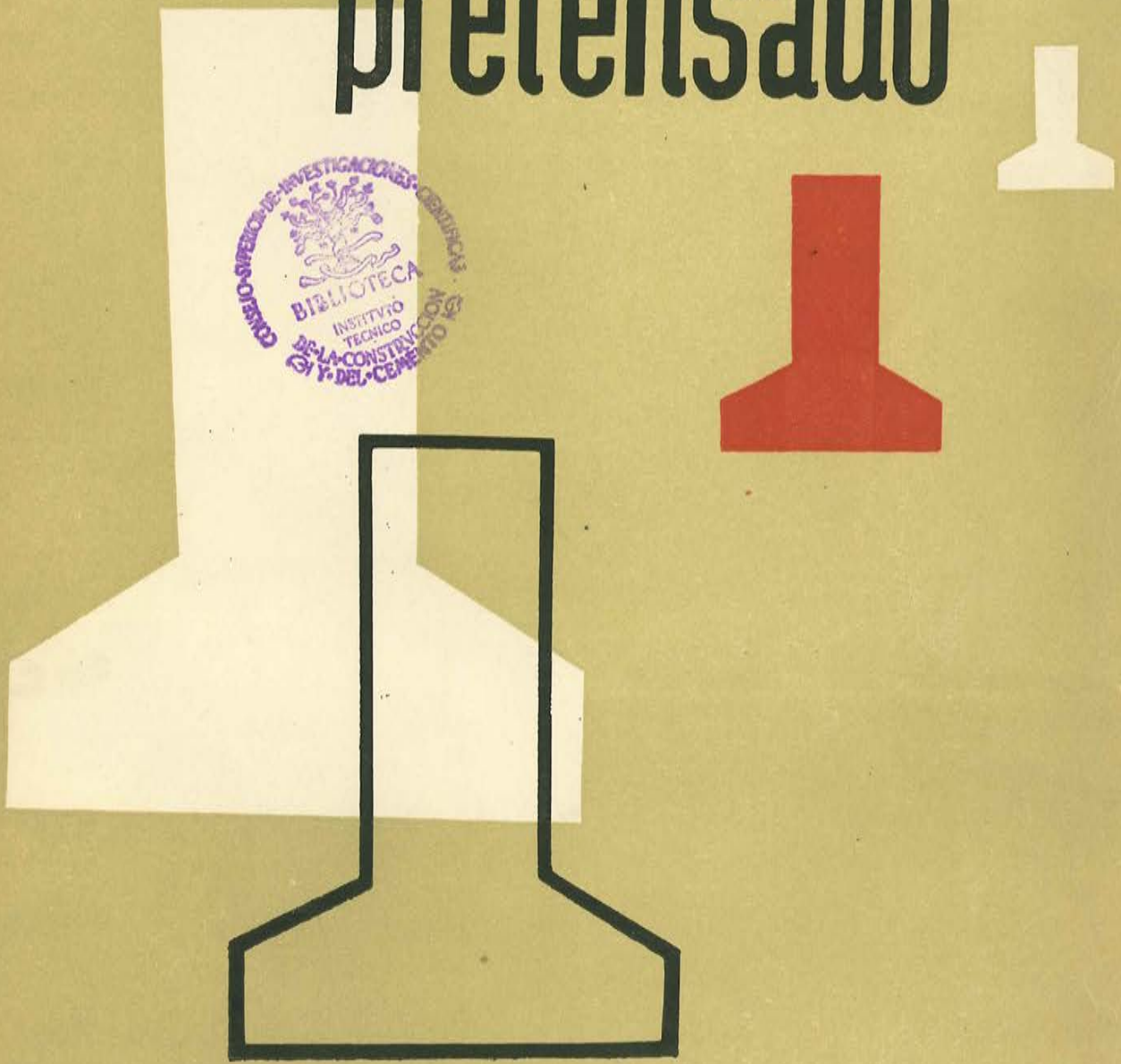
ULTIMAS NOTICIAS SOBRE

hormigón pretensado



CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTIFICAS
BIBLIOTECA
INSTITUTO TECNICO DE LA CONSTRUCCION Y DEL CEMENTO

BOLETIN NUM. 21 DE LA ASOCIACION ESPAÑOLA DEL HORMIGON PRETENSADO
DEL INSTITUTO TECNICO DE LA CONSTRUCCION Y DEL CEMENTO

Documento descargado de www.e-ache.com el 04/12/2025

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

N° 21

Julio-Agosto 1954

- INSTITUTO TECNICO DE LA CONSTRUCCION Y DEL CEMENTO -

Documento descargado de www.e-ache.com el 04/12/2025

I N D I C E

457--0--14	Hormigón con solicitación previa de tracción. Por Kurt Billig	Pág. 1
457--2--5	La tracción simple en el hormigón pretensado. Por A. Páez	" 22
837--4--6	Un nuevo tipo de traviesa, de hormigón pretensado	" 43

- - -

N o t a: 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.

Documento descargado de www.e-ache.com el 04/12/2025

457-0-14 HORMIGON CON SOLICITACION PREVIA DE TRACCION

Autor: Kurt Billig

"HORMIGON ELASTICO", Agosto 1951

- - -

El autor propone un método para mejorar las condiciones resistentes de las piezas de hormigón sometidas a esfuerzos de compresión. Dicho método conduce a un nuevo tipo de estructura cuya denominación más adecuada parece ser la de "pretracciona da" ya que, en definitiva, lo que se hace es crear, en el hormigón de la pieza o elemento, una tensión previa de tracción.

Se indican, la forma de realizar esta "pretraccion" y algunas de sus aplicaciones más importantes como son: soportes, estructuras en arco, vigas de gran luz, presas, etc, comentándose las principales ventajas que tal sistema ofrece.

Finalmente, se expone también el procedimiento de "preflexión" que resulta de la adecuada combinación de los sistemas de "pretracción" y "precompresión".

Se pregunta a menudo qué mejora implica el pretensado en la ejecución de numerosos estructuras de hormigón solicitadas preferentemente a compresión, en especial soportes y paredes. La pregunta es natural, dado que la mayor parte de las estructuras de hormigón se utilizan para trabajar a compresión en vista de la elevada resistencia que a esta clase de esfuerzo presenta el hormigón. De acuerdo con la opinión generalizada de los expertos en tal materia, hay que responder que el pretensado no tiene ninguna utilización, desde el punto de vista económico, en tal tipo de estructuras.

Documento descargado de www.e-ache.com el 04/12/2025

Actualmente mis conceptos sobre el hormigón pretensado han cambiado radicalmente con respecto a lo que eran hasta hace poco, debido a mi descubrimiento del procedimiento constructivo que describo a continuación. Dicho procedimiento conduce a un tipo de estructura cuya denominación más adecuada parece ser la de "hormigón pretraccionado". Me parece ahora que el pretensado tiene asignada una misión mucho más vasta en el mejoramiento de elementos de hormigón y de construcciones sometidas a compresión que en las estructuras sometidas a tracción y flexión. Todo lo - que se ha conseguido hasta la fecha con el hormigón pretensado ha sido necesariamente tan sólo una pequeña fracción de lo que de él es posible esperar, debido a que hasta el presente la técnica del pretensado ha sido utilizada en estructuras de hormigón solicitadas principalmente a tracción o a flexión, lo que constituye la parte más reducida de las aplicaciones del hormigón, no habiendo tocado aún el amplio campo de las estructuras de hormigón solicitadas principalmente a compresión.

Hasta el presente, y con respecto a las características esenciales del hormigón precomprimido, se ha razonado y definido de la manera siguiente: el hormigón es un material de elevada resistencia a compresión, siendo reducida su resistencia a - tracción y su ductilidad. En las obras de hormigón armado, las barras de acero refuerzan el hormigón extendido, mejorando asi su resistencia a la tracción. La ductilidad, no obstante, permanece reducida. En las partes extendidas de las estructuras de hormigón armado aparecen fisuras capilares bajo cargas menores que las específicas de trabajo. En el hormigón precomprimido, tanto la resistencia a tracción como la ductilidad del hormigón son mejoradas mediante la introducción en el mismo de una compresión previa.

Documento descargado de www.e-ache.com el 04/12/2025

Se define generalmente al hormigón precomprimido, como un hormigón en el que se introduce una compresión previa, de tal modo y en tal magnitud, como para anticipar, contrarrestar y suprimir las tensiones de tracción originadas por las cargas exteriores. Se destaca así expresamente el beneficio que se obtiene, mediante la precompresión, en las características de tracción y ductilidad del hormigón. Como segunda ventaja del hormigón precomprimido se señala que la armadura de acero puede hacerse trabajar a una tensión mucho mayor que en la construcción común de hormigón armado. De ahí, la economía en peso de acero.

De acuerdo con la definición aceptada, en la teoría y en la práctica, las tensiones previas en el acero son de tracción, siendo de compresión en el hormigón. Este procedimiento es, por tanto, de aplicación ventajosa en elementos estructurales de hormigón que resultan solicitados a la tracción bajo las cargas exteriores, independiente de si ello se debe a cargas axiles o a momentos flectores. De acuerdo con esta acepción general, no tiene objeto utilizar este procedimiento en aquellos elementos estructurales que deben soportar cargas que originan tensiones de compresión.

En algunos casos el procedimiento convencional de precompresión origina una pequeña tensión previa de tracción en la zona comprimida de la estructura. Pero dicha tensión es de orden secundario, siendo originada por la gran excentricidad de los órganos precompresores, existiendo varios métodos para evitar o neutralizar esa solicitación de tracción. Resulta así que el objeto principal de la tensión previa es el de precomprimir el hormigón.

En contraste con lo expuesto, el nuevo método constructivo que se describe en este artículo, trata de un procedi -

Documento descargado de www.e-ache.com el 04/12/2025

miento de pretensado que introduce en el hormigón un estado previo de tracción.

Mientras la precompresión -en el sentido conocido- se aplica a estructuras que pueden trabajar a tracción, ya sea pura o por flexión, la tensión previa -en el sentido propuesto- se aplica a estructuras solicitadas a compresión, pura o por flexión. Este método consiste en la aplicación del principio general de la teoría del pretensado a elementos comprimidos tales como soportes, paredes, etc. De acuerdo con este nuevo procedimiento, el hormigón es presolicitado durante la fase de aplicación del peso propio del elemento comprimido, y, en tal magnitud, que queden neutralizadas todas las tensiones de compresión debidas al peso muerto. En consecuencia los soportes de hormigón pretraccionado pueden soportar el peso propio de estructuras pesadas, estando el hormigón de dichos soportes sin comprimir. En esas condiciones, su tensión y deformación oscilan alrededor de un valor nulo. Toda la carga de la estructura es absorbida con órganos de acero de alta resistencia solicitados a la compresión con 60 Kg/mm^2 o más.

En lo que respecta a los métodos que se conocen actualmente para la obtención de la precompresión del hormigón, éstos se basan principalmente en la absorción, por parte de este último, de las reacciones producidas por alambres de acero fuertemente estirados. En cambio la presolicitación del hormigón, que se propone aquí, se obtiene mediante la reacción contra el hormigón de elementos de acero altamente comprimidos, tales como tubos, secciones prismáticas o unidades rígidas similares de materiales de elevada resistencia, que actúan como puntales.

El hormigón pretensado conocido, puede utilizarse en riostras, tirantes, tubos sometidos a presión, túneles, depósitos

Documento descargado de www.e-ache.com el 04/12/2025

para líquidos, zona extendida de vigas, en viguetas y losas, zona extendida de presas y otras estructuras hidráulicas, elementos prefabricados como postes, pilotes, etc.

