ANALES

DEL INSTITUTO DE INGENIEROS DE CHILE

SAN MARTIN 352 — CASILLA 487 — SANTIAGO

Sucesor

De la: «SOCIEDAD DE INGENIERIA» Fundada el 31 de mayo de 1888

Y del: «INSTITUTO DE INGENIEROS» Fundado el 28 de octubre de 1888

Con Personalidad Jurídica desde el 28 de diciembre de 1900

Adherido a la USAI y a la CONFERENCIA MUNDIAL DE LA ENERGIA

AÑO LXV • NOVIEMBRE - DICIEMBRE DE 1952 • N.os 11 - 12

Comisión Editora: *Raúl Sáez S. (Pdte.), Arturo Quintana, Jorge del Rio, Fernando Salas y Sansón Radical.*

Guillermo Feliú S.

El hormigón precomprimido y su aplicación en postes para líneas eléctricas

I. INTRODUCCION

El hormigón precomprimido es una nueva técnica constructiva que ataca el problema de ensamblar los materiales hormigón y acero, de una manera diferente a la convencional, que denominamos hormigón armado, y que permite aprovechar en forma eficiente la alta calidad alcanzada por la metalurgia en lo que se refiere al acero, las últimas mejoras alcanzadas por la tecnología del hormigón, y todavía, permite sacar un mejor rendimiento al volumen de hormigón puesto en obra.

Decimos esto, porque si bien el hormigón armado ha tenido un rápido desarrollo, un enorme campo de aplicación, y por ende, una gran afluencia de investigadores puestos a su servicio, su propio mecanismo de funcionamiento le impide agotar las posibilidades que hoy día ofrecen:

1º Los aceros obtenibles a precios comerciales, del orden de dos a dos y media vez el precio del acero convencional para hormigón armado tipo St. 37, y de resistencias de tres a seis veces superior a la de ese acero.

2º Los hormigones de alta resistencia, hasta 1.000 Kg/cm². de ruptura por compresión a los 28 días, obtenibles mediante técnicas especiales, tales como tratamientos térmicos. tratamientos al vacío, tratamientos por presión directa, vibraciones enérgicas o combinaciones de estos métodos.

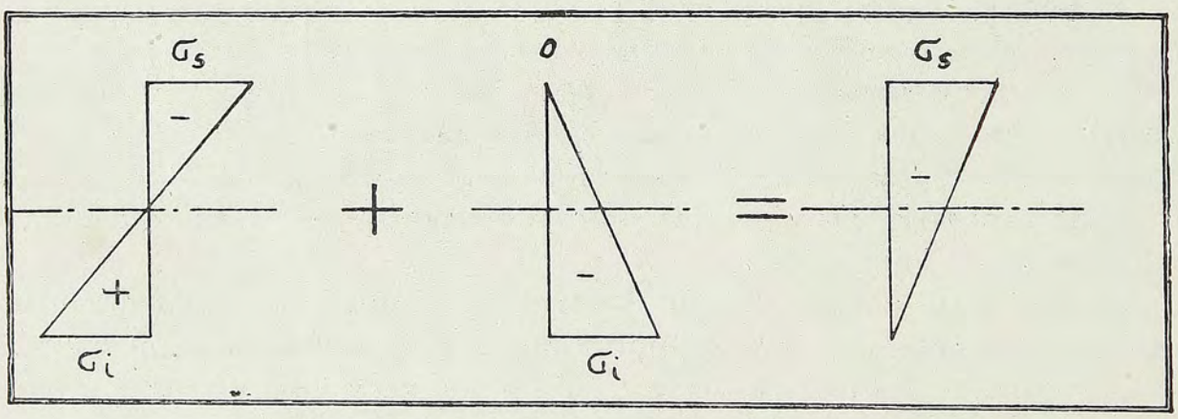
Conviene también establecer que el mejor rendimiento del volumen del hormigón, utilizado en la técnica de la compresión previa proviene del hecho de que en un elemento sometido a flexión y construído en hormigón armado, alrededor del 30% de la sección de la pieza —la sección comprimida— es útil para soportar el momento solicitante, mientras que el resto de la sección —la sección tendida— no cumple otra finalidad que la de portar y proteger las armaduras, separándola de la sección comprimida lo suficiente para obtener un brazo de palanca adecuado. En cambio, en un elemento construído en hormigón precomprimido y sometido a flexión, toda la sección colabora a dar resistencia a la pieza, puesto que toda ella, dentro de las cargas admisibles, trabaja a comprensión, es decir, en las condiciones mejores para el material hormigón.

Más adelante aclararemos estas ideas a la luz de ecuaciones y de un estudio somero del mecanismo interno de funcionamiento de ambos sistemas.

II. FUNDAMENTOS DEL HORMIGON PRECOMPRIMIDO

La idea fundamental sobre la cual se ha construído esta nueva técnica, consiste como ya se ha dicho, en dejar al hormigón de una pieza sometida a flexión bajo las cargas de servicio, trabajando siempre a compresión, solicitación para la cual es especialmente apto. Debe tenderse, por lo tanto, a eliminar la existencia de fatigas de tracción, mediante un agente externo a la pieza misma.

En una pieza sometida a flexión simple, el diagrama de fatigas que le corresponde, de acuerdo a la fórmula de Navier, es en la figura el indicado como estado A. Si a este diagrama le superponemos un diagrama de fatigas, como el indicado bajo el nombre de estado B, obtenemos el diagrama C en el cual podemos observar que no existen fatigas de tracción.



ESTADO A
Fatigas Solicitantes
(Peso Propio + Sobrecarga)

ESTADO B
Fatigas de Compresión
Previa

ESTADO C
Fatigas de Trabajo

Se obtendrá entonces una pieza precomprimida, cuando podamos imponerle a la pieza una solicitación que produzca el diagrama de fatigas indicado como Estado B. Si además cuidamos de que las dimensiones de la pieza y la compresión previa sean tales que las fatigas de compresión σ_s y σ_i no

sobrepasen los límites admisibles, la pieza estará en condiciones de ser utilizada.

Ahora, un diagrama como el del Estado B, se produce cuando aplicamos a la sección considerada un esfuerzo de compresión ubicado en el límite de su núcleo central. Podría por lo tanto, en principio, ser suficiente para obtener la compresión previa que buscamos, la aplicación de una fuerza exterior de compresión en dicho punto. Pero, dada la magnitud de las fatigas, dicha fuerza resultaría lo suficientemente grande como para producir pandeo, además de las dificultades de conseguir en la práctica la presencia permanente de esta fuerza.

