

LA PRACTICA DEL CONCRETO PRE-ESFORZADO

Tesis de Grado
Franz Sauter Fabian

1957

Escuela de Ingeniería
Universidad de Costa Rica

A mis Padres

A María de los Angeles

Prefacio.

El presente trabajo no es una investigación propia y en ninguna forma trata de ser original. Representa el esfuerzo de varios años de estudio y trabajo, acuerpado en esta labor por los personeros de la Pretensora de Concreto S. A. y estimulado por el interés que para ello han demostrado los ingenieros costarricenses, para llevar a cabo la difícil tarea de introducir al país un nuevo sistema constructivo. -

El propósito principal de esta tesis es presentar, por falta de literatura apropiada, un resumen y una descripción de la práctica alemana para la ejecución de obras de concreto pre-esforzado, dando al mismo tiempo una explicación de los conceptos básicos que rigen este material y una recopilación de las experiencias prácticas, que se obtuvieron en las primeras aplicaciones de este tipo en Costa Rica. El objetivo principal de la misma es familiarizar a un mayor número de técnicos nacionales con un sistema de construcción, que ofrece grandes posibilidades para nuestro medio, presentando una idea general de su alcance y de sus aplicaciones. -

Durante mi trabajo he contado constantemente con la valiosa cooperación de los socios de la Pretensora de Concreto S. A. A ellos deseo manifestar mi agradecimiento, muy en especial a los gerentes de esta empresa, los señores Carlos Manuel Escalante Durán, Narciso Esqui - vel Yglesias y Rafael Sotela Pacheco, cuya labor efectiva ha hecho posi -

ble la realización de los primeros trabajos de concreto pre-esforzado en nuestro país. -

También aprovecho esta oportunidad para hacer especial reconocimiento a los ingenieros Guillermo Arguedas, de la empresa Arguedas -Dobles -Soto, y Rodolfo Dobles, Jefe del Departamento de Construcciones del Ministerio de Obras Públicas, por el interés y el empeño que demostraron para facilitar la introducción al país de este nuevo sistema constructivo. -

Deseo dar mis más expresivas gracias a mi Profesor Guña, don Carlos Ulate Rivera, por sus valiosas sugerencias para el tema de la tesis y la revisión de la misma, a mi compañero de trabajo, Eddy Bravo por la cuidadosa corrección del original y a María de los Angeles Ortiz por el penoso trabajo de mecanografía y poligrafía. -

Por último agradezco también a todos aquellos que, directa o indirectamente, contribuyeron a desarrollar el presente trabajo y a la finalización de mis estudios para la carrera profesional.

Franz Sauter Fabian

San José, Abril de 1957

Indice.

1. - Generalidades del Concreto Pre-esforzado.

- 1.1. La resistencia a la tensión del concreto.
- 1.2. Idea fundamental del pretensado.
- 1.3. Pérdidas de tensión por flujo plástico y retracción.
- 1.4. Necesidad de usar materiales de alta calidad.
- 1.5. Diferentes tipos de concreto pre-esforzado.
- 1.6. Consideraciones sobre los esfuerzos permisibles en el concreto y acero. - Diferentes estados de carga.
- 1.7. Seguridad contra la ruptura.
- 1.8. Carga de agrietamiento.
- 1.9. La responsabilidad en la ejecución de obras de concreto pre-esforzado.
- 1.10. Ventajas especiales del concreto pre-esforzado.

2. - Sistemas Clásicos para Concreto Pre-esforzado.

- 2.1. Sistema Freyssinet.
- 2.2. Sistema Magnel.
- 2.3. Sistema Lee-McCall.
- 2.4. Sistema Roebling.
- 2.5. Pretensado. -Fabricación en lechos de tensado.

3. - Sistemas LEOBA y BAUR-LEONHARDT.

Sistema LEOBA

- 3.1. Descripción del sistema.
- 3.2. Ventajas del sistema.

Sistema BAUR-LEONHARDT.

- 3.3. Descripción del sistema.
- 3.4. Ventajas del sistema.

4. - Consideraciones y Detalles Constructivos. - Sistema Estructural del Balcón para el CINE REX.

- 4.1. Descripción general del sistema estructural.
- 4.2. La torsión. - Forma de la sección.
- 4.3. Disposición de los cables.
- 4.4. Deformaciones elásticas y plásticas. - Articulaciones.
- 4.5. Fundación de las columnas. -

5. - Consideraciones para el Diseño. -

Diseño de la Viga Postensada para el Balcón del CINE REX

- 5.1. Generalidades y asunciones.
- 5.2. Análisis y diseño de la sección.
- 5.3. Momento de ruptura.
- 5.4. Esfuerzos cortantes y diagonales.

6. - Ejecución de una obra de Concreto Pre-esforzado.

- 6.1. Armado de los cables LEOBA.
- 6.2. Transporte y colocación de los cables.
- 6.3. Inspección de la obra.
- 6.4. Vaciado del concreto.
- 6.5. Preparativos para el tensado.
- 6.6. Operación de tensado.
- 6.7. Inyección de la lechada.

7. - Materiales Empleados para Concreto Pre-esforzado.

- 7.1. Concreto.
- 7.2. Acero.

8. - Ventajas del Concreto Pre-esforzado
y su Importancia Económica.

- 8.1. Ventajas generales del sistema.
- 8.2. Economía del sistema.

9. - Aplicaciones del Concreto Postensado en Costa Rica

- 9.1. Ejemplos de obras terminadas y proyectos desarrollados.

10. - Aplicaciones Especiales del Concreto Pre-esforzado

- 10.1. Postes de alumbrado.
- 10.2. Durmientes para ferrocarril.
- 10.3. Tanques y depósitos circulares.
- 10.4. Tuberías.
- 10.5. Losas y Viguetas.

Capítulo I

Generalidades del Concreto Pre-esforzado

1. 1. Resistencia a la Tensión del Concreto.

La resistencia a la tensión del concreto alcanza apenas un valor de $1/8$ a $1/10$ de su resistencia a la compresión. Esta reserva de tensión no puede ser, sin embargo, aprovechada para soportar cargas, ya que es agotada en parte o totalmente por los esfuerzos internos producidos por diferencias de temperatura debidas al calor de fragua del cemento o a cambios de temperatura en el ambiente, por diferencias en el secamiento del concreto, por la restricción, que el acero de refuerzo presenta a la retracción, etc. Además en juntas de construcción existen secciones de menor resistencia. Estos fenómenos hacen que miembros de concreto sin reforzar se agrieten generalmente en el curso del tiempo, aún sin la aplicación de sobrecargas. Debido a esta razón, muy pronto se llegó a considerar la resistencia del concreto a la tensión como algo inseguro y se procedió a reforzar el concreto con varillas de acero, que suplen la fuerza de tensión del concreto y ayudan a mantener la formación de grietas dentro de límites permisibles. -

Por esta razón se calcula el concreto armado según la teoría clásica, considerando la zona de tensión agrietada y asignando al acero toda la fuerza de tensión. Las grietas asumidas en el cálculo apa -

recen realmente bajo cargas; sin embargo, se ha logrado reducir la separación de las grietas y mantener pequeño el ancho de las mismas por medio de una correcta distribución del acero y del empleo de varillas de formadas especiales. -

El agrietamiento del concreto ha sido causa de graves daños, sobre todo cuando el recubrimiento es pequeño, o cuando la corrosión del acero y la destrucción del concreto son favorecidos por condiciones climáticas severas, por el agua de mar, por los gases, etc. Muy pronto se concibió la idea de evitar las grietas comprimiendo el concreto mediante la tensión de varillas de acero, o sea precomprimiendo el concreto. -

1. 2 La Idea Fundamental del Pretensado.