El hormigón pretraccionado puede emplearse en: soportes y pilares (para puentes), estructuras en arco, zona comprimida de vigas, viguetas y losas y elementos comprimidos moldeados "in situ", especialmente aquéllos que deben soportar un gran peso muerto.

La precompresión y la pretracción pueden aplicarse en varias partes de una misma estructura de hormigón. Su efecto conjunto es igual a la superposición de los dos procedimientos, dando como resultado una estructura preflectada.

En el caso del hormigón precomprimido, la tensión del acero puede realizarse mediante pre-tracción contra anclajes exteriores o la post-tracción contra el hormigón endurecido.

En el hormigón presolicitado a tracción, el acero puede ser precomprimido mediante cables de acero estirado. En caso necesario el efecto del pretensado puede ser anulado mediante un nuevo estirado de esos cables.

El procedimiento que se describe es aplicable a aquellas estructuras que, de acuerdo con las cargas exteriores, trabajan principalmente a compresión. La finalidad no es tanto el mejoramiento de algunas propiedades de los materiales de construcción como la reducción del peso propio de las estructuras, ya sean de acero o de hormigón. Para reducir el peso de la estructura deben aumentarse las tensiones efectivas de trabajo de los materiales.

En las obras de hormigón armado ordinario, las tensiones admisibles se limitan: en el hormigón, debido a su resis

Documento descargado de www.e-ache.com el 04/12/2025

tencia a compresión, con el coeficiente de seguridad, y, en el acero, debido al límite fijado para la deformación. En el método de pretracción propuesto, las secciones transversales de hormigón pueden soportar mayores cargas de compresión sin aumentar los límites de las tensiones admisibles. La capacidad adicional de carga está dada por órganos de acero, pero, insistimos, sin aumentar las tensiones admisibles en la estructura.

Este nuevo método de introducción de tensiones previas, mediante el relajamiento de puntales de acero y en que el hormigón resulta solicitado a medida que se van aplicando las cargas externas, se describirá con un ejemplo sencillo. La fig.1 es un esquema que ilustra acerca de la aplicación de este método en el caso de una columna cargada axilmente con un forjado de hormigón. La precompresión se logra mediante un cable de acero pretraccionado que es portador eventual del esfuerzo de precompresión y un puntal de acero, precomprimido, que es el portador permanente de dicho esfuerzo. Entre el cable y el puntal se colocan, a intervalos regulares, placas para evitar el pandeo del segundo. Tanto uno como otro se mantienen en equilibrio mediante un dispositivo de sujeción formado por cuñas, un manguito deslizable y espaciadores. Todo el conjunto puede fabricarse en taller, llevándose a la obra listo ya para ser colocado, o bien puede realizarse en la obra misma.

Dicho elemento así constituido se empotra en la columna de hormigón en posición cerrada durante el tiempo que dure el proceso de endurecimiento del hormigón. Una vez que este alcanzó la resistencia requerida, se afloja el dispositivo de sujeción y se retira el cable. Para esta operación se acopla un gato hidráulico, como se indica en la figura con las flechas, y se acciona el gato para anular las fuerzas de reacción de los

Documento descargado de www.e-ache.com el 04/12/2025

espaciadores, los cuales se retiran. Luego se descarga el gato lenta y gradualmente, con lo que se relaja el cable. Con ello, el puntal de acero precomprimido se expande levemente, lo cual separa el hormigón recién fraguado de los encofrados y del andamiaje. En el mismo grado en que se produce el relajamiento del cable se hace efectiva la transmisión del peso propio del piso del encofrado a la columna.

Durante el proceso de eliminación del cable, la estructura del forjado resulta automáticamente desencofrada, siendo la fuerza de precompresión del puntal reemplazada por el efecto del peso muerto del forjado. El cable con sus accesorios se retira para volverlos a utilizar.

Un dispositivo semejante al descrito se coloca en la base del soporte, a la que se puede llegar para quitar los amarres una vez relajado el cable. La pequeña expansión del puntal es transferida por adherencia al hormigón adyacente de la columna, que resulta así con un estado previo de tracción. Por último, el espacio hueco dentro del puntal y el agujero en la cara superior de la losa del piso se rellenan con mortero de cemento o con hormigón de calidad.

Con esta descripción se demuestra que, aunque el hormigón de la columna resulta fuertemente pretraccionado por la carga completa de la precompresión anulada del puntal de acero, la mayor parte de dicho efecto no resulta en realidad aparente como una tensión real. Ello se debe a que la tensión previa se produce en el hormigón simultáneamente, y con la misma magnitud, con la compresión que origina la superposición del peso propio. La tensión resultante se mantiene, por lo tanto, dentro o alrededor del valor nulo. Sólo resulta efectiva,

Documento descargado de www.e-ache.com el 04/12/2025

como estado previo de tracción en el hormigón, aquella parte - igual a la diferencia entre la fuerza precompresora P y el peso propio G. Dicha pretracción residual es σ_p, y su valor se determina más adelante.

El elemento precompresor de la columna está constituido por un puntal de acero de elevada resistencia con una sección A_p y por un cable de acero también de gran resistencia y sección A_c solicitados uno contra el otro. La tensión de tracción en el cable es σ_c (supongamos el 80% de la tensión límite). La compresión en el puntal es σ_{p1} (por ejemplo el 60% de la tensión límite). Ambas tensiones están en equilibrio mediante bloques de anclaje, uno en cada extremo. Por lo tanto, la carga de precompresión es

$$P = A_c \sigma_c = A_p \sigma_{p1}$$

El elemento así constituído se coloca verticalmente en el eje de la columna a construir. Se coloca luego el encofrado en su posición y se hormigona. Debe tenerse cuidado de que el puntal de acero resulte bien adherido al hormigón, mientras que el cable no debe estar en contacto con éste. Se obtiene un dispositivo apropiado eligiendo un puntal tubular con un cable coaxil. El forjado que ha de soportarse se hormigona entonces, en la forma usual, sobre encofrados y andamios.

Una vez que el hormigón alcanza la resistencia necesaria se desencofra la columna y se retira el cable. A medida - que el cable va relajándose, la fuerza reactiva del puntal es transferida al peso muerto del piso. Para obtener un resultado satisfactorio en el desencofrado automático del piso, se tratará de tener una fuerza inicial en el cable ligeramente superior al peso propio del piso.

Documento descargado de www.e-ache.com el 04/12/2025

La tensión de compresión σ_{p2} en el puntal, después del relajamiento, es ligeramente inferior a la tensión σ_{p1} en el estado inicial. Como término medio

$$\sigma_{p2} = \frac{G}{A_p}$$

siendo G el peso propio de la estructura soportada por la columna precomprimida. La pérdida de pretracción en el acero, debido a la fluencia del material y al acortamiento elástico del hormigón, es

$$\Delta_{1\sigma} = \sigma_{p1} - \sigma_{p2} = \frac{P - G}{A_p}$$

Tomando en consideración la tensión de tracción σ_t en el área de hormigón A_h producida por el relajamiento, se tendrá

$$G = A_p \cdot \sigma_{p2} - A_h \cdot \sigma_t$$

Haciendo

$$\Delta_{1\sigma} = m\sigma_t \quad y \quad A_p = p \cdot A_h$$

$$P - G = A_p \cdot \Delta_{1\sigma} + A_h\sigma_t = (1 + mp)\, A_h \cdot \sigma_t$$

Con lo cual la pretracción residual en el hormigón será:

$$\sigma_t = \frac{P - G}{(1 + mp)\, A_h}$$

y la pérdida en la compresión preliminar del acero

$$\Delta_{1\sigma} = \frac{m\,(P - G)}{(1 + m.p)\, A_h}$$

Documento descargado de www.e-ache.com el 04/12/2025

Un valor aceptable para la tensión residual de tracción en el hormigón, despues de la transmisión de esfuerzos, puede ser el de 10 Kg/cm^2, valor suficientemente seguro contra la fisuración. Dicha tensión de tracción es transmitida mediante la adherencia. La introducción de las cargas del piso, paredes y otras cargas permanentes han de transformar rápidamente en compresión ese esfuerzo de tracción.

Si la fuerza pretensora P, es exactamente igual al peso propio G, que debe soportar la columna, no habrá ninguna alteración en las deformaciones como consecuencia de la sustitución de dicha fuerza por el peso propio. La tensión en el hormigón de la columna será exactamente nula, y la precompresión en el puntal de acero será la misma que antes de la transmisión de esfuerzos:

$$\sigma_t = o \qquad \Delta_{1\sigma} = o \qquad \sigma_{p1} = \sigma_{p2}$$

Cuando se reemplaza la fuerza inicial producida por el cable, por el peso propio de la estructura, toda la carga es soportada por el elemento de acero altamente precomprimido, mientras que el hormigón está sin tensión o a una tensión muy reducida. De ese modo, mientras la columna de hormigón pretraccionado soporta grandes cargas, el hormigón de la misma está en un estado de tracción.

Introduciendo luego las sobrecargas, tanto el hormigón como el acero absorben su parte, de un modo similar a lo que acontece en el hormigón armado común. La mayor parte de la carga es soportada por el hormigón, cambiando su pretracción por precompresión dentro de los valores admisibles usuales (por ejemplo 70 Kg/cm^2). Las tensiones de compresión en el acero aumentan de 560 a 620 Kg/cm^2, o sea aproximadamente un 10%.

Documento descargado de www.e-ache.com el 04/12/2025

Con la supresión y la reaplicación de la sobrecarga, la tensión en el acero oscila entre 62 y 68 Kg/mm^2, mientras que la tensión en el hormigón varía en todo el intervalo comprendido entre -10 y +70 Kg/cm^2.

De acuerdo con este método de precompresión resulta que todo el peso propio es soportado por el acero de elevada resistencia, no existiendo tensiones de compresión en el hormigón debidas al peso muerto. Con ello, la tensión admisible del hormigón está íntegramente en disposición de absorber las cargas externas y aún más, debido a la pretracción residual en el hormigón.

La tensión admisible en el puntal puede aprovecharse íntegramente, en lo que se refiere a la buena calidad del acero, debido a que la contracción del mismo, por efecto de la pretracción σ_{p1}, tiene lugar antes de colocar el hormigón circundante.

Resumiendo, los hechos sobresalientes de este método constructivo son:

1) Todo el peso propio es soportado por los elementos de acero de la columna. La sección de hormigón debe dimensionarse tan sólo para soportar la sobrecarga, con lo que aquélla resulta considerablemente menor que en el caso del hormigón armado común. Puede utilizarse un hormigón de calidad corriente, siendo preferible uno de mejor calidad. Las tensiones de trabajo en el hormigón no difieren de las usadas en la construcción común.

2) Puede utilizarse acero de alta calidad con tensiones de trabajo elevadas, debido a que la gran deformación

Documento descargado de www.e-ache.com el 04/12/2025

(contracción) es eliminada del acero durante el proceso de precompresión. Las tensiones resultantes en la estructura terminada, son del mismo orden que las que se obtienen en la construcción de hormigón armado corriente.

El valor superior de las tensiones de trabajo no está definido por las deformaciones excesivas sino tan sólo por la seguridad contra la fluencia y el deslizamiento. Cuanto más elevados son dichos valores tanto mayores pueden ser las tensiones de trabajo (el acero de alta resistencia no tiene un límite de fluencia aparente).

Hasta el presente las estructuras de hormigón, sometidas a tensiones de compresión, se construyen con hormigón armado común. Si se utilizan, de acuerdo con lo expuesto, puntales de acero precomprimido, la sección transversal, tanto del hormigón como del acero, puede ser considerablemente reducida. La reducción en la sección transversal de una columna cargada axilmente puede llegar al 50% o más; el ahorro en peso de acero puede ser del orden de un 80% o más aún, siempre que la calidad de éste sea la adecuada. A mayor relación entre peso propio y sobrecarga que debe soportar la columna, mayor es la posibilidad de reducir las dimensiones transversales.