Se trata entonces de obtener un sistema que comprima en forma permanente la pieza, produciendo el diagrama de fatigas adecuado y que, además, no coloque a la pieza en peligro de pandeo.

Esto se ha logrado mediante el estiramiento de las armaduras, consiguiendo que la reacción de esta acción de estiramiento sea quien comprima la pieza en la forma adecuada. Se elimina de este modo el peligro de pandeo, puesto que, al intentar la pieza pandearse, ésta se deforma, acortando así la longitud de la armadura estirada, con el consiguiente descenso de la fuerza de compresión actuante y la disminución inmediata de la fuerza compresora, causa del pandeo.

III. MATERIALES NECESARIOS

Es necesario, para fabricar hormigón precomprimido, la utilización de armaduras de alta resistencia. Esta necesidad proviene de las características plásticas de los materiales, hormigón y acero, las que se traducen en un acortamiento paulatino de la pieza a lo largo del tiempo. La contracción de fragua y el escurrimiento plástico, tanto del hormigón como del acero, provocan un descenso de las fatigas de compresión previa e interesa que este descenso no sea importante frente a la magnitud de las fatigas iniciales. Apreciemos cifras generales para aclarar esta idea:

La contracción de fragua varía según la humedad ambiente, estación, naturaleza del cemento, etc. Podemos aceptar que la cifra 2×10^{-4} para el acortamiento unitario debido a este fenómeno, es de un orden de magnitud prudente por el lado de la seguridad. Si el hormigón se acorta en esta cantidad, el acero lo seguirá en su deformación y perderá la tensión que resulta de:

Pérdida por contracción =

$$E_a \times i_{\text{contracción}} = 2.1 \times 10^6 \times 2 \times 10^{-4} = 420 \text{ Kg./cm}^2.$$

El escurrimiento plástico se acostumbra tomarlo en cuenta suponiendo un aumento del valor de "n", o lo que es lo mismo, una disminución del módulo de elasticidad del hormigón, (el módulo de elasticidad del acero permanece constante a lo largo del tiempo). Para un hormigón de los corrientemente utilizados en el precomprimido, se pueden aceptar como valores razonables los siguientes:

$E_b = 150.000$ Kg/cm². cuando se trata de deformaciones bajo cargas aplicadas indefinidamente.
$E_b = 450.000$ Kg/cm². cuando se trata de cargas instantáneas.
$E_b = 225.000$ Kg/cm². para las deformaciones diferidas, es decir para la diferencia entre la deformación instantánea y la deformación total adquirida después de un largo tiempo.

Si suponemos que se trata de obtener una fatiga de compresión previa permanente de 90 Kg/cm², la pérdida de tensión, que por concepto de escurrimiento plástico o fluencia del hormigón, sufrirá el acero será:

$$\frac{\sigma_b \times E_a}{E_b} = \frac{90 \times 2.100.000}{225.000} = 840 \text{ Kg/cm}^2.$$

Los aceros por otra parte, sufren una relajación de tensiones a lo largo del tiempo, es decir, si están estirados a longitud constante, pierden tensión, o si están estirados a tensión constante, siguen aumentando su deformación. Para aceros de características convenientes tendidos a alrededor de 11.000 Kg/cm². el orden de magnitud de la caída de tensión o pérdida por este motivo alcanza a unos **500 Kg/cm²**.

Quedan todavía otras pérdidas, debidas no tanto a las propiedades mecánicas de los materiales, sino a los métodos constructivos y no las estudiaremos en mayor detalle.

Sumando las pérdidas señaladas, tenemos finalmente:

Pérdida por contracción de fragua:	420
Pérdida por fluencia del hormigón:	840
pérdida por fluencia del acero:	500
Total	1.760 Kg/m².

Se ve entonces, que a fin de dejar sin mayor efecto esta pérdida, es preciso ir a aceros que se puedan tender a fatigas del orden de los 11.0000 a 20.000 Kg/cm²., donde la caída de tensión sea del orden del 16 al 9% solamente.

También esto explica el fracaso de los primeros intentos de compresión previa, hechos con aceros corrientes, tendidos a fatigas iniciales del orden de los 1.200 a 1.400 Kg/cm². Al cabo del lapso de un año, las piezas eran sólo hormigón armado.

Los ensayos hechos por M. L'Hermite muestran que la estabilización se alcanza prácticamente a los 900 días, vale decir dos años y medio y que:

40% de la deformación diferida se adquiere al mes aproximadamente.
60% a los tres meses.
80% al año.
90% al año y medio.

Fué preciso el profundo conocimiento del comportamiento del hormigón que poseía el ingeniero francés E. Freyssinet, para que éste introdujera la utilización de aceros de alta calidad y se iniciara así la época del hormigón precomprimido.

Consideremos ahora la forma en que el hormigón precomprimido y el hormigón armado responden a una solicitación de flexión simple, única solicitación por ahora en que el campo de aplicación del hormigón armado convencional se ha visto seriamente invadido por la nueva técnica. Para este análisis empecemos por estudiar la forma en que ambos materiales reaccionan a un mejoramiento de la calidad del hormigón. La medida más adecuada para efectuar esta comparación es sin duda, el valor del momento que causa la ruptura de la pieza, cifra que nos permite avaluar las condiciones de seguridad de ella, en contraposición al método clásico que determina las fatigas de trabajo haciendo hipótesis aceptables, mientras las cargas no soliciten a los materiales constitutivos del hormigón más allá de su período elástico, y que además no establece, sino en forma indirecta, la existencia de una seguridad sin fijar claramente sus límites

El profesor R. Saliger, en la última edición de su conocido "Hormigón Armado", recomienda una fórmula, casi idéntica a la establecida en las Normas Rusas, y establece que, para secciones rectangulares:

$$\frac{M_B}{bh^2\,\sigma_S} = \mu\left(1 - \frac{\sigma_S}{\sigma_P}\,\frac{\mu}{2}\right) \qquad \text{en que:}$$

M_B = momento que causa la ruptura de la pieza.

σ_P = resistencia prismática del hormigón (ruptura por compresión a los 28 días).