La idea fundamental del concreto pre-esforzado es someter el concreto a compresión en todas aquellas zonas, donde las cargas producirán esfuerzos de tensión, en tal forma que esta compresión contrarreste en parte o totalmente las tensiones en el concreto. -

Esta idea la ilustraremos mediante un ejemplo sencillo con base en la fig. 1. En un prisma de concreto, en el cual se ha previsto un ducto, se coloca una barra de acero provista en sus extremos de rosca y tuerca, la cual se tensa haciendo girar las tuercas. Si la barra se puede mover libremente dentro del ducto, ésta se elongará en toda su longitud en una cantidad proporcional al esfuerzo del acero. La fuerza de tensión aplicada a la barra se apoya mediante las placas de distribución sobre el concreto y produce en éste los esfuerzos de compresión desea -

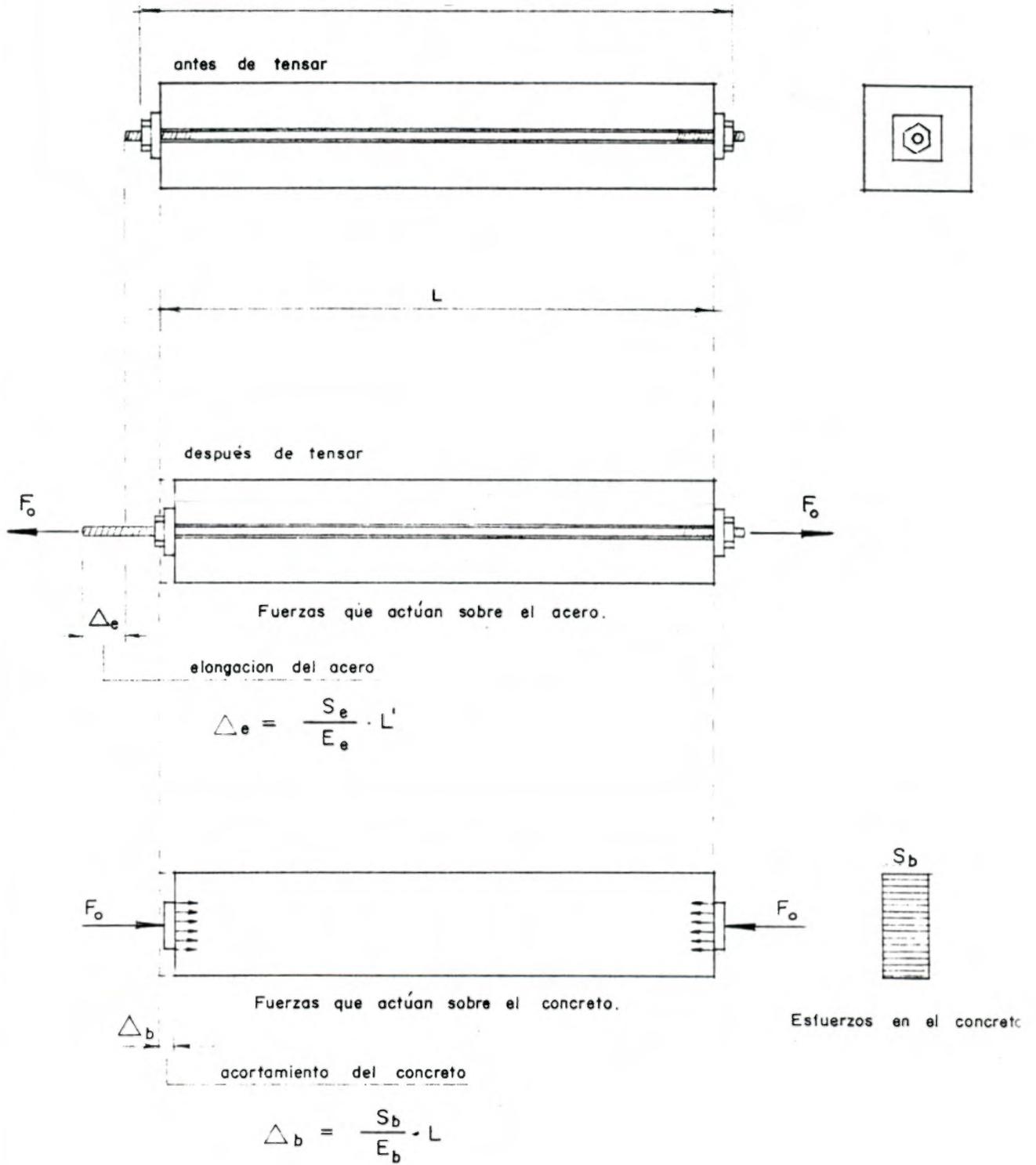


Fig. I

Prisma de concreto precomprimido
mediante una barra céntrica de
acero.

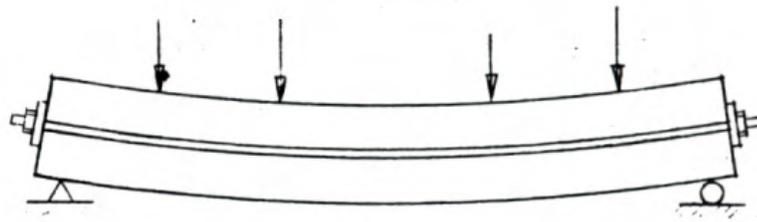
dos. -

Al aplicar la fuerza de compresión al concreto, éste se contrae una cantidad, que también es proporcional al esfuerzo en el mismo. La barra de acero sobresale del prisma una cantidad, que es la suma de la elongación propia del acero más la contracción del concreto.