Documento descargado de www.e-ache.com el 04/12/2025

ESTRUCTURAS EN ARCO

Hace 30 años el Prof. Melan propuso un método para someter a carga previa estructuras en arco, de hormigón armado, con objeto de mantener bajas las tensiones en el hormigón. Su sistema consiste en la utilización de armaduras rígidas hechas con acero para estructuras, que deben soportar no sólo la estructura del arco sino también una cantidad de balasto igual al peso propio del arco a construir. Mientras la estructura va siendo erigida sector por sector, el balasto es retirado y reemplazado por un peso igual de hormigón. De ese modo, todas las tensiones, debidas al peso propio, son absorbidas por el acero, con lo que la tensión admisible en el hormigón puede aprovecharse íntegramente para soportar las cargas exteriores.

Aplicando mi método de construcción al caso de estructuras en arco, se puede evitar la operación engorrosa de poner y quitar una gran cantidad de balasto, introduciendo fuerzas previas en la estructura de acero. La tensión de trabajo en dicha estructura puede ser un múltiplo de la tensión admitida con anterioridad, y además el hormigón recibe un esfuerzo de pretensado que abarca el intervalo corriente de tensiones admisibles para el hormigón.

Para construir un arco de hormigón con un estado previo de solicitación, se comienza por ejecutar una estructura ligera de acero de alta resistencia. En forma coaxil con la estructura se colocan cables de acero, también de alta resistencia, asegurándose contra el pandeo mediante tornapuntas colocadas a cortos intervalos. Los cables y la estructura de acero se tensionan uno contra el otro con una fuerza previa ligeramente superior a la presión que actuará sobre el arco a causa del pe

Documento descargado de www.e-ache.com el 04/12/2025

so de hormigón. A medida que progresa la colocación del hormigón y con ello la estructura del arco, se reduce gradualmente la tensión en el cable rebajando la tensión de los gatos, mientras que la compresión en la estructura de acero se mantiene constante debido al incremento en el peso propio. Una vez completada la operación del hormigonado del arco, del 90 a 95 % del esfuerzo de pretensado de los cables ha sido eliminado y una precompresión equivalente en el arco de acero ha sido reemplazada por el efecto del peso muerto. Ya endurecido el hormigón, se elimina la pretracción remanente en los cables y se los retira. Debido a este último relajamiento, que no es equilibrado con ningún peso muerto ni sobrecarga, se reduce ligeramente la compresión en el acero, con lo que el hormigón resulta solicitado a tracción. Con un cálculo aproximado del esfuerzo de pretensado dicha tensión residual de tracción queda reducida a un valor aceptable, por ejemplo 10 Kg/cm^2, como en el caso anterior.

Este método produce también, por consiguiente, un aumento considerable del intervalo de utilización de las tensiones de trabajo de ambos materiales. El efecto económico de dicho método equivale a utilizar un hormigón solicitado con la siguiente tensión de trabajo:

$$\sigma_c = \sigma_{c\ adm} + \sigma_g + \sigma_p$$

en donde:

$\sigma_{c\ adm}$ = tensión admisible de compresión para el hormigón utilizado.

σ_g = tensión de compresión en el hormigón debido al peso propio del arco.

σ_p = pretracción residual en el hormigón, o sea 10 Kg/cm^2.

Documento descargado de www.e-ache.com el 04/12/2025

Debido a este aumento de la tensión admisible, la sección transversal del arco de hormigón con solicitación previa de tracción será considerablemente menor que en el caso de la construcción común. Con respecto al acero, dicho método permite la utilización de acero de elevada resistencia con tensiones de trabajo en compresión muy superiores a las admisibles en las construcciones ordinarias:

$$\sigma_t = \sigma_{t\ adm} + \sigma_{ap\ ef}$$

siendo:

$\sigma_{t\ adm}$ = tensión admisible de compresión en el acero en las construcciones ordinarias de hormigón armado.

$\sigma_{ap\ ef}$ = precompresión efectiva en el acero del arco del hormigón presolicitado.

Generalmente $\sigma_{ap\ ef}$ será un múltiplo de $\sigma_{t\ adm}$. En consecuencia, la sección necesaria de acero de alta resistencia para el arco será tan sólo una pequeña fracción del peso del acero, requerido para un arco de hormigón armado corriente y con la misma capacidad de resistencia.

A mayor peso propio de la estructura en arco, mayor será el ahorro de materiales. Para luces muy grandes el peso propio de un puente en arco de hormigón con solicitación previa de tracción será del mismo orden que el de un arco de acero, pero la cantidad de acero a utilizar será tan sólo una pequeña fracción del acero necesario para este último.

Los efectos económicos de la pretracción en estructuras con solicitación previa son por lo tanto similares a aquéllos que se obtienen en las estructuras de hormigón precom

Documento descargado de www.e-ache.com el 04/12/2025

primido. No obstante, el procedimiento descrito es esencialmente diferente de los métodos conocidos y es aplicable a un grupo completamente distinto de estructuras, consideradas anteriormente como inapropiadas para los procedimientos de pretensado.

PRE-FLEXION

Es sabido que los métodos de pretensado son tanto más efectivos técnica y económicamente cuanto más se aproximan los esfuerzos de pretensado a las tensiones producidas por las cargas, de tal modo que al actuar éstas se eliminan mutuamente. Por lo tanto los órganos tensores solicitados a tracción resultan favorablemente pretensados por compresión. Ello es aplicable también al caso de muchas estructuras hidráulicas.

Para aquellos elementos constructivos que deben resistir momentos flectores, no se conoce un procedimiento de pretensado que se anticipe y finalmente anule las tensiones debidas a las cargas. El procedimiento más aproximado para contrarrestar las tensiones de flexión consiste en precomprimir la zona extendida, o sea, introducir una precompresión excéntrica en el elemento constructivo.

De acuerdo con la práctica actual se entiende por hormigón pretensado a aquel hormigón que se precomprime para - los elementos estructurales que trabajan a tracción o bien que se precomprime con una fuerza excéntrica en el caso de los elementos flexionados. En cambio en este artículo se trata del hormigón presolicitado para ser utilizado en elementos estructurales que deben trabajar a la compresión, y, del hormigón preflexionado, para el caso del trabajo a la flexión.

Documento descargado de www.e-ache.com el 04/12/2025

Combinando la pretracción de la zona comprimida con la precompresión de la zona extendida de un elemento estructural que debe trabajar a flexión simple, se consiguen eliminar todas las tensiones de flexión o reducirlas a un valor preestablecido. La fig. 2 muestra una serie de diagramas de tensión para explicar el desarrollo de tensiones en la sección transversal de hormigón bajo las distintas condiciones de pretensado debidas a las diversas etapas de carga. La primera línea horizontal es característica para el nuevo procedimiento de pretensado, de acuerdo con lo dicho más arriba. La segunda línea horizontal describe el proceso de precompresión, tal como se conoce hoy día. La tercera y cuarta línea dan la combinación de ambos procesos, obteniéndose como resultado el estado de preflexión; siendo en el caso de la tercera línea $M_p = -M_g$ y en la cuarta $M_p = -M_g - 1/2\ M_s$.

La primera línea vertical de la fig. 2 muestra el tipo y la posición de los órganos pretensores en la sección de hormigón. Las líneas verticales siguientes dan los respectivos diagramas de tensiones para los siguientes estados de carga: pretracción, peso propio (estos dos estados nunca se presentan separadamente), pretracción más peso propio, sobrecarga y tensiones resultantes.

Haciendo el valor del momento preflector M_p igual al momento M_g debido al peso propio, las tensiones resultantes en el hormigón σ_{p+g} serán nulas en toda la sección transversal. Las únicas tensiones en el hormigón de la estructura preflexionada serán las causadas por la sobrecarga, σ_s.

Más aún, el valor del momento preflector M_p puede hacerse igual al del momento producido por el peso propio más la mitad del momento debido a la sobrecarga; es decir $M_p = -M_g - 1/2\ M_s$.

Documento descargado de www.e-ache.com el 04/12/2025

En ese caso las tensiones resultantes en el hormigón para ese estado de carga serán nulas en toda la sección. A medida que la sobrecarga crece o decrece con respecto al valor medio, las tensiones en el hormigón oscilarán entre las de compresión o tracción, siendo su valor máximo en las fibras extremas no superior a $\pm$ 1/2 σ_s.

Las tensiones de compresión en el elemento pretensor de acero (arriba) y las tensiones de tracción en el elemento precompresor (abajo), son distintas entre si, dependiendo ello de la calidad del acero utilizado. Los valores de las tensiones preliminares son generalmente $\sigma_{pef} = 1/2\ \sigma_{tma}$, una vez producidas las pérdidas inevitables por fluencia y deslizamiento del hormigón. Las variaciones en las tensiones del acero de ambos elementos por efecto de las cargas exteriores se determinan mediante la expresión $\sigma_{ts} = m.\sigma_s$.

VIGAS DE GRAN LUZ

Las vigas de hormigón armado para grandes luces resultan pesadas, siendo precisamente el aumento de peso propio la razón principal para el reducido límite económico de la luz. Pretesando el acero en la forma conocida se reducen considerablemente, o se eliminan del todo, las tensiones de tracción en el hormigón. La tensión de compresión resulta así del orden de la compresión producida por la sobrecarga.

Utilizando una combinación de pretracción y precompresión para obtener solamente un momento preflector sin esfuerzo axil resultante, las tensiones en toda la sección del hormigón pueden ser reducidas a cero para cualquier estado de carga prefijado, siendo absorbidas las fuerzas internas mediante ace

Documento descargado de www.e-ache.com el 04/12/2025

ro de gran resistencia trabajando a elevadas tensiones. Este estado de carga se elegirá, con ventaja, igual a la sobrecarga media, de modo que las tensiones en el hormigón oscilarán tan sólo entre valores pequeños al reducir o aumentar la sobrecarga - (fig. 3). Como la fabricación de vigas preflectadas se realiza siempre de tal modo que el momento preflector y el peso propio resulten efectivos simultáneamente, resulta que ni las tensiones debidas a la precompresión ni las debidas al peso propio llegan a producirse en realidad. Ambas se contrarrestan mutuamente a medida que se generan, con lo que las tensiones resultantes en todas las fibras resultan prácticamente nulas. El peso propio resulta así soportado íntegramente por el acero, de gran resistencia, con deformaciones muy pequeñas. De ese modo el peso propio puede ser muy grande y las luces a cubrir también. Toda la resistencia del hormigón queda así disponible para absorber las - tensiones debidas a parte de la sobrecarga. Ello, a su vez, permite absorber grandes sobrecargas.

Para realizar un ajuste exacto de las fuerzas de pretensado en ambas zonas, deberán dejarse los dispositivos de pretensado preferiblemente sin adherir con el hormigón, en la zona extendida. El estirado de dichos dispositivos de acero, y el relajamiento del cable provisional en la zona comprimida, deberán hacerse por pasos sucesivos, de modo que la fuerza axil resultante esté siempre alrededor del valor nulo. Si esta regla se cumple, las tensiones de flexión en cualquier punto de la sección transversal serán despreciables desde el comienzo del proceso de preflexión hasta el final en que todo el peso propio y posiblemente parte de la sobrecarga, comiencen a actuar. Si las tensiones de tracción debidas a la máxima sobrecarga exceden del valor admisible, dicho exceso puede ser absorbido mediante alambres - pretensados adicionales.