σ_S = límite de fluencia del acero.

μ = cuantía de acero = $\dfrac{F\,e}{bh}$

Esta fórmula es válida siempre que μ, cuantía de acero, sea mayor que un cierto valor mínimo recomendable y que varía con la resistencia del hormigón a la ruptura por compresión. Para un acero del tipo St 37, estos valores mínimos son:

σ_P	120	160	225	300	450	600	Kg/cm²
$\mu_K \geq$	0.12	0.16	0.21	0.27	0.33	0.40%	

De acuerdo a esta fórmula se han dibujado en la figura 1 las curvas que muestran la variación del momento de ruptura unitario m_e con la fatiga de ruptura por compresión a los 28 días del prisma standard de hormigón, para cuatro cuantías de acero.

Las conclusiones son inmediatas. Se puede apreciar por ejemplo que para una cuantía de 1%, no habría interés en ir a fatigas superiores a los 250 Kg/cm². Al aumentar esta fatiga de 250 Kg/cm². a 500 Kg/cm²., vale decir del simple al doble, el momento unitario de ruptura aumenta de 0.0095 a 0.00975, es decir en 2.6%, aumento despreciable en relación a las dificultades que es

preciso superar para obtener fatigas del orden de los 500 Kg/cm². Para una cuantía de 2.0%, más allá en 250 o 300 Kg/cm²., no vale la pena ir. En general, para mayores cuantías, es decir mientras más armada sea la viga, mejor debe ser la calidad del hormigón para obtener el mejor rendimiento. Para las cuantías de la práctica, hasta 2.0%, el gráfico indica que no es necesario ir a calidades mayores que las que hoy se obtienen en Chile, con las mínimas precauciones en la confección del hormigón y desde luego, sin ningún tratamiento especial.

Estos resultados aparecen más claros si se estudia el comportamiento del hormigón armado sometido a flexión en su fase de ruptura.

A medida que la carga se acerca a la de ruptura, el acero se acerca a su límite de fluencia y se deforma rápidamente. A todo incremento de carga, el acero ya en fluencia, responde deformándose mucho sin aumentar prácticamente su fatiga, obligando a la fibra neutra a desplazarse rápidamente hacia el borde comprimido y aumentando violentamente la fatiga del hormigón comprimido hasta causar su ruptura. Por mucho que mejore la resistencia del hormigón, pasado un cierto límite variable con la cuantía, y que corresponde a la fatiga de hormigón que exige fatiga de fluencia en el acero, dado el gran margen de deformabilidad de éste en fluencia, cualquier resistencia del hormigón es agotada sin necesidad de aumentar en mucho el momento solicitante.

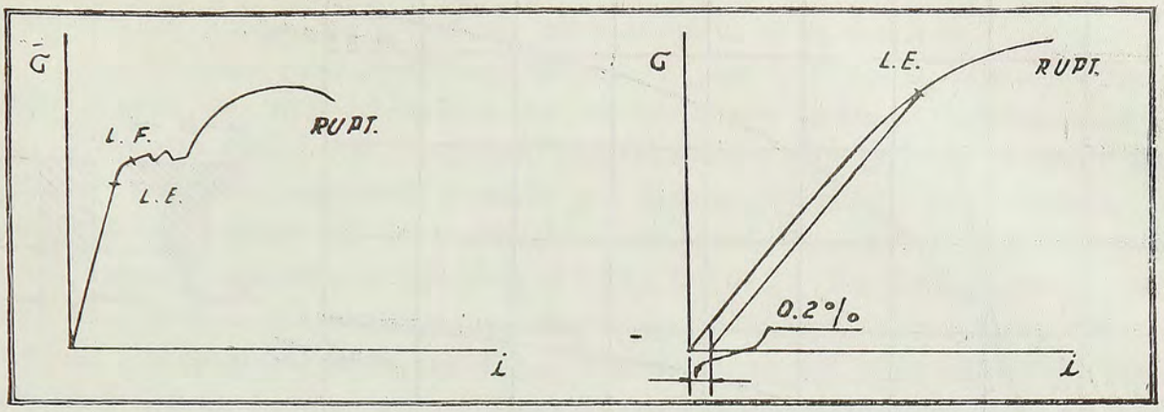
No hay pues, posibilidad, en el hormigón armado convencional sometido a flexión, de sacar partido de la mejor calidad de los hormigones obtenibles con nuevos métodos y tratamientos. Esta posibilidad queda entregada de lleno al hormigón precomprimido, como se podrá observar en lo que sigue.

Quedó establecida más atrás, la necesidad de usar, en el hormigón precomprimido, aceros de alta calidad. Esta misma circunstancia permite utilizar con eficacia hormigones de alta resistencia. Efectivamente, el comportamiento de una pieza de hormigón precomprimido sometida a flexión en su fase de rotura, es análogo al de una pieza de hormigón armado en la misma situación. El diagrama de fatigas, que muestra el funcionamiento interno de la sección, es el mismo en ambos casos. No es de extrañar entonces que las fórmulas indicadas por dos tratadistas eminentes del hormigón precomprimido y de escuelas diferentes, Abeles de la escuela inglesa y autor de la precompresión parcial, y Guyon de la escuela francesa y ayudante principal de Freyssinet, sean idénticas en conformación a la que da Saliger, para el hormigón armado.

La fórmula en cuestión es la que sigue:

$$\frac{M_B}{bh^2\sigma_{ult}} = \mu\left(1 - \frac{\mu}{2}\,\frac{\sigma_{ult}}{\sigma_P}\right)$$

La única diferencia con la anterior reside en que, en vez de aparecer la fatiga de fluencia del acero σ_s aparece la expresión σ_{ult}, con la que se indica la fatiga de ruptura del acero. Esto se debe a que en los aceros de alta calidad no existe como en el acero corriente de construcción (Tipo St 37), ni un límite de elasticidad ni un límite de fluencia bien marcados. La curva fatiga-deformación de estos aceros es contínua y no se pueden establecer diferencias tan notorias como sucede en el acero convencional.