El concreto sometido de esta manera a compresión lo llamamos precomprimido o concreto pre-esforzado. La fuerza en la barra es la fuerza de pretensión. -

Para simplificar hemos colocado la barra en el centro del prisma y hemos producido de esta manera una compresión uniforme en el concreto. Si apoyamos el prisma sobre dos apoyos como viga simple (fig. 2), resultan esfuerzos de tensión y compresión iguales producidos por los momentos de flexión y que se suman a los esfuerzos de precompresión. En la fibra superior los esfuerzos de compresión aumentan con la aplicación de cargas a la viga; en cambio, en la fibra inferior las tensiones disminuyen los esfuerzos de compresión debido al pre-esforzado, y no aparecerán tensiones en la viga siempre que los esfuerzos de precompresión sean mayores que los de flexión. -

La viga de concreto pre-esforzado soporta por lo tanto un grado de flexión sin que aparezcan realmente tensiones, porque en la zona de tensión existe una reserva de compresión que contrarresta las tensiones. El concreto permanece sin agrietarse, trabaja como sección homogénea y se calcula como sección homogénea. En la zona de compresión el esfuerzo del concreto está limitado por el esfuerzo permisible en compresión. Aquí los esfuerzos de compresión aumentan gradualmente



esfuerzos en el concreto :

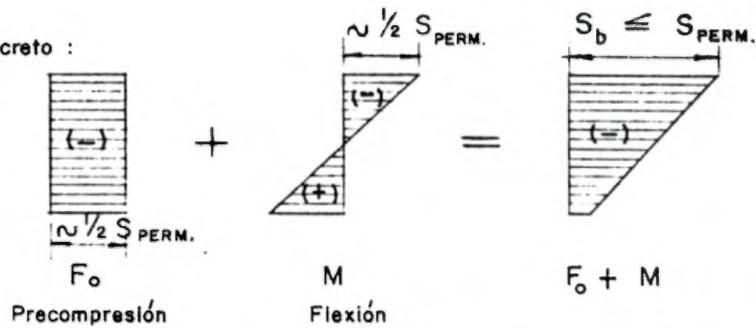
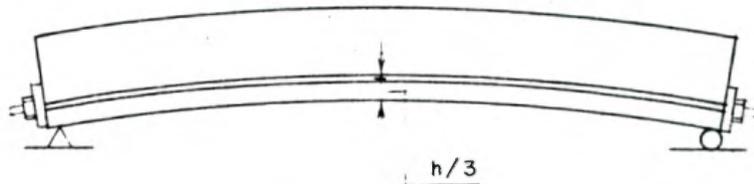


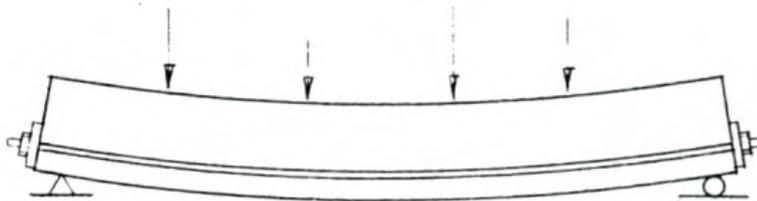
Fig. 2

Suma de esfuerzos debidos a
Precompresión más Flexión.

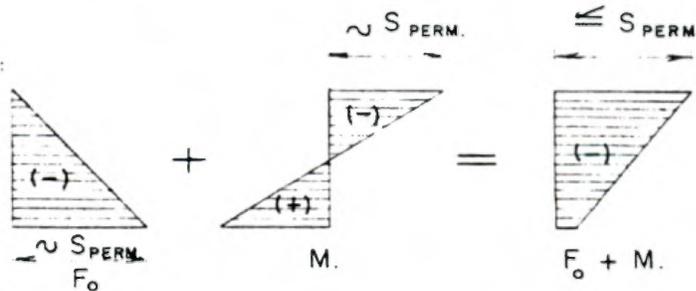
Precompresión :



Flexión



barra en punto tercio :



barra bajo tercio medio :

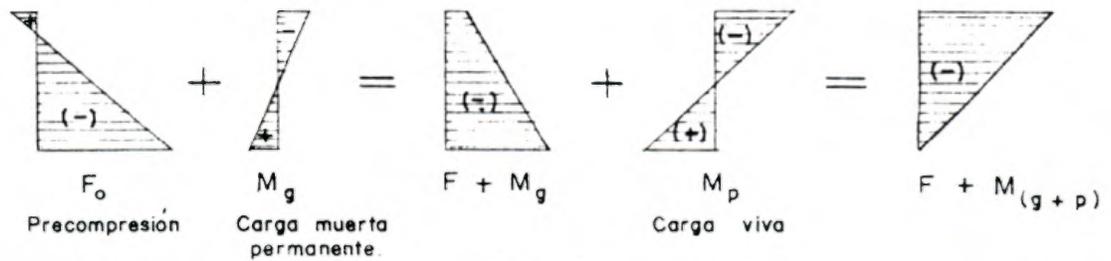


Fig. 3

debido a los esfuerzos de flexión y para la precompresión sólo podremos aprovechar la mitad del esfuerzo permisible. Vemos que una precompresión de la zona de tensión es favorable para resistir flexión, pero que en cambio en la zona de compresión disminuye la capacidad de carga. -

Colocamos ahora la barra con cierta excentricidad - (fig. 3), por ejemplo en el punto tercio, y obtenemos debido a solo la fuerza de pretensión una distribución de esfuerzos triangular, a la cual se sobreponen nuevamente los esfuerzos de flexión. Observamos que en este caso podemos aprovechar el esfuerzo de compresión permisible tan to arriba como abajo. -

Si una parte de la carga actúa permanentemente, pode mos colocar la barra bajo el punto tercio, es decir, permitimos en la fi bra superior tanta tensión, como compresión haya ahí bajo carga muerta (fig. 3). Como los momentos debidos a carga permanente son cero en los apoyos, debemos colocar ahí la barra otra vez dentro del tercio medio, si se quieren evitar los esfuerzos de tensión. La barra debe con ducirse pues en forma curva. Estos son los principios del concreto pre-esforzado aplicados al caso sencillo de flexión. -

1.3. Pérdidas de Tensión por Flujo Plástico y Retracción

A pesar de lo sencillo de estos principios, pasaron varias décadas para que el concreto pre-esforzado llegara a ser un material de construcción útil. Esto se debió principalmente a que los aceros empleados originalmente para aplicar la fuerza de tensión eran aceros corrientes, que se tensaban a un esfuerzo de sólo $600 \text{ Kg} / \text{cm}^2$. -

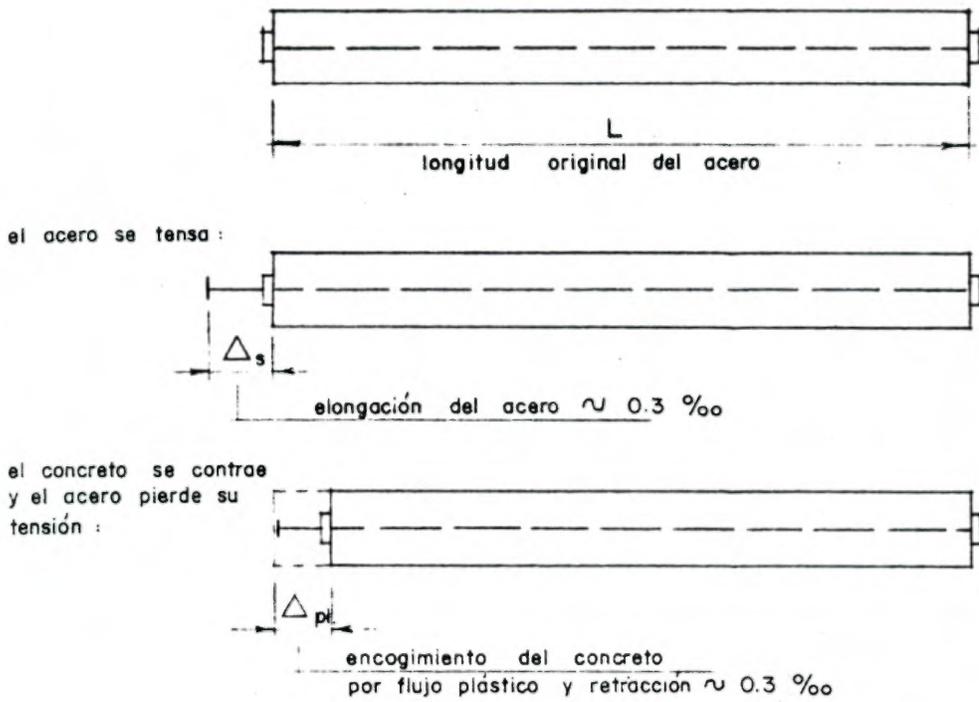


Fig. 4.
Pérdidas de tensión en aceros corrientes.