Documento descargado de www.e-ache.com el 04/12/2025

El mismo procedimiento de construcción puede aplicarse al caso de vigas de celosía utilizando cables pretensados en los elementos estirados y puntales precomprimidos de acero en los miembros comprimidos.

PRESAS

La aplicación del procedimiento descrito, al caso de presas hidráulicas, conduce a la inversión de las tensiones en la estructura, en la que se introducen tensiones de compresión, mediante cables pretensados, en la parte de aguas arriba y tensiones de tracción, mediante puntales comprimidos, en la parte de aguas abajo de la estructura.

La fig. 4 ilustra esquemáticamente dicho tipo de estructura. Para facilitar la construcción es aconsejable que los cables de pretensado no se anclen en la masa de hormigón, siendo preferible anclarlos en compartimiento colocados en el suelo y a cierta profundidad y siendo estirados en la coronación mediante gatos y anclados bajo tensión. Los puntales precomprimidos en la parte opuesta, se anclan al hormigón circundante, mientras que los cables alojados en su interior pueden deslizarse libremente. En algunos casos puede ser aconsejable tomar las precauciones necesarias para el caso en que sea necesario anular ambos tipos de pretensado, si llegara a vaciarse la presa. En ese caso los esfuerzos de pretensado pueden anularse accionando las dos series de gatos en la coronación, de tal modo que se rebaje la tensión en los cables aguas arriba y se estiren los de aguas abajo hasta su valor inicial.

Como el peso propio en ese tipo de estructura pierde su importancia, ésta puede ser hueca, con el ahorro de un gran volumen de hormigón en el núcleo.

Documento descargado de www.e-ache.com el 04/12/2025

Con la descripción realizada de soportes, arcos, vigas y presas con tensiones previas de tracción, se ha querido demostrar cómo este método de construcción puede ser aplicado al caso de numerosas estructuras, pero ello no quiere decir que éstos sean los únicos tipos de construcciones que pueden tratarse mediante el procedimiento descrito. Todo lo contrario; los casos mencionados son tan sólo ejemplos típicos dentro del numeroso grupo de estructuras que, por efecto de las cargas, resultan solicitadas principalmente a compresión ya sea pura o por flexión.

- - -

Documento descargado de www.e-ache.com el 04/12/2025

Con la descripción realizada de soportes, arcos, vigas y presas con tensiones previas de tracción, se ha querido demostrar cómo este método de construcción puede ser aplicado al caso de numerosas estructuras, pero ello no quiere decir que éstos sean los únicos tipos de construcciones que pueden tratarse mediante el procedimiento descrito. Todo lo contrario; los casos mencionados son tan sólo ejemplos típicos dentro del numeroso grupo de estructuras que, por efecto de las cargas, resultan solicitadas principalmente a compresión ya sea pura o por flexión.

- - -

Documento descargado de www.e-ache.com el 04/12/2025

- Instituto Técnico de la Construcción y del Cemento -

457-2-5 LA TRACCION SIMPLE EN EL HORMIGON PRETENSADO

Autor: Alfredo Páez Balaca.- Ingeniero de Caminos

- - -

S i n o p s i s

Se hace un estudio de la tracción simple en el hormigón pretensado, deduciéndose las ecuaciones para el cálculo de las piezas sometidas a este tipo de solicitación tanto en el caso de que se construyan con armaduras pretesas como postesas.

Al final del artículo, y con el fin de aclarar conceptos, se incluye un ejemplo numérico de aplicación práctica del método de cálculo propuesto.

Una de las ventajas que, desde el punto de vista económico, presenta la técnica del hormigón pretensado, es la de permitir el empleo, como armadura, de aceros de alta calidad, los cuales, a igualdad de esfuerzo resistido, resultan más baratos que los redondos normalmente utilizados en el hormigón armado ordinario. Cuanto mejor es el acero, mayor es la economía obtenida. Sin embargo, cuando se trata de elementos trabajando en flexión, este beneficio queda, en parte, anulado. La armadura pretesa no puede colocarse, en general, tan próxima al borde de la pieza como la armadura ordinaria. Suele ir más alta para evitar que la pieza perezca bajo el momento mínimo. El brazo mecánico de la sección queda así reducido diluyéndose una parte de la economía alcanzable por la sustitución.

Documento descargado de www.e-ache.com el 04/12/2025

No es éste el caso de las piezas sometidas a un esfuerzo axil de tracción. El trabajo que realiza la armadura pretesa puede ser aprovechado íntegramente, y el empleo de los aceros de alta calidad puede resultar así más ventajoso.

Por otra parte, uno de los campos de aplicación en los que la técnica del hormigón pretensado ha dado resultados más satisfactorios, lo constituyen todas aquellas estructuras que, trabajando en tracción, exigen una perfecta impermeabilización, con ausencia total de fisuras. Tales son, por ejemplo, las estructuras que se encuentran sometidas a las tracciones originadas por los esfuerzos a que da lugar la presión del líquido contenido en su interior. Como consecuencia de todas estas circunstancias, resulta que las tuberías constituyen uno de los campos específicos, más idóneos, para la aplicación del hormigón pretensado. Con su empleo se consigue, por un lado, la deseada impermeabilidad y por otro, la máxima economía que cabe obtener por la sustitución del acero ordinario de las armaduras por otro de alta calidad. Pero aún hay más. Puede decirse que el hormigón pretensado desempeña en las tuberías, en cierto modo, el papel de válvula de escape o de seguridad. En efecto, según se ha podido comprobar experimentalmente, cuando por una causa cualquiera la presión del líquido en el interior de la tubería excede de un determinado valor, el hormigón se fisura por haber alcanzado su tensión el límite de su resistencia a la tracción, produciéndose grietas, bien en sentido radial, o bien en sentido longitudinal. Esta solución de continuidad deja escapar el líquido con lo que, automáticamente, se estabiliza la presión. En el momento en que la sobre-presión desaparece, las fisuras del hormigón se cierran herméticamente sin dejar vestigio alguno de su efímera existencia y la pieza vuelve a recobrar la impermeabilidad transitoriamente perdida.

Documento descargado de www.e-ache.com el 04/12/2025

Para estudiar el cálculo de piezas de hormigón pretensado sometidas a tracción simple, conviene hacer una distinción entre elementos con armaduras pretesas y elementos con armaduras postesas. Aunque en ambos casos los cálculos son muy semejantes, existe al final una pequeña diferencia que justifica esta separación y como quiera que resulta más sencillo el problema en las piezas con armaduras postesas, parece lógico empezar por ellas el estudio.

Cálculo de piezas de hormigón pretensado, con armaduras postesas, sometidas a tracción simple

Es preciso considerar tres coeficientes de seguridad distintos. Estos coeficientes son:

C = Coeficiente de seguridad total, a rotura, de la pieza.

C_f = Coeficiente de seguridad de la pieza respecto a la fisuración.

C_r = Coeficiente de seguridad parcial que divide las resistencias.

En el estudio que a continuación se hace, se representan por:

T = Esfuerzo de tracción que actúa sobre la pieza.

R = Resistencia del hormigón en compresión, en probeta cilíndrica, a los 28 días.

σ_a = Tensión en el acero.

σ_{ao} = Tensión en el acero cuando la pieza no se encuentra aún sometida a esfuerzos exteriores.

σ_r = Tensión máxima de rotura del acero.

σ_i = Tensión inicial que debe darse a la armadura.

σ_2 = Tensión final en el acero.

Documento descargado de www.e-ache.com el 04/12/2025

σ_h = Tensión en el hormigón.

σ_{ho} = Tensión en el hormigón cuando no existen esfuerzos exteriores.

σ_p = Pérdida de tensión en el acero.

Se supone que, inicialmente, no existe esfuerzo exterior alguno sobre la pieza, es decir, que el hormigón se encuentra exclusivamente sometido al esfuerzo de compresión que sobre él ejerce la armadura. En estas condiciones, la ecuación de equilibrio será:

$$W \sigma_{ao} = A \sigma_{ho} \qquad (1)$$

siendo:

W = sección total de armaduras.

A = sección total de hormigón.

Si entonces se supone que se aplica sobre la pieza un esfuerzo de tracción T cuya magnitud va incrementándose gradualmente, resultará que la armadura experimentará unos nuevos alargamientos, que darán lugar a que su carga aumente. Al mismo tiempo, el hormigón se descomprime por razón de la deformación de la pieza, siendo en todo momento el esfuerzo de tracción de la armadura igual a la suma del esfuerzo de compresión a que está soretido el hormigón, más el esfuerzo de tracción exteriormente aplicado, o sea: $W \sigma_a = A \sigma_h + T$.

Llegará un instante en el cual la tensión en el hormigón σ_h, se hará nula. Esta descompresión total, este paso de σ_h desde un cierto valor hasta cero, irá, como es lógico acompañado de un alargamiento del hormigón cuyo valor vendrá dado por la expresión:

$$\delta = \frac{\sigma_{ho}}{E_h} \qquad (2)$$

Documento descargado de www.e-ache.com el 04/12/2025

en la cual:

δ = alargamiento del hormigón

E_h = módulo de elasticidad lineal, inicial, del hormigón.

Se adopta el módulo de elasticidad inicial, porque este alargamiento corresponde a un proceso de descarga y según se ha podido comprobar experimentalmente, en los diagramas reiterativos de vuelta (ver figura 5) la cuerda que subtiende al arco descrito por la descarga, es sensiblemente paralela a la tangente en el punto inicial del diagrama, lo cual quiere decir que el módulo de elasticidad correspondiente a la descarga resulta, con gran aproximación, igual al módulo de elasticidad inicial del hormigón.

Por consiguiente, para poder determinar el alargamiento δ, lo primero que hace falta es conocer cual es el módulo de elasticidad correspondiente a un hormigón genérico de resistencia R. Existen diversas fórmulas que ligan una y otra característica. Entre ellas pueden citarse, la que figura en la Instrucción española vigente para obras de hormigón armado, la del Sr. Peña, la más moderna de Ros, etc. En la fig. 6 se reproduce un sistema de ejes coordenados en el cual las abscisas representan valores de E_h y las ordenadas, valores de R. Si sobre dichos ejes se llevan los valores obtenidos experimentalmente para E_h en función de las distintas R, se obtiene la nube de puntos que puede apreciarse en la figura. Si esta nube de puntos se sustituye por una recta, se tiene la fórmula de Peña, y si se sutituye por una curva de tipo hiperbólico se deduce la fórmula de Ros, que tiene una asíntota vertical para el valor $E_h = 550.000$ Kg/cm^2. Desde hace poco tiempo, se viene empleando los métodos ultrasónicos para determinar los módulos inicia

Documento descargado de www.e-ache.com el 04/12/2025

les de elasticidad. Estos procedimientos consisten, en esencia, en crear una vibración, sumamente rápida, mediante electro-vibradores, en un punto determinado de la masa del hormigón y medir el tiempo que las ondas así producidas tardan en alcanzar otro punto situado a una cierta distancia del primero. Como la velocidad de propagación de las ondas es función del módulo de elásticidad del material, el tiempo invertido en la propagación permite deducir el valor de dicho módulo con suficiente aproximación.