ACERO DULCE **FIG. 2** ACERO ESPECIAL

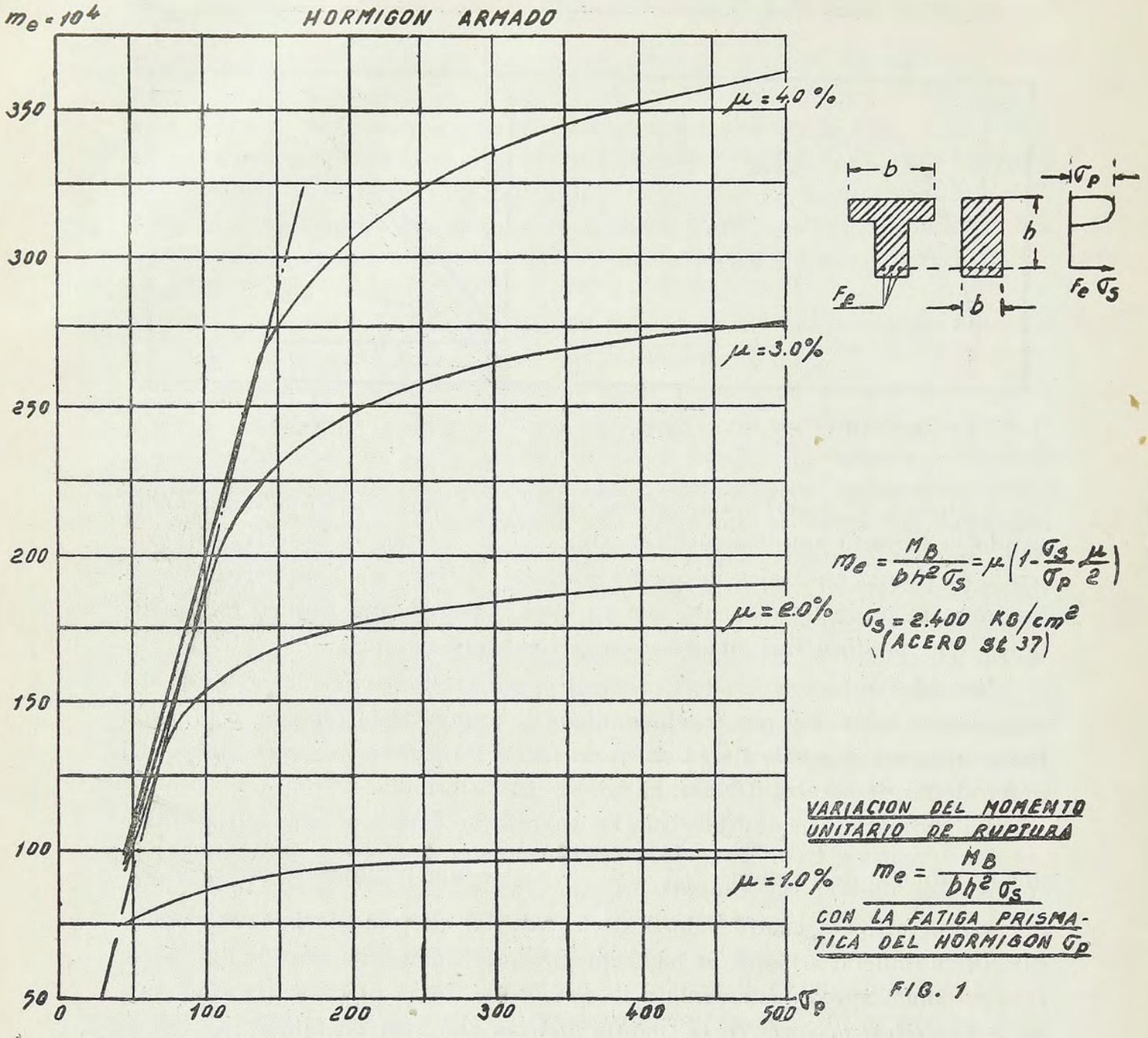
La figura Nº 2 muestra aproximadamente la conformación de estas curvas, siendo la primera ampliamente conocida. En la segunda se aprecia la inexistencia de puntos especiales, lo que ha obligado a definir un límite elástico para los fines de proyecto, diciendo que en estos aceros, límite elástico es aquella fatiga que produce una deformación permanente de 0.2%.

No existiendo fluencia, no existe tampoco la limitación de la fatiga del acero a este valor. Por eso en el hormigón precomprimido probado en flexión hasta la rotura se puede llegar, salvo en piezas muy armadas, hasta fatigas del orden de las de roturas. De ahí, el cambio en la fórmula.

En la figura 3 hemos dibujado las curvas que expresan cómo varía el momento unitario de ruptura $m_e = \frac{M_B}{bh^2\sigma_{ult}}$ con la fatiga de ruptura σ_p del hormigón, para cuatro valores de la cuantía, tal como lo hicimos para el caso del hormigón armado. Se ha aceptado como cuantía máxima la de 1%, lo cual responde aproximadamente a lo que ocurre en la práctica, teniendo presente que cifras mayores en la cuantía podrían extremar las fatigas de trabajo por compresión previa del hormigón. Como fatiga de ruptura del acero σ_{ul} se ha adoptado aquella que corresponde al acero adquirido por Endesa con fines experimentales, acero METELMA 5 LA 160/140, y que es de 16.000 Kg/cm².

Las conclusiones son diferentes a las que obtuvimos de las mismas curvas hechas para el hormigón armado. Se observa, por ejemplo, que para una cuantía del 0.8%, corriente en vigas rectangulares, precomprimidas, resulta que al variar la fatiga de ruptura del hormigón de 250 Kg/cm². a 500 Kg/cm²., es decir, del simple al doble, el momento unitario varía de 0.00595 a 0.00695, vale decir varía 16.8%. Para una cuantía de 1.0% esta variación para el mismo rango de fatigas de ruptura del hormigón es de 23.5%. En hormigón armado para esta cuantía de 1.0%, la variación de momento unitario era de 2.6%. No cabe, creo, mayor comentario.