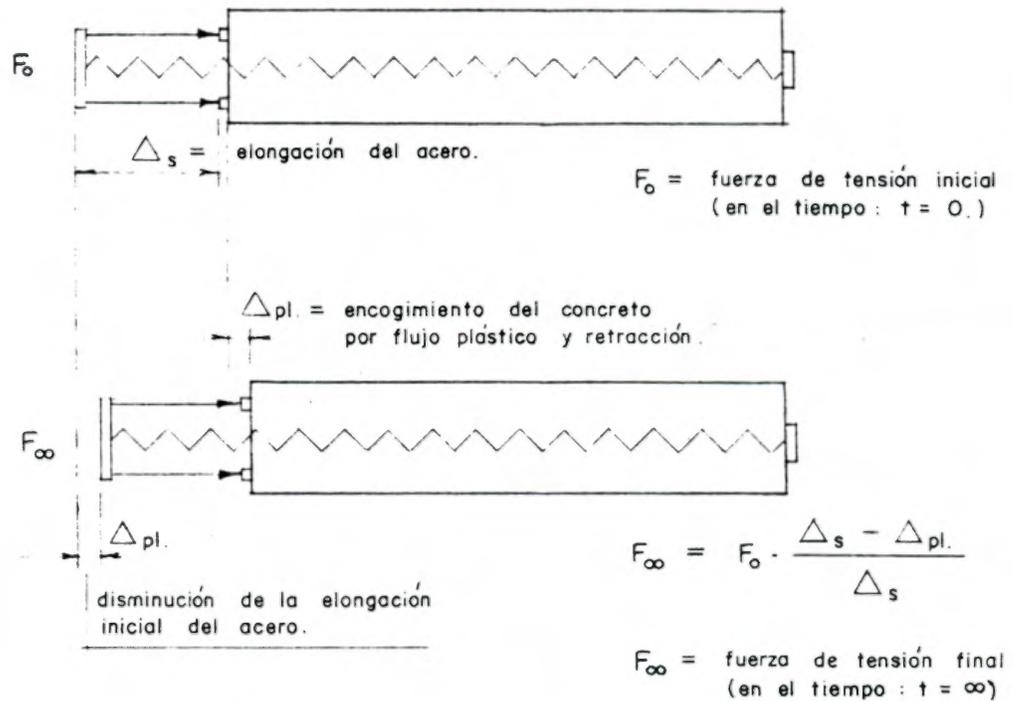


Fig. 5

Comparación del acero de pretensión con un resorte. *al encogimiento.*
El encogimiento del concreto disminuye la tensión en el acero proporcionalmente.

(8500 lb/pulg²). Con un módulo de elasticidad de 2.100. Kg/cm². - (30.000.000 lb/pulg²) esto representaba una elongación del acero de 0.3‰. Pronto hubo que observarse que piezas de concreto precomprimidas mediante una elongación tan pequeña del acero, se agrietaban después de cierto tiempo, Hoy sabemos que esto se debe a la retracción del concreto debido al flujo plástico y la retracción, que sucede poco a poco en el transcurso del tiempo y que por lo tanto no se observaba al principio. Con la retracción del concreto, la barra de acero se acorta y pierde parte de su tensión y por lo tanto, parte de la fuerza de compresión, que actúa sobre el concreto. -

La retracción del concreto depende de la calidad del mismo y de las condiciones del ambiente y alcanza un valor de 0.2 a 0.5%. El flujo plástico del concreto es una deformación plástica, que se sucede cuando el concreto está sometido a carga permanente y que puede alcanzar un valor de 4 veces la deformación elástica. Con los malos concretos usados en aquellos tiempos la retracción posterior del concreto podía bien llegar a ser de un 0.5% en total, o sea, era mayor que la elongación del acero; la barra perdía completamente su tensión y la compresión en el concreto desaparecía. (fig. 4)

Muchos investigadores han estudiado en los años pasados el problema de la retracción y del flujo plástico, asimismo los diversos factores que lo afectan. También se ha logrado hacer concretos no sólo más resistentes, sino también concretos que presentan en menor grado el flujo plástico y la retracción. -

Prácticamente todos los materiales fluyen de cierto

esfuerzo en adelante, y así fluyen también los aceros, es decir, presentan fuera de la deformación elástica, una deformación plástica adicional. La tensión disminuye si la longitud del alambre permanece constante y parte de la fuerza de tensión se pierde. -

En concreto pre-esforzado debemos contar, pues, siempre con una disminución de la fuerza de tensión aplicada por efecto del flujo plástico y retracción del concreto o la fluencia del acero y debemos proceder de acuerdo. -

1.4. Necesidad de Usar Materiales de Alta Calidad.

Para poder obtener, a pesar de estos fenómenos, una fuerza de tensión efectiva permanente, debemos emplear aceros cuya elongación sea bastante mayor que la contracción posterior del concreto, de manera que la pérdida de tensión sea sólo un porcentaje pequeño de la fuerza total. Como el módulo de elasticidad del acero varía prácticamente sólo entre límites muy pequeños, aproximadamente entre 1900 ton./cm^2 y 2150 ton./cm^2 , la elongación posible del acero depende casi exclusivamente del esfuerzo permisible y por lo tanto de su resistencia. Podemos considerar el acero como un resorte (fig. 5) cuya elongación representa la elongación del acero. El resorte pierde parte de su tensión en proporción al acortamiento del concreto por efecto del flujo plástico y retracción. La elongación inicial debe ser por lo tanto bastante mayor que el acortamiento del concreto, si se quiere una fuerza de tensión permanente suficientemente grande. Entre mayor sea la resistencia del acero, y por lo tanto su elongación permisible, menor será el porcentaje de pér-

didas de tensión, e igualmente, menor la cantidad de acero desperdiciada, que se emplea para contrarrestar esas pérdidas. -

En igual forma se desprende la necesidad de emplear concretos con resistencias altas y que fluyan en menor grado . Todas las medidas adoptadas en la práctica, tales como la de no tensar a muy temprana edad el concreto y no permitir innecesariamente esfuerzos muy altos en el mismo, tienden también a disminuir las pérdidas de tensión. -