Conviene destacar, aunque ello suponga desviarse un poco del tema que se estudia, que si se conociese la ley que liga el módulo de elasticidad del hormigón a su resistencia, los métodos ultrasónicos indicados permitirían realizar, con gran facilidad, ensayos no destructivos de los hormigones, es decir, - que podría medirse la resistencia de las mezclas, sobre la propia obra y sin tener que destruir la pieza o elemento para sacar probetas. Gracias a estos modernos procedimientos, ha sido posible encontrar nuevos valores para los puntos del diagrama de la figura 6. Por otra parte, el profesor belga Campus, ensayando unos hormigones especiales fabricados con destino a la construcción de autopistas, obtuvo una resistencia de 1060 Kg/cm^2 y, lo que es más interesante, un módulo de elasticidad del orden de los 600.000 Kg/cm^2, es decir, superior al valor de la asíntota de la curva dibujada por Ros. Por todo ello, se ha hecho preciso revisar las expresiones que se venían utilizando para representar la relación existente entre módulos de elasticidad y resistencias. De los datos actualmente disponibles parece deducirse que la expresión que más se ajusta a la realidad es:

$$E_h = 21000 \sqrt{R} \qquad (3)$$

Documento descargado de www.e-ache.com el 04/12/2025

muy semejante a la que aparece en la Instrucción francesa para obras de hormigón armado:

$$E_h = 19000 \sqrt{R_{cub}} \qquad (4)$$

La pequeña diferencia existente entre una y otra se debe, sin duda, a que en la ecuación (3) R se refiere a la probeta cilíndrica a los 28 días, en tanto que la expresión (4) R_{cub} es la resistencia en probeta cúbica. Tanto en una como en otra fórmula E_h y R deben expresarse en Kg/cm^2.

Admitiendo como suficientemente aproximada para expresar la relación existente entre módulos de elasticidad y resistencias, la ecuación (3) y sustituyendo en (2) E_h por este valor, se obtiene que el alargamiento experimentado por el hormigón cuando su tensión disminuye desde σ_{ho} hasta cero, es:

$$\delta = \frac{\sigma_{ho}}{21000 \sqrt{R}} \qquad (5)$$

Por su parte, el acero, que inicialmente se encontraba sometido a la tensión σ_{ao}, estará ahora trabajando a una tensión σ_1, mayor que σ_{ao}, a causa del alargamiento δ que experimenta la armadura al aplicar a la pieza el esfuerzo exterior de tracción T. El valor de σ_1 vendrá dado por la suma de la tensión σ_{ao} más la tensión originada por dicho alargamiento, es decir que:

$$\sigma_1 = \sigma_{ao} + E_a \delta \qquad (6)$$

Como, generalmente, las tensiones a que trabaja la armadura de pretensado, corresponden a la primera zona del diagrama, el módulo de elasticidad E_a que debe tomarse, es el se-

Documento descargado de www.e-ache.com el 04/12/2025

cante, cuyo valor, para los aceros normalmente empleados en el pretensado, es de 2.100.000 Kg/cm^2. Por lo tanto, se puede poner:

$$\sigma_1 = \sigma_{ao} + 2.100.000\ \delta$$

y sustituyendo δ por su valor (5), resulta:

$$\sigma_1 = \sigma_{ao} + \frac{2.100.000}{21.000}\ \frac{\sigma_{ho}}{\sqrt{R}} = \sigma_{ao} + \frac{100\ \sigma_{ho}}{\sqrt{R}} \qquad (7)$$

expresión que permite calcular el valor de la tensión del acero σ_1.

La tensión σ_{ho} puede ser muy elevada, toda vez que no es necesario mantener el coeficiente de seguridad 3 que normalmente se aplica a las obras de hormigón armado. La causa es evidente. Basta con recordar el proceso constructivo. Al principio, cuando los esfuerzos de pretensado acaban de ser introducidos, el acero no ha perdido todavía nada de su tensión. Todo el esfuerzo de pretensado se transmite íntegramente al hormigón el cual, por consiguiente, se encuentra sometido a unas cargas que en ningún momento posterior volverán a ser alcanzadas. A partir de este instante, las deformaciones lentas del hormigón, su retracción, el alargamiento, por fluencia, del acero y otros fenómenos, dan lugar a pérdidas de tensión en la armadura, cada vez mayores, por lo que el valor de σ_{ho} se reduce. Es decir que la carga unitaria máxima del hormigón se alcanza en el instante inicial. Como, por otra parte, en este momento inicial, la rotura de la pieza no puede ocasionar ninguna desgracia de tipo personal sino únicamente el quebranto económico que suponga el tener que reconstruirla, se comprende que el coeficiente de seguridad debe, en estos casos, ser inferior al normalmente empleado para las solicitaciones de servicio.

Documento descargado de www.e-ache.com el 04/12/2025

Si, con arreglo a los métodos matemático-estadísticos existentes, (*), se calcula de un modo objetivo el coeficiente de seguridad que debe introducirse en estos casos, se deduce $C_r = 1,5$ como valor correspondiente a la hipótesis, bastante desfavorable, de que el fallo del hormigón durante la operación del tesado de las armaduras, dé lugar a la rotura, no sólo de la pieza que se construye, sino también de otra análoga, por causas diversas.

En consecuencia, si $C_r = 1,5$ es el valor del coeficiente de seguridad del hormigón en el caso de un pretensado sin más riesgos que el de la rotura de la pieza, se deduce que:

$$W \sigma_i = \frac{R}{1,5} A$$

siendo σ_i la tensión dada al acero y R la resistencia característica del hormigón (media aritmética de los n/2 resistencias más bajas obtenidas en el ensayo de n probetas rotas por compresión a los 28 días).

Las pérdidas por retracción y fluencia del hormigón bajo carga, así como la distensión del acero por cansancio, hacen que, con el tiempo, la tensión inicial σ_i, introducida mediante la maniobra del pretensado, descienda a un valor:

$$\sigma_{ao} = \sigma_i - \Sigma \sigma_p \qquad (8)$$

en donde $\Sigma \sigma_p$ representa dichas pérdidas. De un modo aproximado puede decirse que:

$$\sigma_{ao} \simeq \frac{\sigma_i}{1,15}$$

(*) Véase "La determinación del coeficiente de seguridad en las distintas obras" A. Páez.- Publicación del Instituto Técnico de la Construcción y del Cemento.- Madrid.- 1951

Documento descargado de www.e-ache.com el 04/12/2025

y, por consiguiente:

$$W\,\sigma_{ao} \simeq \frac{R \cdot A}{1,5 \times 1,15} = \frac{R}{1,7}\,A$$

Identificando esta expresión con la (1), se deduce que:

$$\sigma_{ho} = \frac{R}{1,7} \qquad (9)$$

e introduciendo la expresión (9) en (7), resulta:

$$\sigma_1 = \sigma_{ao} + \frac{100\,R}{1,7\,\sqrt{R}} \simeq \sigma_{ao} + 60\,\sqrt{R} \qquad (10)$$

Según se ha indicado, cuando el acero haya alcanzado esta tensión σ_1, la tensión en el hormigón, después de haber experimentado la pieza un alargamiento δ, será nula. El elemento, se encontrará al borde de la fisuración. Ante un nuevo incremento del esfuerzo de tracción exteriormente aplicado, el hormigón empezará a trabajar a tracción. Todavía podrá resistir algo sin agrietarse, pero una vez alcanzada su resistencia a tracción, cesará su escasa colaboración con la armadura y todo el esfuerzo exterior deberá ser absorbido por el acero. Admitiendo un coeficiente de seguridad a la fisuración igual a C_f, se podrá, por lo tanto, escribir que:

$$W\,\sigma_1 = C_f\,T \qquad (11)$$

expresión en la cual el producto $C_f\,T$, del coeficiente de seguridad a la fisuración C_f por el esfuerzo de tracción previsto T, representa la solicitación o esfuerzo capaz de producir la fisuración del hormigón.

Documento descargado de www.e-ache.com el 04/12/2025

Del mismo modo, siendo σ_r la tensión máxima de rotura del acero, y C el coeficiente de seguridad total a la rotura, adoptado para la pieza:

$$W \cdot \sigma_r = C \cdot T \qquad (12)$$

de donde:

$$W = \frac{C \cdot T}{\sigma_r} \qquad (13)$$

Despejando W en las ecuaciones (11) y (12) e igualando, se deduce que:

$$\frac{C_f\, T}{\sigma_1} = \frac{C \cdot T}{\sigma_r} \qquad (14)$$

de donde:

$$\sigma_1 = \frac{C_f}{C}\, \sigma_r \qquad (15)$$

La expresión (13) permite hallar, directamente, la sección de armadura necesaria para que la pieza pueda resistir el esfuerzo exterior T de tracción.

La tensión σ_{ao} que debe darse al acero cuando el elemento se encuentra aún descargado, puede obtenerse despejando σ_{ao} de la ecuación (10):

$$\sigma_{ao} = \sigma_1 - 60\sqrt{R} \qquad (16)$$

y sustituyendo σ_1 por su valor (15). Se obtiene así:

$$\sigma_{ao} = \frac{C_f}{C}\, \sigma_r - 60\sqrt{R} \qquad (17)$$

Documento descargado de www.e-ache.com el 04/12/2025

Sin embargo, para dimensionar la pieza, lo que interesa conocer es, no esta tensión σ_{ao}, sino la inicial σ_i que debe darse a la armadura para que, después de experimentar todas las pérdidas ocasionadas por retracción, deformaciones lentas, etc, el acero conserve todavía la tensión σ_{ao}. Es decir - que, representando por $\Sigma\sigma_p$ la suma total de las pérdidas de tensión en los alambres por las distintas causas, se tendrá:

$$\sigma_i = \sigma_{ao} + \Sigma\sigma_p \qquad (18)$$

de donde, teniendo en cuenta (17),

$$\sigma_i = \frac{C_f}{C}\sigma_r - 60\sqrt{R} + \Sigma\sigma_p \qquad (19)$$

En cuanto al valor de la sección necesaria de hormigón, puede calcularse ya fácilmente a partir de la expresión (1) de la cual se deduce:

$$A = \frac{W\,\sigma_{ao}}{\sigma_{ho}} \qquad (20)$$

y como, según (9):

$$\sigma_{ho} = \frac{R}{1,7}$$

resulta:

$$A = \frac{1,7\,\sigma_{ao}\,W}{R} \qquad (21)$$

mediante la cual se puede calcular A, una vez conocidos σ_{ao}, W, y R.

Con esto se tienen ya deducidas todas las ecuaciones necesarias para dimensionar una pieza de hormigón pretensado, con armadura postesa, y sometida a tracción simple, ecuacio

Documento descargado de www.e-ache.com el 04/12/2025

nes que, en resumen, son:

Sección de armadura:

$$W = \frac{C \cdot T}{\sigma_r} \qquad (13)$$

Tensión inicial que debe darse a la armadura:

$$\sigma_i = \frac{C_f}{C} \sigma_r - 60 \sqrt{R} + \Sigma \sigma_p \simeq 1{,}15 \frac{C_f}{C} \sigma_r - 70 \sqrt{R}$$

Sección mínima de hormigón:

$$A = \frac{1{,}7\ W}{R} \sigma_{ao} = \frac{1{,}7\ W}{R} \left(\frac{C_f}{C} \sigma_r - 60 \sqrt{R} \right) \simeq \frac{1{,}5\ W\ \sigma_i}{R}$$

debiendo expresarse todas las tensiones en Kg/cm^2.