Conviene sí, observar aún, que un hormigón de alta resistencia en el precomprimido, se justifica más todavía, si se piensa que permite mayores



$$m_e = \frac{M_B}{b h^2 \sigma_s} = \mu \left(1 - \frac{\sigma_s}{\sigma_p} \frac{\mu}{2}\right)$$

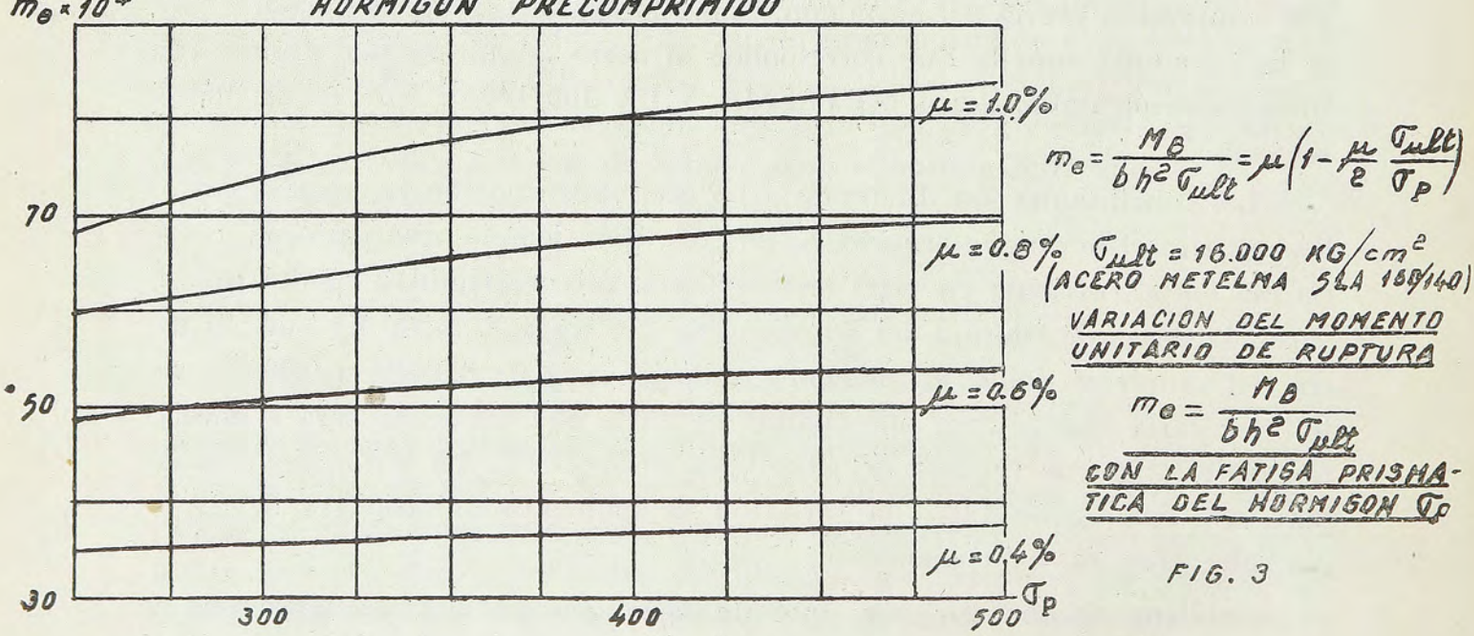
$\sigma_s = 2.400$ KG/cm² (ACERO St 37)

VARIACION DEL MOMENTO UNITARIO DE RUPTURA

$$m_e = \frac{M_B}{b h^2 \sigma_s}$$

CON LA FATIGA PRISMATICA DEL HORMIGON σ_p

FIG. 1



$$m_e = \frac{M_B}{b h^2 \sigma_{ult}} = \mu \left(1 - \frac{\mu}{2} \frac{\sigma_{ult}}{\sigma_p}\right)$$

$\sigma_{ult} = 16.000$ KG/cm² (ACERO METELMA SEA 160/140)

VARIACION DEL MOMENTO UNITARIO DE RUPTURA

$$m_e = \frac{M_B}{b h^2 \sigma_{ult}}$$

CON LA FATIGA PRISMATICA DEL HORMIGON σ_p

FIG. 3

fatigas de compresión previa y por lo tanto, traslada a un valor proporcionalmente mayor, las cargas de agrietamiento y de servicio.

Por último, resta dejar establecido el por qué de la imposibilidad de usar aceros de alta resistencia en el hormigón armado convencional. La causa de ello está en el exagerado agrietamiento que sufriría la pieza sometida a flexión si estuviera armada con aceros especiales. Efectivamente, un acero de la calidad de los utilizados corrientemente en la técnica del hormigón precomprimido, tal como el METELMA 5 LA 160/140 de que ya hemos hablado, podría teóricamente, ser empleado trabajando a una fatiga de 7.000 Kg/cm^2., aceptando como admisible una fatiga igual a la mitad del límite elástico, que es en este acero 14.000 Kg/cm^2. (Desde luego, y como ya hemos dicho anteriormente, este límite es convencional y corresponde a la fatiga que produce una deformación permanente de 0,2%).

Una pieza armada en estas condiciones, y aceptando Fase II, tendría que disponer de un hormigón que por adherencia, al seguir al acero en su deformación, estaría sometido a una fatiga ideal, igual a la enésima parte de la fatiga del acero (llamando n a la razón modular). En el caso del hormigón armado con acero convencional, tipo St. 37, esta fatiga ideal, suponiendo un n igual a 15, es de $\frac{1200}{15} = 80$ Kg/cm^2. que desde luego, causa la ruptura por tracción del hormigón en la zona bajo la fibra neutra, pero la experiencia demuestra que las grietas no pasan de ser capilares y sin mayor importancia. Con un acero especial, y aceptando el mismo n de 15, esta fatiga sería de $\frac{7000}{15} = 467$ Kg/cm^2., y las grietas, mucho mayores que las del caso anterior, no permitirían la utilización racional de la pieza.

IV. METODOS CONSTRUCTIVOS

Se ha dicho ya que los métodos ideados para conseguir la compresión previa, inciden todos en la idea de estirar la armadura constituída por acero de alta calidad, consiguiendo así que la reacción de esta acción de estiramiento comprima a la sección de la pieza aplicándole un esfuerzo tal que su magnitud y ubicación sean las adecuadas para obtener el diagrama de fatigas previas que se desea.

La primera clasificación que se puede hacer de la gran cantidad de métodos constructivos que se utilizan, corresponde a la forma de hacer este estiramiento de la armadura. Podemos distinguir estiramientos realizados por métodos físicos y estiramientos realizados por métodos químicos.