La utilización de materiales de alta resistencia en el concreto pre-esforzado va en contraposición con la práctica del concreto armado clásico, en el cual las ventajas de la alta resistencia en el concreto son sólo ilusorias, ya que el trabajar con esfuerzos altos en el mismo obliga a aumentar considerablemente las secciones de acero. Por otro lado no podemos hacer uso de aceros con alto límite elástico, ya que estos tienen el mismo módulo de elasticidad que los aceros corrientes, y el aprovechar toda su resistencia permisible conduce a tales alargamientos, del acero, que a su vez llevan a la fisuración del concreto. -

1.5 Diferentes Tipos de Concreto Pre-esforzado.

Las estructuras de concreto pre-esforzado se clasifican en diversos grupos, de los cuales describiremos a continuación solamente los principales y en forma somera. -

Primeramente distinguimos, según el instante de aplicación de la fuerza de tensión en :

a. -) Pretensado. Los alambres se tensan en un lecho de tensado antes del vaciado del concreto. El lecho de tensado consiste

generalmente de una bancada larga con dos bastiones en sus extremos , que toman la fuerza de tensión de los alambres. Después del endurecimiento del concreto se corta la unión de los alambres con los bastiones , transmitiendo de esta manera la fuerza al concreto. -

b. -) **Postensado.** Los cables o alambres se colocan , ya sea fuera de la sección del concreto o en ductos dentro del mismo , y se anclan en sus extremos. Los cables se tensan después que el concreto haya obtenido suficiente resistencia y se apoyan sobre el concreto endurecido , mediante anclajes especiales , induciendo en al mismo una fuerza de compresión. -

También distinguimos según el tipo de adherencia entre el acero y el concreto. Así tenemos:

c. -) **Concreto pre-esforzado con adherencia** Significa que el acero está adherido en toda su longitud al concreto. En miembros pretensados se efectúa la adherencia simplemente al envolver el concreto los alambres. En construcciones postensadas se inyecta después de la operación de tensado lechada de cemento dentro de los ductos , que endurece y efectúa la adherencia. En este caso se habla de adherencia posterior. -

d. -) **Concreto pre-esforzado sin adherencia** En este caso no hay adherencia entre el acero y concreto . Por ejemplo , los cables se pueden colocar fuera de la sección de concreto , o se protegen con una capa de bitumen , que evita la adherencia y permite el movimiento del cable al tensar. En cables sin adherencia se debe proteger el acero contra la corrosión por medio de una capa de alguna sustancia antico-

rrosiva. -

También se clasifica el concreto pre-esforzado según los tipos de anclaje en:

e. -) Anclaje por medio de dispositivos especiales, tales como cuñas, placas, tuercas, etc. Este anclaje es típico para el postensado. -

f. -) Anclaje por medio de adherencia solamente, tal como se emplea en miembros pretensados. -

Según el grado de la fuerza de pretensión distinguimos entre:

g. -) Pretensión total, en la cual bajo cargas útiles no se permiten del todo esfuerzos de tensión en el concreto, y

h. -) Pretensión parcial, en la cual se admiten tensiones en el concreto, pero las que no deben sobrepasar su resistencia a la tensión. -

La fuerza de precompresión puede inducirse de varias maneras, de las cuales en grandes rasgos se distinguen los dos siguientes grupos:

i. -) Pretensión Interna. Este tipo de pretensión es el más usado y se realiza por medio de cables colocados dentro o fuera de la sección de concreto;

j. -) Pretensión Externa, la cual se realiza por medio de gatas colocadas en los extremos de la viga y apoyadas contra bastiones externos. Este tipo de pretensión es poco empleado, porque requiere bastiones externos muy fuertes, que resistan la fuerza de compre

sión y porque esta fuerza se pierde casi totalmente en el curso del tiempo. También se puede hacer por medio de ajustes en las reacciones en caso de vigas continuas o estructuras indeterminadas. -

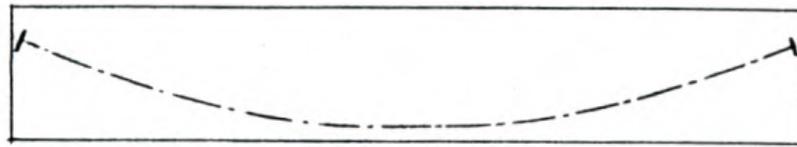
Los miembros de pretensión empleados para aplicar la fuerza de precompresión son de diversos tipos; pueden estar formados por alambres individuales de 3- 8 mm. de diámetro dispuestos paralelamente, o por barras de acero de 18- 36 mm. de diámetro; también se pueden emplear cables trenzados, tales como se conocen corrientemente. En lo sucesivo aplicaremos el nombre de cable en forma general a cualquier unidad de pretensión, como las descritas anteriormente. -

Los cables para postensado se colocan dentro de la sección de concreto dentro de ductos, que se forman por medio de vainas metálicas, que permanecen en el concreto, o por medio de tubos de hule, que se inflan y luego se retiran cuando el concreto haya endurecido. También se puede facilitar el deslizamiento del acero al tensar, por ejemplo, pintando las barras de acero con una capa de bitumen la que evita la adherencia y sirve de lubricante, o cubriendo el cable con papel bituminoso. En estos dos últimos casos hay que prescindir de cualquier adherencia posterior por medio de inyección de lechada. -

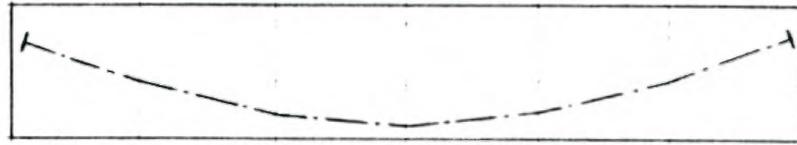
Los cables pueden colocarse en línea recta en todo el largo de la viga (fig. 6) o conducirse en forma curva, ya sea siguiendo una línea parabólica o poligonal (compuesta de secciones rectas). -

La ejecución de obras de concreto pre-esforzado puede realizarse de diferentes maneras, ya sea:

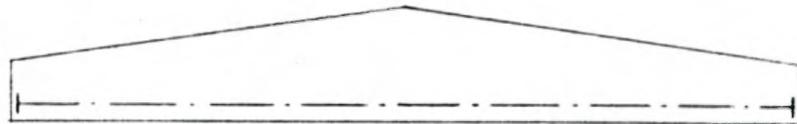
1. -) Prefabricando los miembros: por ejemplo, me -



Cable parabólico

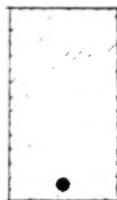


Cable poligonal
(secciones rectas)



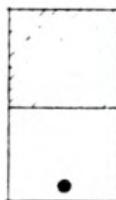
Cable recto.

Fig. 6.
Disposición de los cables.
en una viga simple.



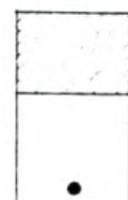
Estado I.

sección homogénea:
toda la sección es efectiva
en resistir los momentos
de flexión.



Estado II.

zona de tensión agrietada:
el acero suplía la falta de
tensión en el concreto.



Estado de ruptura.