Cálculo de piezas de hormigón pretensado, con armaduras pretesas, sometidas a tracción simple

Como ya se ha indicado anteriormente, las expresiones que sirven para calcular las dimensiones de una pieza, con armaduras pretesas, sometida a tracción simple, son algo distintas de las que se acaban de deducir para el caso de armaduras postesas, a causa de la diferencia existente entre el proceso constructivo seguido en uno y otro caso. Como es sabido, para fabricar una pieza con armaduras pretesas, se empieza por tesar los alambres, antes de verter el hormigón, anclándolos contra las propias paredes del molde o contra estribos especialmente dispuestos. Luego se procede al hormigonado y, una vez fraguada y endurecida la mezcla, se sueltan los cables de sus anclajes provisionales transmitiéndose la tensión al hormigón en virtud de la adherencia, y comprimiéndose la pieza. Pero ocurre que, como consecuencia de esta compresión, el elemento sufre un

Documento descargado de www.e-ache.com el 04/12/2025

acortamiento elástico que dá lugar a una caida de tensión en la armadura. Por consiguiente, si σ_{ao} es la tensión de los alambres antes de aplicar el esfuerzo de tracción T, $\Sigma\sigma_p$ las pérdidas por retracción y deformaciones lentas y σ_{pa} las pérdidas ocasionadas por el acortamiento elástico, los alambres deberán tener una tensión inicial σ_i tal que:

$$\sigma_i = \sigma_{ao} + \sigma_{pa} + \Sigma\sigma_p \qquad (22)$$

En cuanto al hormigón debe observarse que, contrariamente a lo que antes ocurria, parte de una tensión nula (cuando aún no se han soltado los anclajes provisionales) para alcanzar la tensión de trabajo σ_{ho}, una vez que, por adherencia, le ha sido transferida la de la armadura. Es decir que, en este caso, el proceso de carga es noval y no reiterativo como ocurría antes. Como consecuencia, la relación entre tensiones y deformaciones del hormigón, deja de ser lineal para pasar a estar representada por la parte curva del diagrama de la figura 7 curva que, para cargas instantáneas seria una parábola de 2º grado pero que, si como siempre ocurre, la carga no es instantánea, se transforma en una parábola de grado 2,33 = $\frac{7}{3}$ valor que, deducido mediante consideraciones reológicas, se ha visto, posteriormente, confirmado por la experimentación. En estas condiciones, la ley que rige la relación existente entre tensiones σ_h y deformaciones δ, es: (*)

$$\sigma_h = R\left[1 - \left(1 - \frac{\delta}{\Delta}\right)^{7/3}\right] \qquad (23)$$

siendo Δ la deformación correspondiente a la tensión de rotura R.

(*) Ver: "Sobre el comportamiento anelástico del hormigón armado en piezas prismáticas".- E. Torroja.- Monografía núm. 54 del Instituto Técnico de la Construcción.

Documento descargado de www.e-ache.com el 04/12/2025

Partiendo de esta expresión y adoptando, como en el caso anterior, el coeficiente de seguridad 1,5 , con lo que $\sigma_h = \frac{R}{1,5}$, resulta:

$$\frac{1}{1,5} = 1 - \left(1 - \frac{\delta}{\Delta}\right)^{7/3} \qquad (24)$$

de donde se deduce:

$$\left(1 - \frac{\delta}{\Delta}\right)^{7/3} = 1 - \frac{1}{1,5} = \frac{0,5}{1,5} \qquad (25)$$

$$1 - \frac{\delta}{\Delta} = \left(\frac{0,5}{1,5}\right)^{3/7} \qquad (26)$$

$$\frac{\delta}{\Delta} = 1 - \left(\frac{0,5}{1,5}\right)^{3/7} = 0,376 \qquad (27)$$

Ahora bien, en este caso de carga noval, habrá que tomar el módulo de elasticidad inicial del hormigón. Y, según se sabe, dicho módulo viene definido por el coeficiente angular de la tangente en el origen del diagrama tensión-deformación, la-cual se dedude fácilmente partiendo de la ecuación (23). En efecto, se tendrá:

$$\frac{d\sigma}{d\delta} = R\left[-\frac{7}{3}\left(1 + \frac{\delta}{\Delta}\right)^{4/3}\left(-\frac{1}{\Delta}\right)\right] = \frac{7R}{3\Delta}\left(1 - \frac{\delta}{\Delta}\right)^{4/3} \qquad (28)$$

de donde:

$$E = \left(\frac{d\sigma}{d\delta}\right)_{\delta = o} = \frac{7R}{3\Delta} \qquad (29)$$

Despejando de aquí Δ , resulta:

$$\Delta = \frac{7}{3}\frac{R}{E} = 2,33\,\frac{R}{E} \qquad (30)$$

Documento descargado de www.e-ache.com el 04/12/2025

y sustituyendo este valor en la (27) queda:

$$\delta = 0{,}376 \times 2{,}33 \frac{R}{E} \qquad (31)$$

de donde se deduce, sustituyendo E por su valor (3)

$$\delta = 0{,}376 \times 2{,}33 \frac{R}{21.000 \sqrt{R}} = 0{,}0000\,418 \sqrt{R} \qquad (32)$$

Conocido δ puede ya calcularse el valor de la tensión que deben tener los alambres de pretensado antes del acortamiento elástico del hormigón, ya que:

$$\sigma_{pa} = E_a \delta \qquad (33)$$

en donde E_a es el módulo de elasticidad del acero, cuyo valor se sabe que es igual a 2.100.000 Kg/cm^2 y δ queda definido de acuerdo con (32). Por lo tanto, se tendrá:

$$\sigma_{pa} = 2{,}1 \times 10^6 \times 41{,}8 \times 10^{-6} \sqrt{R} = 88 \sqrt{R} \qquad (34)$$

y, por consiguiente:

$$\sigma_i = \sigma_{ao} + \Sigma\sigma_p + 88 \sqrt{R} \qquad (35)$$

Como ya se ha indicado anteriormente, σ_{ao} representa la tensión efectiva de los hilos, es decir, lo que resta de la tensión inicial σ_i una vez descontadas tanto las pérdidas - σ_{pa} por acortamiento instantáneo del hormigón bajo carga, como las $\Sigma\sigma_p$ producidas por las deformaciones lentas y retracción. Esta tensión σ_{ao} equivale a la que, en el caso precedente, se designaba también por σ_{ao}.

Si, de un modo análogo a lo efectuado anteriormente, se designa por σ_1 la tensión de los alambres bajo la solicitación límite de fisuración, se deberá cumplir la igualdad:

$$W \sigma_1 = C_f \cdot T \qquad (36) \qquad \text{(ver ecuación 11)}$$

Documento descargado de www.e-ache.com el 04/12/2025

siendo σ_1 , como ya se ha visto (ecuación 6)

$$\sigma_1 = \sigma_{ao} + E_a \delta = \sigma_{ao} + 60 \sqrt{R} \quad (37) \quad \text{(ver ecuación 10)}$$

Sustituyendo en (37) el valor de σ_1 deducido de (36), resulta:

$$\sigma_{ao} = \frac{C_f \, T}{W} - 60 \sqrt{R}$$

y como:

$$\frac{T}{W} = \frac{\sigma_r}{C} \qquad \text{(ver ecuación 12)}$$

se obtiene:

$$\sigma_{ao} = \frac{C_f}{C} \sigma_r - 60 \sqrt{R} \qquad (38)$$

valor que, introducido en la (35) da:

$$\sigma_i = \frac{C_f}{C} \sigma_r + 28 \sqrt{R} + \Sigma \sigma_p \qquad (39)$$

expresión que permite deducir la tensión inicial σ_i de las armaduras pretesas. Admitiendo que, el conjunto de pérdidas $\Sigma \sigma_p$, es del orden del 13% de la tensión σ_i , se deduce:

$$\sigma_i = 1{,}15 \frac{C_f}{C} \sigma_r + 32 \sqrt{R} \qquad (40)$$

Antes de aparecer las pérdidas $\Sigma \sigma_p$, cuando se sueltan de los anclajes los cables y todo el esfuerzo σ_i de pretensado actua sobre el hormigón, la pieza se acorta, en virtud de este esfuerzo, según ya se ha indicado y calculado. Debido a este acortamiento los alambres pasan de una tensión σ_i a la carga unitaria:

$$\sigma_i - \sigma_{pa} = \sigma_i - 88 \sqrt{R} \qquad (41)$$

Documento descargado de www.e-ache.com el 04/12/2025

con lo cual, el esfuerzo de compresión que se ejerce sobre el hormigón, es:

$$(\sigma_i - 88\sqrt{R})\quad W \qquad (42)$$

Admitiendo, para estas condiciones, un coeficiente de seguridad en el hormigón de 1,5 , se deduce que:

$$A = \frac{W\,(\sigma_i - 88\sqrt{R})}{\frac{R}{1,5}} = \frac{1,5\,\sigma_i - 132\sqrt{R}}{R}\,W \qquad (43)$$

expresión que permite calcular la sección mínima que debe tener el hormigón de la pieza.

La sección de armadura, como en el caso anterior, viene dada por:

$$W = \frac{C \cdot T}{\sigma_r} \qquad (44) \qquad \text{(ver ecuación 13)}$$

Resumen

Las piezas de hormigón pretensado que deban resistir un esfuerzo axil de tracción T y en las cuales la armadura se tese una vez endurecido el hormigón, deberán poseer una sección de acero:

$$W = \frac{C\ T}{\sigma_r} \qquad (45)$$

fórmula en la cual C es el coeficiente de seguridad a la rotura, T el esfuerzo axil de tracción previsto y σ_r la tensión máxima de rotura del acero. Esta armadura W , deberá tener una tensión previa:

$$\sigma_i = 1,15\,\frac{C_f}{C}\,\sigma_r - 70\sqrt{R} \qquad (46)$$

Documento descargado de www.e-ache.com el 04/12/2025

en cuya expresión C_f es el coeficiente de seguridad a la fisuración de la pieza y R la resistencia del hormigón, en compresión, expresada, al igual de σ_i y σ_r en Kg/cm^2. Finalmente, la sección mínima de hormigón deberá ser:

$$A = \frac{1,5\ \sigma_i\ W}{R} \qquad (47)$$

Si las armaduras se tesan antes de colocar el hormigón, soltándolas de sus amarres una vez éste ha endurecido, la sección de armaduras sigue siendo, evidentmente, la misma

$$W = \frac{C\ T}{\sigma_r} \qquad (48)$$

pero, a diferencia con el caso anterior, la tensión inicial de las armaduras es ahora:

$$\sigma_i = 1,15\ \frac{C_f}{C}\ \sigma_r + 32\ \sqrt{R} \qquad (49)$$

y la sección mínima de hormigón es:

$$A = \frac{1,5\ \sigma_i - 132\ \sqrt{R}}{R}\ W \qquad (50)$$

Salvo en casos especiales, el valor del coeficiente de seguridad a la fisuración C_f puede suponerse:

$$C_f = 0,6\ C \qquad (51)$$

valor medio de las relaciones $C_f : C$ encontradas en el estudio de diferentes casos particulares.

Ejemplo:

Sea, a título de ejemplo, el caso particular de una tubería de hormigón pretensado con armadura postesa de 1 m. de diámetro. La presión interior máxima prevista es de 5 Kg/cm^2. -

Documento descargado de www.e-ache.com el 04/12/2025

La resistencia del hormigón se supone igual a 225 Kg/cm^2. La armadura, constituída por aceros de alta resistencia ϕ 5 posee una tensión máxima de rotura de 15.000 Kg/cm^2. El coeficiente de seguridad a la rotura es de 2,1 , valor deducido mediante el cálculo apropiado. El hecho de que la improbable rotura de la conducción no ocasione la pérdida de vidas humanas y sólo los daños materiales que se derivan de una interrupción del servicio, hace que este coeficiente de seguridad sea bastante más pequeño que los que usualmente se introducen en estructuras normales. El coeficiente de seguridad a la fisuración es $2,1 \times 0,6 = 1,3$.

El esfuerzo transversal de tracción creado por la presión interior es, por metro lineal de pared:

$$T = 5 \times 50 \times 100 = 25000 \text{ Kg/m.l.}$$

Aplicando la fórmula (45) se deduce que la armadura necesaria es:

$$W = \frac{2,1 \times 25000}{15000} = 3,5 \text{ cm}^2/\text{m.l.}$$

o sea 18ϕ5 por metro lineal o un zuncho helicoidal de 100:18 = = 5,6 cm. de paso.