Los primeros consisten en aplicar en un extremo un esfuerzo de tracción a la armadura debidamente anclada, mediante gatas hidráulicas, o bien conseguir una apreciable deformación de la armadura gracias al calentamiento producido por el paso de una fuerte corriente eléctrica, obteniendo así, que una vez anclada en caliente esta armadura, al enfriarse, aparezca la fuerza de tracción que se trataba de obtener.

Los métodos químicos se refieren a los cementos expansivos de Lossier.

El cemento portland ordinario, con el agregado de ciertas sustancias químicas, adquiere la propiedad de dilatarse durante el fraguado y endurecido. Aprovechando esta propiedad, se consigue el estiramiento de la armadura, si previo a la expansión del hormigón, se ha anclado ésta debidamente. Al dilatarse el hormigón, arrastra al acero, a quien tracciona auto-comprimiéndose a la vez, debido a la reacción de esta tracción del acero. Este método no es todavía aplicable en escala importante, debido a que aún no se puede controlar en forma precisa la expansión del hormigón. La aplicación en la ingeniería de estos cementos expansivos se ha limitado hasta el momento a la reparación de algunas obras civiles, tales como reacondicionamiento de fundaciones de puentes, edificios, etc., con sentamientos importantes producidos por bombardeos, algunos tipos especiales de revestimiento de túneles, etc., No hay duda, sin embargo, que dominada a la perfección la técnica de los cementos expansivos, este método se impondrá a los demás por su extrema simplicidad y economía.

Los métodos que hemos dado en llamar físicos, son los que hacen hoy día del hormigón precomprimido una realidad. Todavía, para mejor ordenar esta revisión somera de los métodos constructivos, diremos que se pueden distinguir dos grupos bien definidos entre ellos, de acuerdo a la prelación existente entre el hormigonado y la aplicación de la fuerza de tracción a la armadura. Estos grupos son los que consideran la pre-tensión de la armadura y los que consideran la post-tensión de ella.

La pre-tensión consiste en construir la pieza de hormigón precomprimido, mediante el estiramiento del acero, antes del hormigonado, anclándolo contra anclajes exteriores, de modo de que una vez hormigonada la pieza y alcanzada una resistencia adecuada, se sueltan los alambres de acero, los que por adherencia, transmiten parte de su tensión al hormigón, comprimiéndolo. También se individualiza a estos métodos, denominándolos métodos de precompresión por adherencia.

La post-tensión, en cambio, considera primero el hormigonado de la pieza, consultando en ella la existencia de tubos interiores, por los que, una vez endurecido el hormigón y alcanzada una resistencia dada, se pasan los cables de acero que constituyen la armadura. Realizadas estas operaciones, se procede a estirar la armadura, anclando previamente un extremo contra la pieza misma y tirando del otro, o tirando simultáneamente de ambos extremos, apoyándose en todo caso contra la pieza, de modo que la reacción de este estirado, realice la compresión previa. Cuando se ha alcanzado el límite de esfuerzo a que se desea llegar, se procede a anclar definitivamente los cables, con la alternativa todavía, de asegurar o no este anclaje, mediante el grouting de los agujeros donde se ubican los cables, con la correspondiente adherencia resultante de ello.

Dentro de cada uno de estos grupos, aparecen muchos sistemas individualizados, pero sus diferencias estriban en cuestiones de detalle, especialmente en la forma o disposición del cable y de los sistemas de anclaje. Cada uno de estos sistemas se halla protegido por patentes que reservan para ciertas firmas su aplicación en obras.

Sólo trataremos más en detalle dos métodos de post-tensión. Ellos son el sistema Freyssinet, utilizado por la "Societé Technique pour l'Utilisation de la Précontraint" (S.T.U.P.) y el sistema Lee McCall, utilizado por Mc Calls Macalloy Ltd.

El método Freyssinet consulta cables circulares constituidos por números standards de alambres de acero de alta resistencia de 5 o 7 mm. de diámetro. (Pueden utilizarse cables de 6, 12 o 18 alambres). Estos alambres van dispuestos periféricamente sobre un alma constituído por un alambre en espiral. Ver fig. 4.

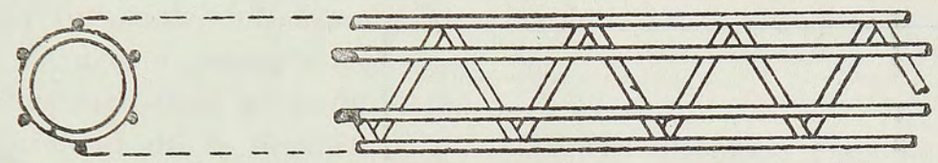


FIG. 4

El dispositivo de anclaje se realiza en este sistema mediante la ubicación de un cono hembra en el extremo del tubo que llevará el cable y que queda firmemente embutido en el hormigón. Después de pasado el cable por el tubo, se inserta en el cono hembra, y sin apretar, un cono macho que lleva unas canales sobre sus generatrices, cada una de las cuales admite el paso de uno de los alambres constitutivos del cable. Los alambres así colocados pasan por las ranuras guiadoras existentes en el extremo de apoyo de la gata hidráulica y en seguida son tomados por un sistema de cuñas que posee el cuerpo móvil de la gata. La figura 5, muestra esquemáticamente esta disposición.