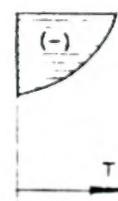
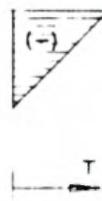
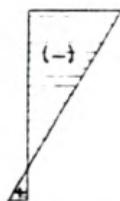


Fig. 7.

Diferentes estados de carga para una sección rectangular precomprimida.

diante producción en serie en una planta permanente o construyendo las piezas cerca del sitio de la obra. Este tipo de construcción resulta a veces económico, cuando un mismo tipo de pieza se repite varias veces, o cuando la economía de formaleta es considerable, y permite un mejor control de los materiales. -

m. -) Vaciado en obra; requiere un gasto mayor en la formaleta y andamiaje, pero economiza los gastos de transporte y erección. Además es indispensable para la construcción de miembros muy pesados. -

n. -) Construcción mixta o compuesta. A veces resulta más económico prefabricar una parte de un miembro, erigirla y luego chorrear la porción restante en el mismo sitio. El empleo de cada tipo de construcción deberá estudiarse para cada caso particular. -

1.6. Consideraciones sobre los esfuerzos permisibles en el Concreto y Acero. - Diferentes estados de carga. -

De las consideraciones hechas anteriormente sobre el flujo plástico y la retracción, se desprende que debemos calcular o estimar en cada caso las pérdidas de la fuerza de tensión debido a estos fenómenos, para verificar, si la fuerza de compresión final es suficiente para contrarrestar los esfuerzos de tensión. Sin embargo, no basta con analizar el estado de carga final ($t=\infty$) con la fuerza de tensión reducida, para momento máximo bajo cargas útiles, sino debemos también comprobar los esfuerzos debidos al peso muerto, que actúa al aplicar la fuerza de tensión inicial ($t=0$), ya que bajo este estado de carga se deben también observar ciertos límites para los esfuerzos permisibles. -

En el caso de una viga prefabricado, por ejemplo, só lo actúan una parte del peso muerto en el instante de tensar. A la pre - compresión se opone momentáneamente sólo el peso propio de la viga, lo que trae por consecuencia que el esfuerzo de pre - compresión en la zona de tensión (fibra inferior) sea muy grande y aún pueden aparecer tensio - nes en la fibra superior (zona de compresión), las que desaparecen en cuanto se restablezca el resto del peso muerto. Debemos, pues, analizar los diferentes estados de carga a que estará sometido el miembro, antes y después de efectuado el flujo plástico y la retracción. -

Los esfuerzos de precompresión iniciales en el concreto, son disminuídos en el transcurso del tiempo por el flujo plásti - co y la retracción; además estos esfuerzos son tales, que contrarrestan el efecto de cargas futuras, que los disminuyen. Por esta razón, se permiti - ten para el estado inicial en el tiempo $t = 0$ y sin cargas vivas, esfuerzos mayores que para estructuras de concreto armado corriente. Debemos dis - tinguir entonces dos tipos de esfuerzo permisible: esfuerzo que se sucede únicamente en el momento del tensado, pero que disminuye en el curso del tiempo debido a futuras influencias, tales como las cargas útiles y el flujo plástico y retracción; y esfuerzos que aumentan gradualmente debi - do a las cargas. Para estos últimos se permite un líquido menor en el esfuerzo permisible. -

En la fuerza de tensión de los cables distinguimos entre:

a. -) Fuerza de tensión inicial (F), que actúa en el momento $t=0$, o sea antes de iniciarse las pérdidas por flujo plástico y

retracción , y

b. -) La fuerza de tensión permanente (F_{∞}), que resulta después de efectuarse todas las pérdidas por flujo plástico y retracción del concreto y fluencia del acero, en el tiempo $t=\infty$. -

En obras pretensadas la fuerza de tensión inicial es igual a lo largo de todo el cable. En miembros postensados, en los cuales los cables se conducen en forma curva la fuerza de tensión es menor en el centro de la viga que en los extremos, debido a la fricción que experimenta el cable al deslizarse. Para poder obtener en la sección más desfavorable la fuerza de tensión necesaria, se permite aumentar momentáneamente hasta en un 10% la fuerza de tensión en los extremos, para contrarrestar las pérdidas por fricción. - En obras pretensadas se efectúa la primera pérdida de tensión por el encogimiento elástico del concreto al cortar la unión de los alambres con los bastiones. En este caso es lógico permitir un esfuerzo más alto en el acero que para el concreto postensado, porque este esfuerzo actúa sólo momentáneamente y no afecta la seguridad de la estructura.

1.7 Seguridad contra la ruptura.

En secciones de concreto pre-esforzado, los esfuerzos no varían proporcionalmente a los momentos debidos a cargas exteriores. Al sobrepasar la carga útil permisible, los esfuerzos sufren un cambio brusco al aparecer la primera grieta en la zona de tensión y la sección resistente cambia bruscamente de la sección homogénea rectangular a la pequeña zona de compresión mostrada en la fig. 7. Al conti-

nuar aumentando gradualmente la carga, se hacen notar sobre todo las variaciones del diagrama de carga (esfuerzos vrs. deformaciones) del concreto y del acero; es decir, la ley de Hooke ya no es válida para las sobrecargas. -

Mientras en estructuras corrientes la seguridad de la obra se obtiene sencillamente manteniendo los esfuerzos dentro de un límite permisible, el cual es el esfuerzo de ruptura dividido por el factor de seguridad, esta consideración no es válida para concreto pre-esforzado. Debido a estas consideraciones se hace necesario, pues, calcular en cada caso el momento de ruptura de la sección para comprobar la seguridad necesaria. -

1.8 Carga de agrietamiento.

Para calcular la seguridad contra el agrietamiento, se calcula la carga probable bajo la cual aparecerá la primera grieta, es decir, bajo la cual se sobrepasa la resistencia a la tensión del concreto. Para los resultados prácticos no tiene importancia alguna el cálculo de esta seguridad de agrietamiento. -

En concreto pre-esforzado con pretensión parcial pueden aparecer en el concreto grietas a pesar que el esfuerzo de tensión se mantiene dentro de un límite permisible, debido a los esfuerzos internos de tensión, que producen las diferencias de temperatura y el secamiento. Para disminuir la formación de grietas y mantenerla dentro de límites permisibles, se coloca un refuerzo de temperatura adicional al acero de pretensión. Además se le asigna a este refuerzo toda la tensión.

sión, que bajo cargas pueda aparecer en la zona de tensión. -

1.9. La responsabilidad en la ejecución de obras de concreto pre-esforzado.

En concreto pre-esforzado se suceden realmente los esfuerzos asumidos en el cálculo debido a la precompresión. Si se aprovechan los esfuerzos permisibles para el estado de carga inicial se producen esfuerzos, que son más altos que los esfuerzos que en obras de concreto armado sólo suceden bajo carga máxima total. También al acero se aplica el esfuerzo permisible total, mientras que en concreto armado el esfuerzo permisible del acero casi nunca llega a alcanzarse. Hay que tener esto en mente para darse cuenta de la gran responsabilidad, que representa la ejecución de una obra en concreto pre-esforzado. La resistencia del concreto, como la del acero, deben estar garantizadas con seguridad, ya que al tensar trabajamos con un factor de seguridad menor que en otros casos. Se dice con mucha razón que al tensar se realiza una auto-prueba de los materiales y que al finalizar la operación de tensado se obtienen esfuerzos, que no se volverán a obtener durante la vida útil de la estructura. -