La tensión inicial de esta armadura es, según (46).

$$\sigma_1 = 1,15 \frac{1,3}{2,1} 15000 - 70 \sqrt{R} = 10680 - 1050 = 9650 \text{ Kg/cm}^2$$

y la sección de hormigón necesaria:

$$A = \frac{1,5 \times 9650 \times 3,5}{225} = 225 \text{ cm}^2/\text{m.l.}$$

Documento descargado de www.e-ache.com el 04/12/2025

o sea que el espesor mínimo de la pared debe ser de 2,3 cm. Este espesor podrá ser aumentado por condiciones de flexión longitudinal, inestabilidad, o ejecución, ajenas al problema que, de un modo esquemático se desarrolla.

Además de la armadura perimetral ya calculada, y con el fin de evitar la aparición de grietas transversales originadas por la retracción impedida del hormigón así como por cambios de temperatura y humedad, debe de colocarse otra armadura longitudinal, paralela al eje de la tuberia. Teniendo en cuenta que el esfuerzo máximo de tracción a que pueden dar lugar los referidos fenómenos es del orden de los 27 Kg/cm^2 y adoptando un margen de 3 Kg/cm^2 para compensar las pérdidas por deformaciones lentas, resulta que, si se supone la tubería apoyada en un lecho continuo, la magnitud del esfuerzo de tracción longitudinal que es necesario absorber para eliminar el peligro de aparición de fisuras transversales al eje, es del orden de los 30 Kg/cm^2, lo que supone una tracción total de $30 \times S$, siendo S la sección transversal de la pieza, en cm^2.

Recordando las dimensiones de la tubería, se tendrá:

$$S = \pi (R^2 - r^2) = \pi (\overline{53}^2 - \overline{50}^2) = \pi (103 \times 3) = 309\,\pi = 970 \text{ cm}^2$$

luego

$$T = 30 \times 970 = 29.100 \text{ Kgs.}$$

La sección de armadura necesaria para absorber este esfuerzo, será:

$$W_1 = \frac{C \cdot T}{\sigma_r} = \frac{2{,}1 \times 29100}{15000} = 4{,}06 \text{ cm}^2$$

que, en alambres de ϕ 5, suponen 21 alambres que se colocarán uniformemente repartidos en el perímetro de la tubería, paralelos a su eje, y tesos a la carga unitaria ya calculada para la armadura principal (9.650 Kg/cm^2).

Documento descargado de www.e-ache.com el 04/12/2025

837-4-6 UN NUEVO TIPO DE TRAVIESA DE HORMIGON PRETENSADO

(A new prestressed concrete sleeper)

Autor: Editorial

"CONCRETE AND CONSTRUCTIONAL ENGINEERING", Febrero 1950

S i n o p s i s

Se describe un nuevo modelo de traviesa de hormigón pretensado, ideado por Mr. Freyssinet, para los ferrocarriles franceses. Se indican las principales características de esta traviesa que ha dado, en la práctica, excelentes resultados, y se exponen algunos detalles de su procedimiento de fabricación y del dispositivo empleado para sujetar los carriles. Finalmente, se resumen los datos correspondientes a los ensayos realizados con este tipo de piezas.

Con el fin de reducir el peso de las traviesas de hormigón pretensado, Mr. Freyssinet, ideó hace algunos años, un nuevo tipo, en el que la parte central de la pieza era de menor sección que las cabezas extremas. Su peso era de unos 131,5 Kg. e iba armada con 42 alambres de 2,5 mm. de diámetro, curvados en los extremos para aumentar la adherencia y eliminar toda posibilidad de deslizamiento bajo cualquier estado de carga. El espesor de estas piezas, bajo el carril, era de 12 cm. y su fabricación se hizo en serie, empleándose en grandes cantidades en líneas de segundo orden, pero no pudiendo ser utilizadas en las vías principales.

Documento descargado de www.e-ache.com el 04/12/2025

Las normas de recepción de materiales de los ferrocarriles franceses, exigen que las traviesas destinadas a las líneas de primer orden sean capaces de resistir un ensayo a flexión que consiste en aplicar sobre uno de los extremos de la pieza y coincidiendo con el eje del carril, una carga de 30 T. distribuida sobre 13,5 cm. de longitud. La traviesa, se coloca encima de dos soportes situados uno a cada lado de la línea de acción de la carga y a la distancia de 20 cm. de dicho eje. En estas condiciones, se origina un momento flector de 1840 m. Kg, que debe ser resistido por la pieza sin que se forme la menor grieta.

Recientemente, Mr. Freyssinet, ha proyectado un nuevo modelo de traviesa de hormigón pretensado (Fig. 8) que satisface plenamente los requisitos indicados. El espesor bajo carril es de 14 cm. y la armadura está constituida por 56 alambres de acero de 2,5 milímetros de diámetro, enroscados en los extremos en forma de bucle. La carga inicial de tesado es de - 44 T. Este esfuerzo actua centrado sobre la parte media de la pieza, y excéntricamente en las zonas situadas por debajo de - los carriles. En su construcción se utiliza hormigón con una resistencia a compresión de 492 Kg/cm^2, a los 28 días.

Las principales características de estas piezas son:

Longitud: 2,36 m.

Ancho: 24,5 cm.

Volumen de hormigón: 0,06 m^3

Espesor de la parte media: 8,25 cm.

Peso de los alambres de la armadura principal de - pretensado: 5,2 Kg.

Peso de la armadura secundaria de acero dulce: - 0,68 Kg.

Documento descargado de www.e-ache.com el 04/12/2025

La disminución de sección en la parte central, constituye una de las principales características de este modelo. - En los tipos corrientes, esta zona central, suele tener bastante canto, pues queda sometida a los momentos flectores producidos por las cargas exteriores, incrementados, en ocasiones, por reacciones anormales del balasto mal colocado, o por la desnivelación de los carriles.

El nuevo modelo de traviesa, en cambio, actua casi como dos bloques independientes, unidos por un tirante. La parte central puede, sin fisurarse, adquirir una flecha de hasta 1 cm. Debido al reducido espesor de esta zona y a la disminución de tamaño de la pieza en general, este prototipo pesa sólo 154 Kg. por lo que, aun siendo más pesada que la traviesa de madera corriente, puede, con facilidad, ser levantada y colocada en - obra, a mano.

Para evitar el contacto entre el balasto y la parte central de la traviesa, generalmente, en las líneas francesas de ferrocarriles, se deja, en el centro de la vía, una especie de canal longitudinal, con lo que, además, se ahorra balasto.

Uno de los detalles característicos del nuevo tipo, es la manera de conseguir el anclaje efectivo de la armadura, - sin necesidad de recurrir al empleo de dispositivos especiales.

Primeramente, se obtienen en los moldes unas piezas que son diez cm. más cortos, por cada lado, que la traviesa terminada, por lo cual, los extremos de los alambres de la armadura, que se colocan en dos haces, sobresalen del cuerpo de hormigón, formando bucles. Después de tesa la armadura, se moldean - las dos cabezas laterales, de 10 cm., que protegen a los cables

Documento descargado de www.e-ache.com el 04/12/2025

de la corrosión. De este modo, la tensión del hormigón situado, tanto en el interior, como en el exterior, de los bucles de los alambres, es la misma. Por otra parte, en el transcurso del tiempo, el hormigón se deforma plásticamente, arrastrando en su deformación a la armadura, con lo cual ésta produce, en las cabezas de hormigón últimamente moldeadas, la precompresión suficiente para que alcancen la resistencia necesaria para soportar las ligeras cargas que sobre ellas han de actuar.

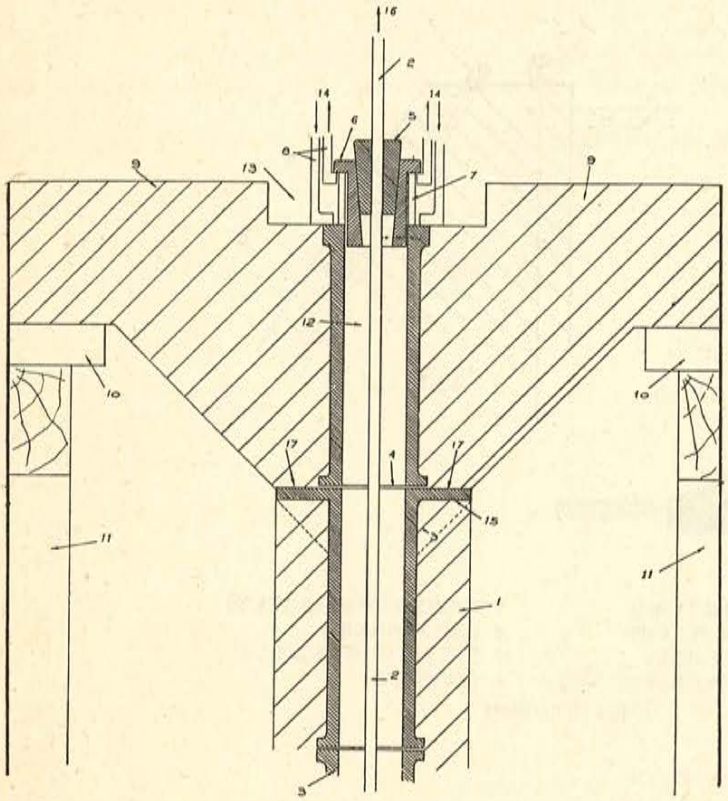
En la unión entre carril y traviesa, se interpone una plancha de goma estriada que sirve de amortiguador, y la sujeción se realiza por medio de dos grapas de muelle de acero que se fijan mediante pernos, ajustados a unas espirales de alambre recubiertas de pasta bituminosa, y provistos de su correspondiente tuerca con arandela (ver fig. 8).

Tanto las traviesas, como el dispositivo de sujeción de los carriles, han sido sometidos a los más rigurosos ensayos, con resultados plenamente satisfactorios. Después de cien horas bajo la acción de un máquina vibradora, las traviesas no presentaron señal alguna de fatiga, y su unión con el carril se mantuvo inalterada sin que se produjese la menor holgura en los pernos.

En un ensayo análogo efectuado con traviesas de roble nuevas y carriles sujetos mediante los dispositivos corrientes, pudo apreciarse un asiento del carril sobre la traviesa, de 9,5 mm.

En la actualidad, este nuevo modelo de traviesa de hormigón pretensado, se fabrica en serie por la "Societé Technique pour l'utilisation de la Précontrainte", empleándose en grandes cantidades en los ferrocarriles franceses. R.P.A.

Documento descargado de www.e-ache.com el 04/12/2025



COLUMNAS DE HORMIGON CON SOLICITACION PREVIA DE TRACCION

Fig. 1.—1, columna de hormigón; 2, cable preco presor provisional; 3, puntal de acero precompri do; 4, espesores; 5, piezas de sujeción; 6, mangu desplazable; 7, espaciadores; 8, dispositivo de esti do; 9, piso de hormigón; 10, encofrado; 11, an mios; 12, espacio hueco; 13, cavidad; 14, fuerza relajamiento; 15, anillo de acero; 16, esfuerzo pretensado; 17, peso propio de la estructura.