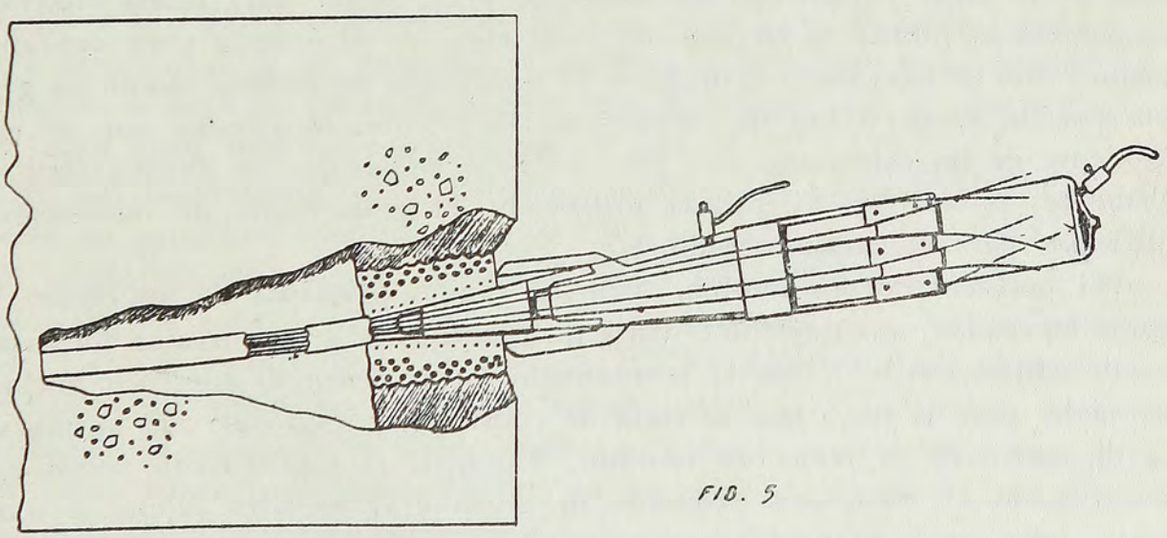


FIG. 5

El sistema Lee-McCall no usa cables formados por un conjunto de alambres de pequeño diámetro, sino que barras de gran diámetro, desde 1/2 pulgada hasta 1 1/8 pulgada. El método se basa fundamentalmente en la solución de un problema metalúrgico cual es la obtención de altas resistencias con grandes diámetros. Estas altas resistencias no son, en todo caso, de la

cuantía de las obtenidas con pequeños diámetros, pero son, por lo menos, suficientes para su utilización en el precomprimido. El anclaje se logra de una manera simple por medio de la confección de hilo en los extremos de la barra y la colocación de una placa repartidora y una tuerca. El estirado se hace como en todos estos sistemas, por medio de una gata hidráulica que toma la barra con un manguito con hilo en ambos lados, y que, por un extremo inserta en la barra y por el otro en la gata misma.

La ventaja que otorga el sistema Lee McCall, en el sentido de la menor tasa de trabajo admisible en el acero, es compensada por una mayor simplicidad de armado, montaje y anclaje de la armadura. La figura 6 muestra un esquema de la forma de trabajo de este sistema

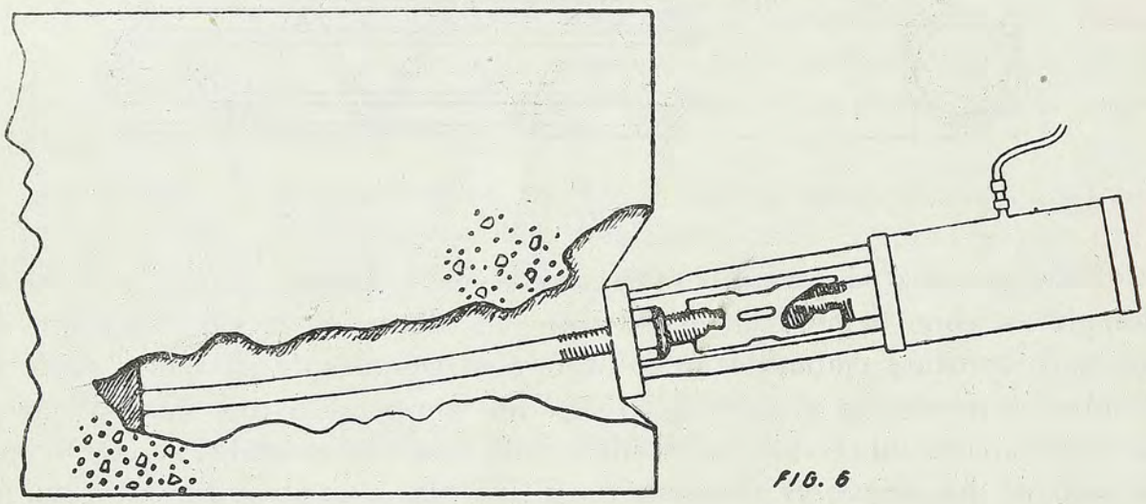


FIG. 6

Queda, antes de terminar, indicar los campos de utilización de la pre-tensión y la post-tensión. La primera técnica, la pre-tensión, se presta principalmente para la producción en fábrica, de gran serie de elementos iguales, tales como vigas y viguetas, elementos de losas, postes para líneas eléctricas o telefónicas, pilotes, y en general, toda clase de elementos para pre-fabricación. Esto se basa en la ventaja de la utilización de moldes complejos gran número de veces, lechos de fabricación de grandes longitudes, con el estiramiento de los cables por una sola vez para la fabricación de una serie de elementos puestos en hileras, la utilización en gran escala de instalaciones de vapor para el curado rapido, etc.

El post-tensado, en cambio, tiene su campo principal de aplicación en obras especiales, como puentes, vigas de grandes luces, estructuras importantes de edificación, etc. Con el post-tensado no es necesario construir anclajes especiales para la pieza que se trata de construir, puesto que ella misma sirve de apoyo en la faena de estirado. También el post-tensado permite la construcción en elementos pequeños de estructuras mayores sujetas a transporte, tales como grandes torres o postes para líneas de transmisión construídos en hormigón, y que posteriormente son unidos para formar la estructura por la misma compresión previa.

En general, la elección del sistema a usar en una obra, salvo los casos típicos reseñados anteriormente, depende de la obra misma y fundamentalmente, del tamaño y número de los elementos por construir. En forma muy

general se puede decir que la pequeña construcción en gran número de elementos es más propia de la pre-tensión que de la post-tensión y que toda obra especial, además de las construídas en trozos para unir posteriormente, es propia de la post-tensión.

V. APLICACION A POSTES PARA LINEAS ELECTRICAS

El poste para líneas eléctricas es una estructura que se caracteriza por dos aspectos fundamentales:

1º Su construcción en gran número de elementos iguales.

2º La influencia importante del transporte y erección, en el costo final de la estructura puesta en servicio.

Estas características se traducen en:

1º Necesidad de la organización de fábricas diseñadas para la producción en masa, y a la vez, trasladables a los centros de gravedad de las zonas de gran consumo.

2º Importancia de la obtención de estructuras livianas y de fácil manejo, transporte y erección.