Las fuerzas de pretensión son generalmente muy grandes y actúan con una excentricidad pequeña. Si se varía esta excentricidad en sólo unos centímetros, varían considerablemente los momentos debidos a esta fuerza, sobre todo en estructuras esbeltas. La posición calculada de los cables de tensión, debe mantenerse exactamente; la forma descuidada de colocar el refuerzo y de tomar las medidas en

la práctica del concreto armado , debe desaparecer de cualquier manera en la ejecución del concreto pre-esforzado. -

La inspección de la obra deberá realizarse por un ingeniero responsable, que deberá comprobar la posición de los cables y estar presente en la operación de tensado y la inyección de la lechada . Las normas de concreto pre-esforzado exigen, que en la ejecución de obras de concreto pre-esforzado participen solamente compañías e ingenieros, que tengan una larga experiencia y suficientes conocimientos en esta materia. -

1.10 Ventajas Especiales del Concreto Pre-esforzado.

El éxito obtenido en los últimos años por el concreto pre-esforzado, no sería posible si no presentara ventajas considerables con respecto al concreto armado corriente. Estas ventajas son las siguientes:

a. -) Debido a la ausencia de grietas en el concreto , se obtiene una mejor protección del acero contra la corrosión y por lo tanto una mayor durabilidad de la estructura. -

b. -) La sección completa de concreto trabaja como sección homogénea, lo que trae una economía de un 15 - 30% en la sección de concreto. La economía en el acero es mucho mayor y alcanza un valor de un 60 - 90%. lo cual se debe principalmente a los esfuerzos altos permitidos en el acero de pretensión. En el par. 1.4 mencionamos las razones por las cuales en el concreto armado corriente no podemos aprovechar las ventajas de los materiales de alta resistencia. El uso de

estos materiales en concreto pre-esforzado, representa una de las más importantes ventajas de este sistema. -

c. -) Las deformaciones y deflecciones de una estructura de concreto pre-esforzado son notablemente pequeñas. Alcanzan un valor de aproximadamente $1/4$ parte de las deformaciones del concreto armado, bajo las mismas condiciones de altura de construcción y aprovechamiento de esfuerzos permisibles. - El concreto pre-esforzado se defleciona aún menos que el acero estructural; su deflección es aproximadamente un 33% de la deflección de una viga de igual altura en acero. Estas deformaciones pequeñas permiten una altura de construcción menor, sin que por esto sucedan, debido a cargas dinámicas, vibraciones mayores en la estructura. -

d. -) El concreto pre-esforzado tiene la propiedad de reponerse completamente después de sobrecargas considerables, sin que queden deformaciones permanentes en la estructura (high resilience) Las grietas producidas por la carga, se cierran completamente después de retirar la misma. -

Capítulo II

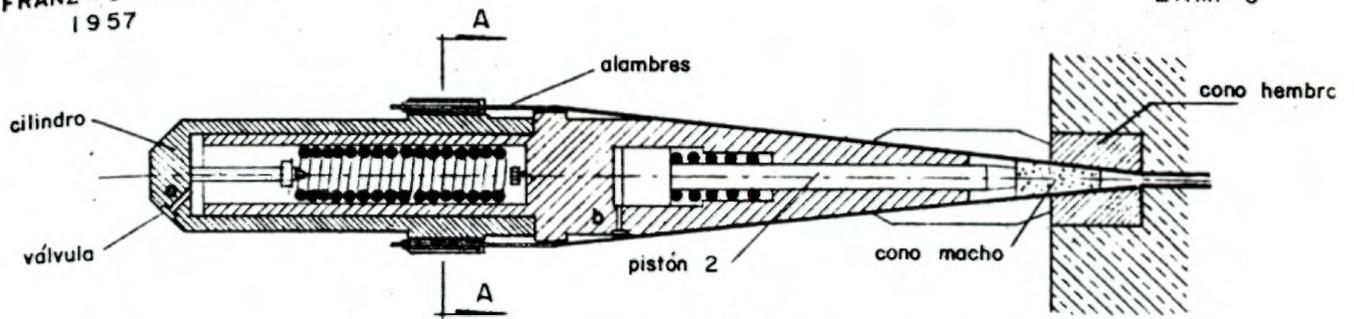
Sistemas Clásicos para Concreto Pre-esforzado

2.1 Sistema Freyssinet.

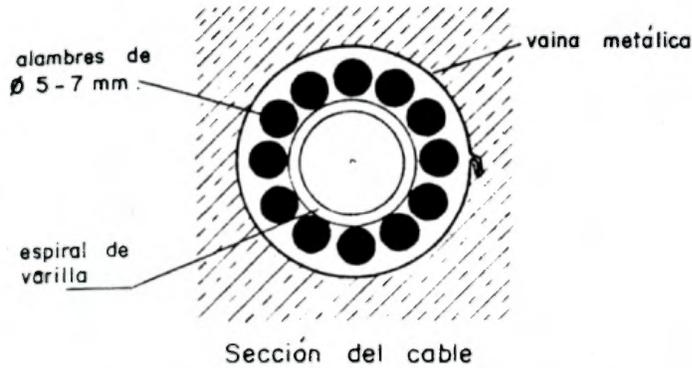
El cable consiste generalmente de un número de 3, 10, 12, o 18 alambres de diámetro 5 - 7 mm., dispuestos paralelamente y agrupados en forma circular alrededor de una espiral de hierro, que asegura la separación de los alambres y prevee un ducto central para la inyección posterior de la lechada de cemento. Los alambres se envuelven con una vaina metálica que impide la adherencia con el concreto durante el vaciado del mismo y forma un ducto al cable. Se pueden colocar también los cables, envolviéndolos con papel bituminoso o formando los ductos con mangueras de hule, que se inflan y luego se retiran después del endurecimiento del concreto. -

En cada extremo se dispone una unidad de anclaje, que mantiene la fuerza de tensión del cable y que consiste de un cilindro de concreto con un interior cónico (cono hembra), a través del cual pasan los alambres, y de un cono macho, el cual se introduce después del tensado dentro del cono hembra, presionando y acuñando los alambres contra la cara interior de éste. -

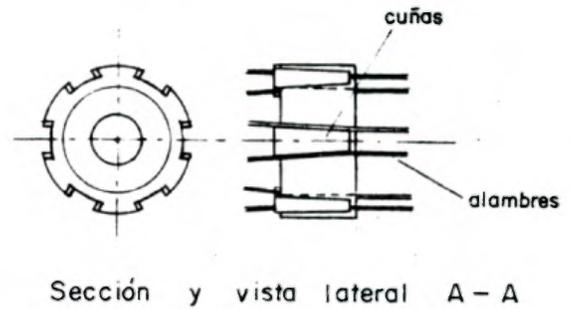
El tensado de los cables se realiza por medio de una gata hidráulica especial (fig. 8), que pesa aproximadamente 50kg. Se-



Gata hidráulica y conos de anclaje.