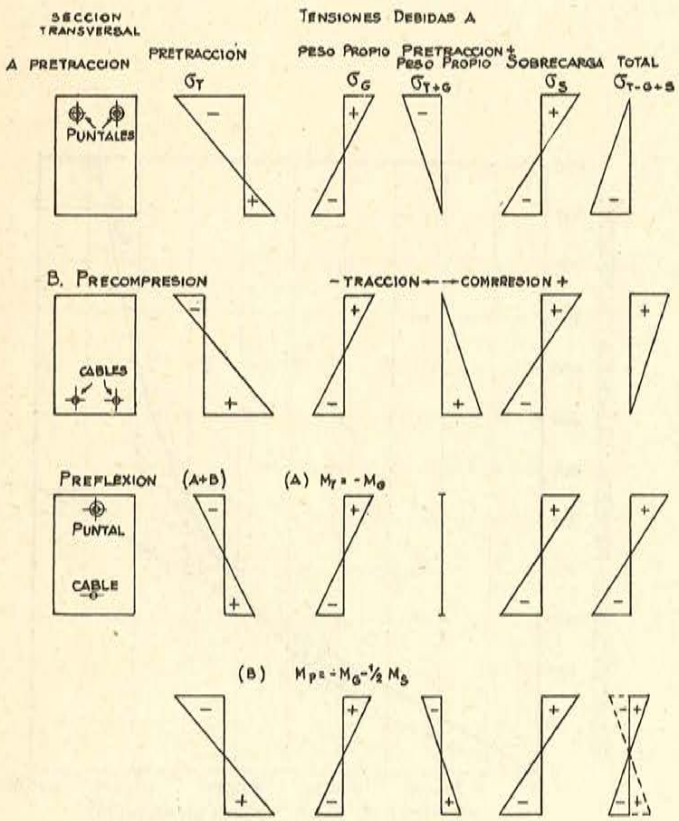


Fig. 2.

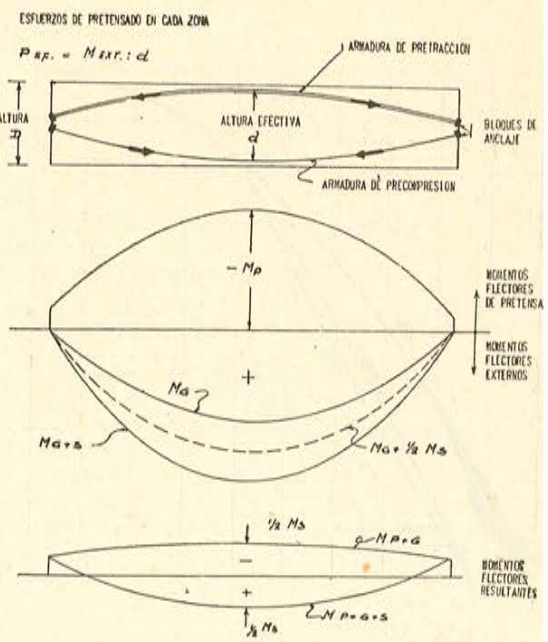


Fig. 3.

Documento descargado de www.e-ache.com el 04/12/2025

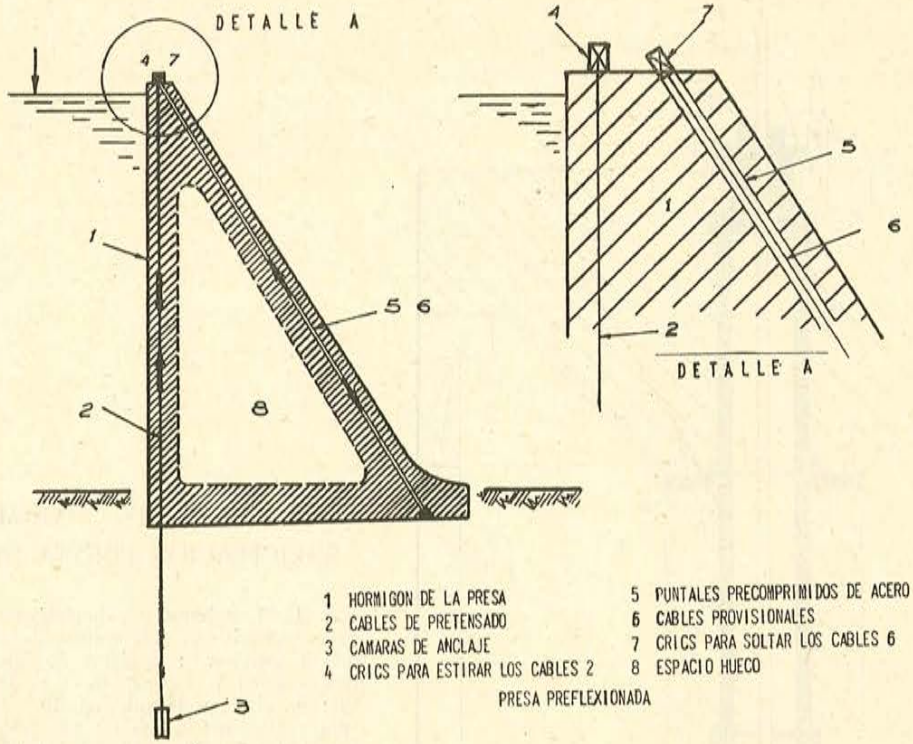


Fig. 4.

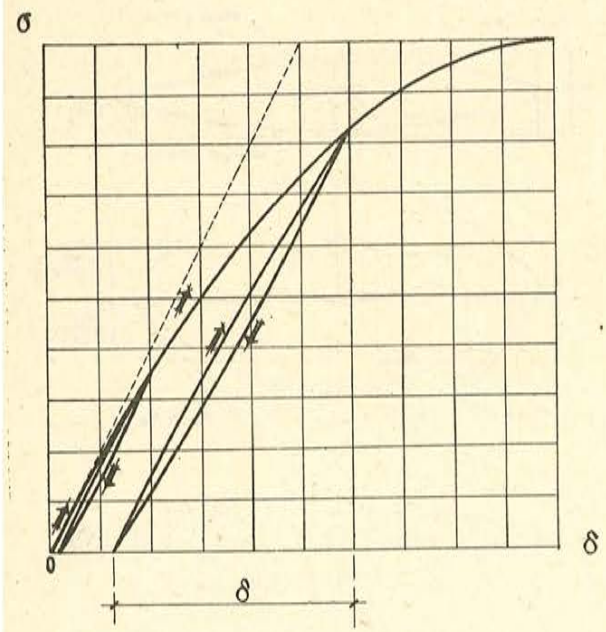


Fig. 5.

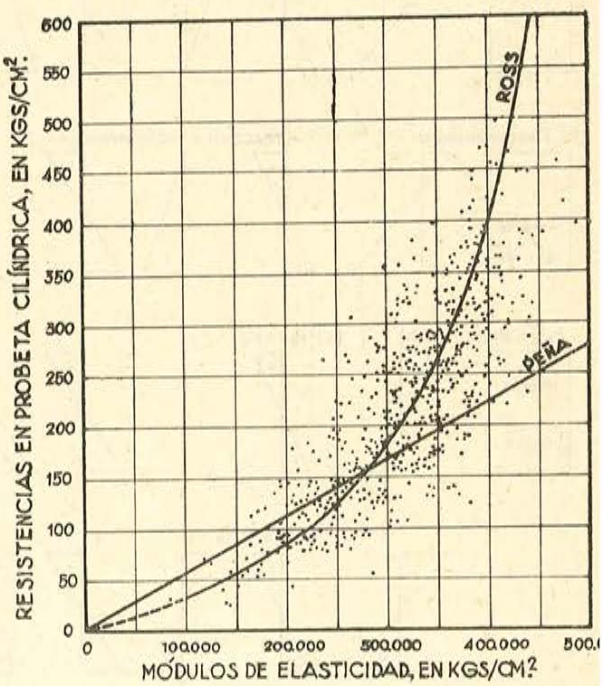


Fig. 6.

Documento descargado de www.e-ache.com el 04/12/2025

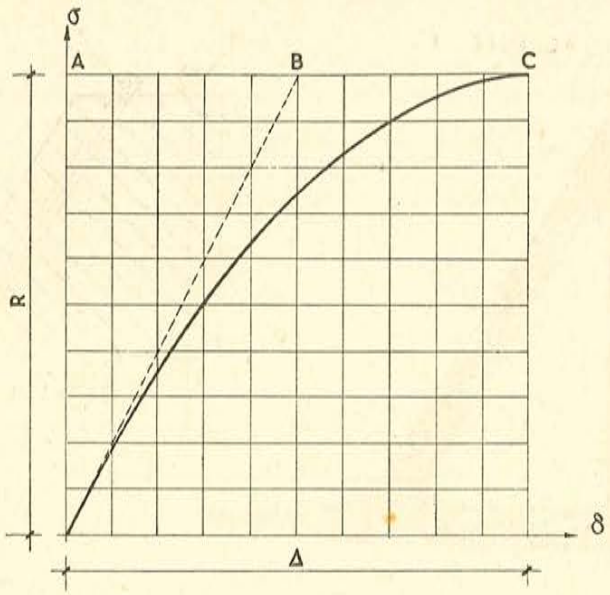


Fig. 7.

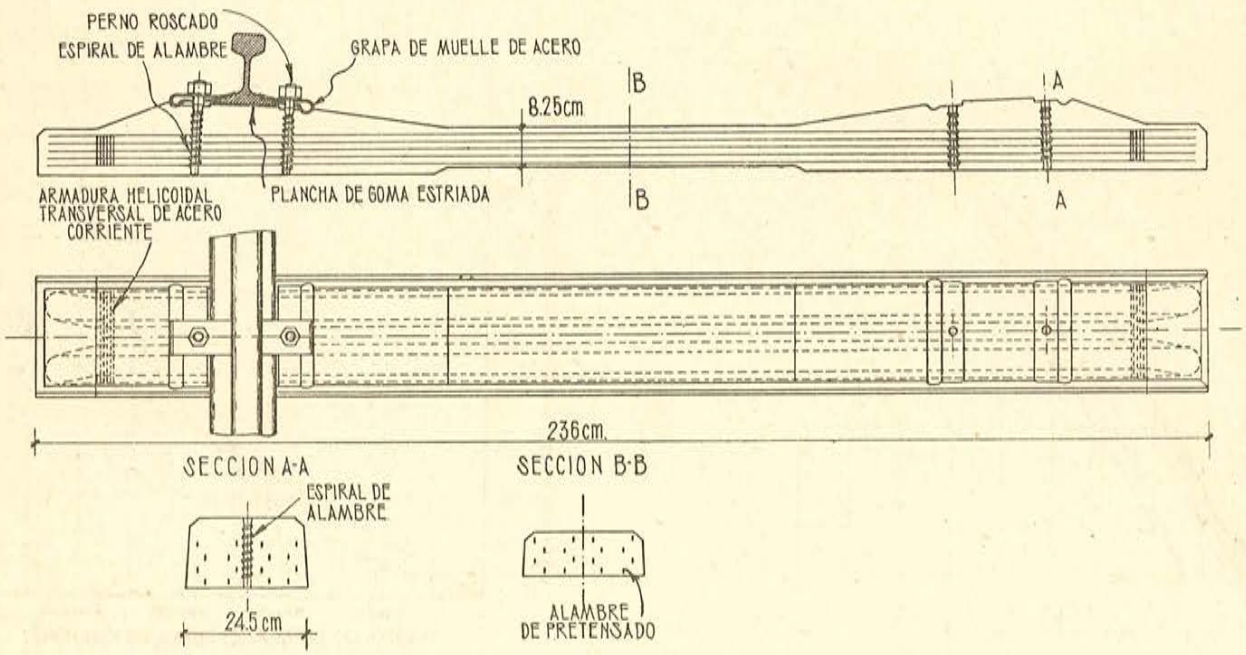


Fig. 8.

Documento descargado de www.e-ache.com el 04/12/2025

Documento descargado de www.e-ache.com el 04/12/2025