Las soluciones en actual uso incluyen como materiales, la madera, el hormigón armado y el acero estructural. Respecto a ellas, podemos decir en forma escueta, que la primera, la madera, es de bajo costo, escasa duración y difícil obtención. Su producción es pequeña, inferior en todo caso al consumo y sus centros de producción están concentrados en la zona maderera del sur, sin, desde luego, posibilidad de traslado. El hormigón armado produce estructuras de costo mayor que la madera, muy pesadas, de duración prácticamente indefinida cuando están bien hechas, y no requieren ninguna clase de mantención; sus fábricas son simples y relativamente baratas. El acero conduce a estructuras livianas de fácil montaje, pero de costo subido, requiere mantención y su duración es también prácticamente indefinida, su fabricación se hace en maestranzas no trasladables, pero en este caso el transporte tiene poca influencia por su escaso peso.

No hay duda desde luego, que la elección del material a usar en cada caso, es un problema que no se puede dilucidar aquí, pero sí diremos que en el estado actual de cosas, en líneas rurales de 13.2 KV y líneas de baja tensión, para la zona sur y central del país, la preferencia es utilizar madera, lo cual no se hace totalmente hoy por hoy, por lo ya dicho acerca de la escasa producción disponible. La madera es reemplazada por el hormigón armado extendiendo su campo de acción este material hasta la línea de 66 KV en simple circuito. Desde las líneas de 66 KV en doble circuito hacia arriba, el material utilizado es el acero estructural.

El hormigón pre-comprimido, tiene aquí, sin lugar a dudas, un importante papel que jugar. Posee las ventajas del hormigón armado: costo relativamente bajo, del orden o inferior al del hormigón armado, duración indefinida, facilidad de producción, con fábricas desmontables y relativamente baratas (más caras que las de hormigón armado, en todo caso); no re-

quiere mantención y además produce estructuras elásticas y livianas, de fácil erección y aún desarmables según el caso.

Su único y grave inconveniente, en relación al hormigón armado, es que entre sus materiales, interviene el acero de alta resistencia que no se fabrica en el país, y que produce gastos en dólares. Sin embargo, respecto a cierta estructura metálica, por ejemplo el actual poste flexible, para doble circuito en 66 KV, en que también intervienen gastos en moneda extranjera, la competencia es perfectamente posible.

El sistema de fabricación a usar depende de la estructura de que se trate. Para postes para líneas de transmisión a 13.2 KV y de baja tensión, la solución que parece más adecuada es aquella que incluye el mínimo de piezas especiales (elementos de anclaje, tubos, etc.), y corresponde a la pre-tensión o con anclaje por adherencia; bastaría una estructura de alma llena, similar a los postes actuales de hormigón armado. Una comparación hecha en forma exacta con la solución en hormigón armado para el poste de distribución de 9 metros arroja los siguientes resultados:

	Hormigón armado convencional	**Hormigón pre-comprimido**
Peso	700 Kgs.	420 Kgs.
Cantidad de acero	48 "	12 "
Costo aproximado	$ 2.024 (100%)	$ 1.762.30 (87,1%)

NOTA: En el cálculo del costo del poste pre-comprimido se ha considerado el dólar al cambio de $ 90.20.

A la vista de estas cifras se pueden apreciar las ventajas apreciables que puede introducir la aplicación del precomprimido, en la fabricación de este tipo de postes. En el peso, la reducción de un 40% sobre el hormigón armado convencional, trae consigo grandes ventajas en la faena misma de construcción de líneas. La reducción en la cantidad de acero a la cuarta parte, significa un ahorro considerable si se piensa que el acero especial cuesta un poco más del doble que el acero convencional. El ahorro de un 13% en el costo de fabricación si bien determinado en forma imprecisa, por no tener datos experimentales de producción, significa al menos, que el problema costo no es eliminatorio para el pre-comprimido.

Claro está, que de ese costo de $ 1.762.30, alrededor del 20% son gastos en moneda extranjera, lo que es como dijimos el gran pero en el problema.

No creo conveniente entrar en mayores detalles sobre dispositivos, formas del poste, métodos de producción en serie, etc., lo cual alargaría innecesariamente esta exposición general sobre el pre-comprimido.

Antes de terminar, esbozaremos cuál podría ser una solución para un problema mayor, cual es el reemplazo de los postes metálicos para líneas de 66 KV en doble circuito, por una estructura de hormigón pre-comprimido.

El actual poste, llamado flexible, tiene una altura de 16 metros sobre el nivel del suelo, y su construcción en hormigón precomprimido conduce, a fin de obtener una estructura de fácil transporte, a la solución de trozos que luego se empalman y unen por medio de post-tensión. Este poste podría ser hecho, bien con elementos en forma de barras que le darían el aspecto de una estructura enrejada, bien con elementos tronco-cónicos huecos, de sección elíptica, alineados uno al lado del otro.

En fábrica se producirían estos elementos, en gran serie, utilizando aquellos métodos que producen calidad y rapidez en la fabricación del hormigón, cuales son vibrado enérgico en mesa vibradora, tratamiento al vapor, etc., y luego ellos serían trasladados a su lugar definitivo donde serían montados y aplicada la post-tensión. Un anteproyecto rápido indica que el costo de producción de estos postes alcanzaría aproximadamente a la mitad del costo del actual poste flexible.

Cabe sin embargo señalar que esta técnica no puede ser introducida rápidamente, pues por tratarse de algo nuevo, necesita un lento y costoso período de experimentación, que permita asentar ideas y dominar los detalles que son muchas veces causa del fracaso o del éxito de una técnica nueva.

En nuestro país, grave problema es el de obtener hormigones de alta calidad, no por falta de elementos, sino que fundamentalmente, por el escaso conocimiento e interés de nuestros obreros y técnicos, en lo que se refiere a la tecnología del hormigón. La falta de respeto a las especificaciones, la tendencia a obtener avance antes que calidad, es un serio peligro que es necesario vencer si se desea obtener buenas estructuras pre-comprimidas.

La aplicación de la comprensión previa en postes para baja tensión y líneas rurales, está siendo estudiada por Endesa por medio de su fabricación en escala experimental y el ensaye de los elementos resultantes. Aunque aún dichas experiencias no están terminadas, podemos adelantar que los resultados obtenidos hasta el momento pueden calificarse de buenos y auguran el éxito de la idea de estudiar en forma más detenida esta técnica distinta.

En un próximo número continuaremos refiriéndonos al Hormigón Precomprimido a través de la publicación de experiencias en postes para líneas de distribución realizadas por el autor, en el Laboratorio Central de Hormigón de ENDESA.