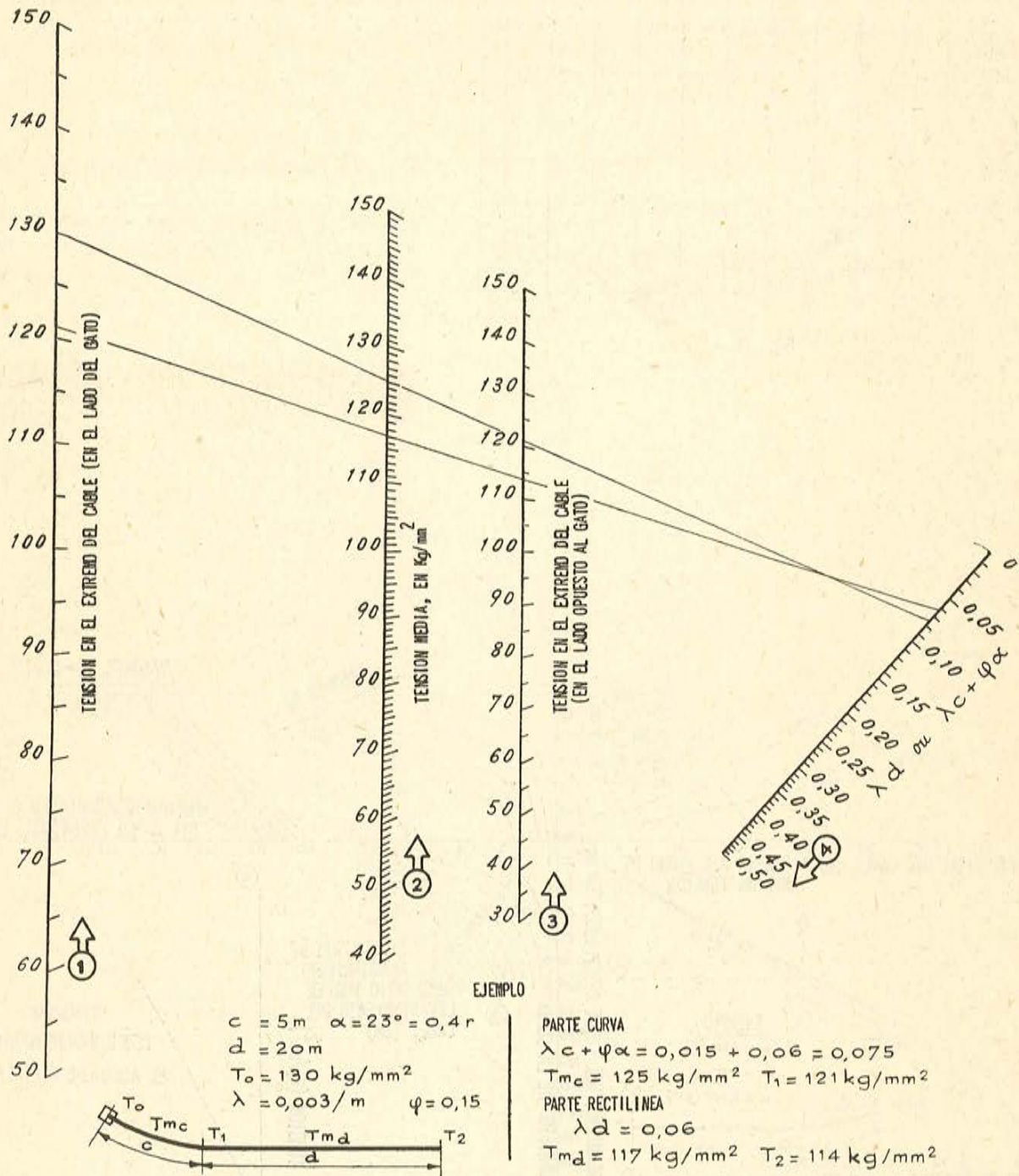


Fig. 17.—Abaco para la determinación de las tensiones a lo largo de un cable.



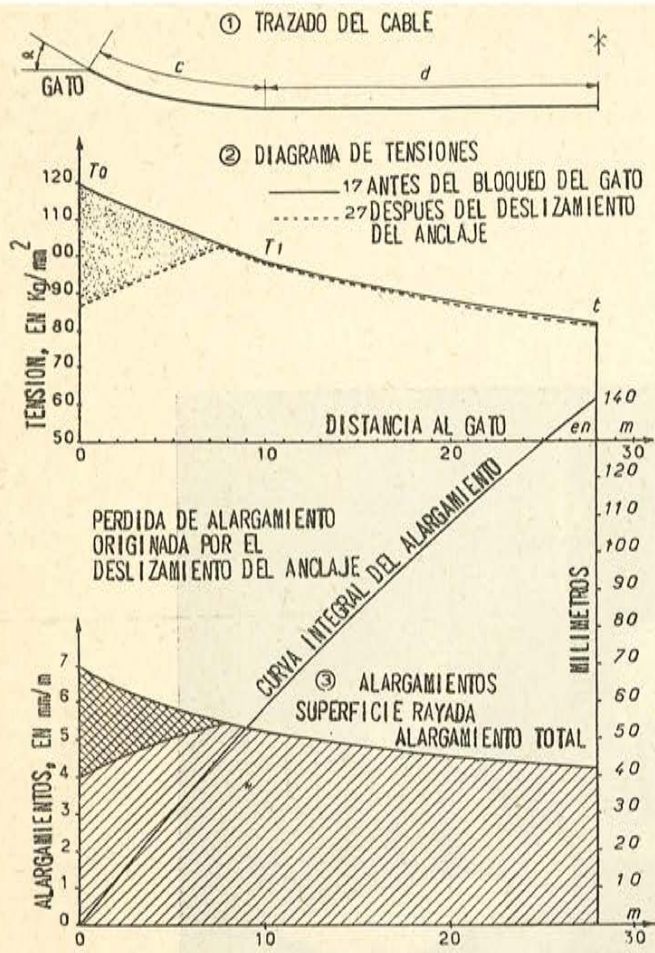


Fig. 18.—Influencia del deslizamiento del anclaje.  
 Fig. 19.—El salón de reuniones, durante el concierto inaugural del II Congreso Internacional de Hormigón Pretensado.  
 Fig. 20.—La presidencia de la reunión de apertura del Congreso de Amsterdam.

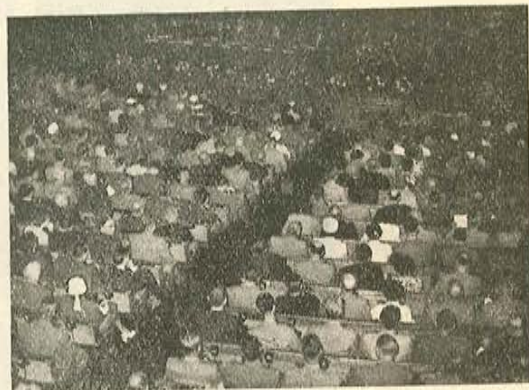


Fig. 19.



Fig. 20.



Fig. 21.

Fig. 21.—La presidencia, durante la reunión de Delegados de los países participantes en el II Congreso de la Federación Internacional del Hormigón Pretensado.