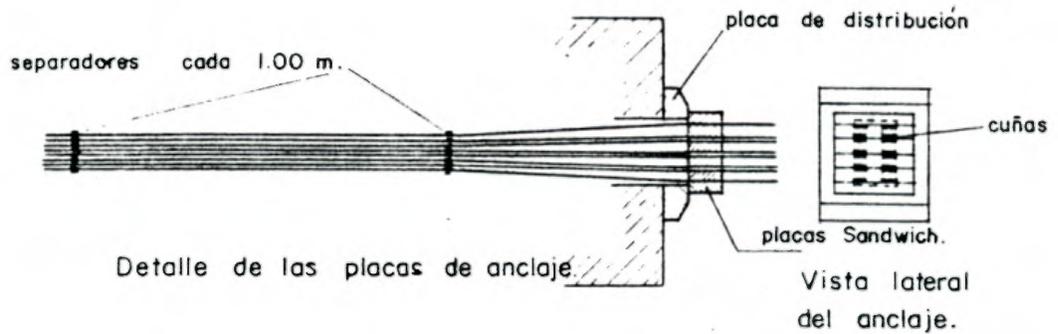
Sección del cable



Sección y vista lateral A-A

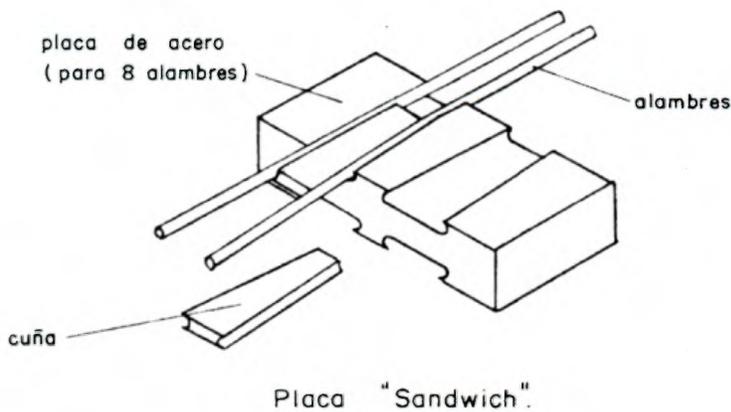
Fig. 8

Sistema Freyssinet

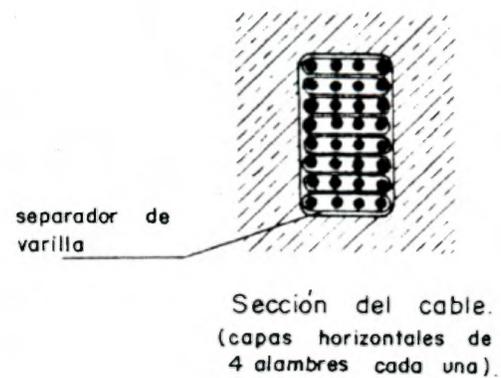


Detalle de las placas de anclaje

Vista lateral del anclaje.



Placa "Sandwich".



Sección del cable.
(capas horizontales de 4 alambres cada una).

Fig. 9.

Sistema Maanel

tensan simultáneamente todos los alambres de un cable y generalmente la operación de tensado se hace desde ambos extremos, es decir, con dos gatas. Primero se anclan los extremos de los alambres, que sobresalen del anclaje, contra el cilindro de la gata mediante pequeñas cuñas, que sostienen dos alambres cada una. Por medio de una bomba hidráulica manual se inyecta agua en el interior de la gata y se aplica la presión sobre el cilindro, que empuja los alambres hacia afuera; el pistón de la gata se apoya directamente sobre el cono del anclaje. De esta manera se ejerce la fuerza de tensión en el cable. En un manómetro se lee la presión y la fuerza total ejercida en la gata y este valor se compara con la elongación total del alambre en los extremos. Al alcanzar la fuerza de precompresión total, se inyecta líquido por la válvula "b", ejerciendo presión sobre el pistón 2, que introduce el cono macho dentro del cilindro de concreto. La gata se puede retirar luego y los extremos de los alambres se cortan a ras con la superficie de la viga. La adherencia posterior del acero con el concreto se obtiene inyectando después de la operación de tensado, mortero de cemento, para el cual se emplea una arena fina, a través de un orificio central en el cono macho. -

2.2 El Sistema Belga del Profesor Magnel.

Los alambres empleados en este sistema son generalmente de 5 - 7 mm. de diámetro con resistencias hasta de 160kg mm^2 , es decir, el mismo acero empleado para el sistema Freyssinet. Un cable consiste de varias capas horizontales, cada una con 4 alambres. La separación libre entre alambres es de aproximadamente 5mm. tanto en

sentido horizontal como vertical y se asegura por medio de separadores de alambre grueso o de placas perforadas, que se colocan aproximadamente cada metro. Esta separación entre alambres permite que el mortero de cemento envuelva todos los alambres y que fluya libremente durante la inyección. Los cables se colocan en vainas metálicas rectangulares y cada cable puede consistir de un número cualquiera de capas de alambres. En diferentes oportunidades se han hecho los ductos en el concreto colocando cables de hule rectangulares, que se retiran después de chorreado el concreto. Los cables se intruducen luego en los ductos previstos. -

Los anclajes de los cables, las llamadas placas Sandwich, están representados en la (fig. No. 9). Con cada placa Sandwich se anclan 8 alambres por medio de 4 cuñas de acero. Las placas Sandwich se apoyan a través de una placa de distribución sobre el concreto y transmiten de esta manera la fuerza de precompresión al concreto. -

El tensado se lleva a cabo simultáneamente desde los extremos por medio de una gata especial, que tensa los alambres de dos en dos. Después de aplicar la fuerza de tensión, se introduce la cuña, se retira la gata y se tensan dos alambres más y así sucesivamente. Los extremos de la viga se chorrean posteriormente con concreto para cubrir y proteger las placas contra la corrosión. -

2.3 Sistema Lee - McCall.

Un sistema apropiado para tensar barras de acero

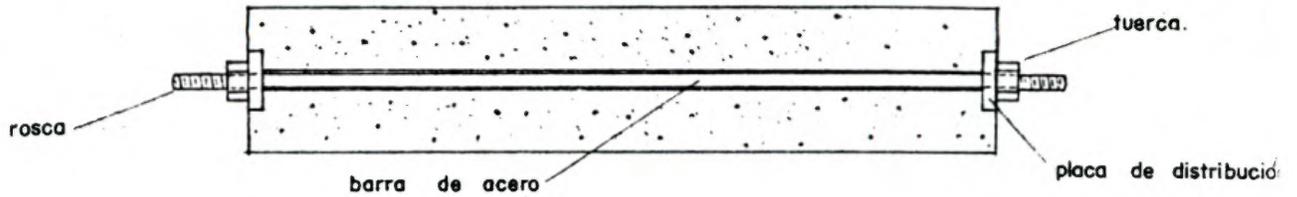


Fig. 10.

Sistema Lee - Mc.Call

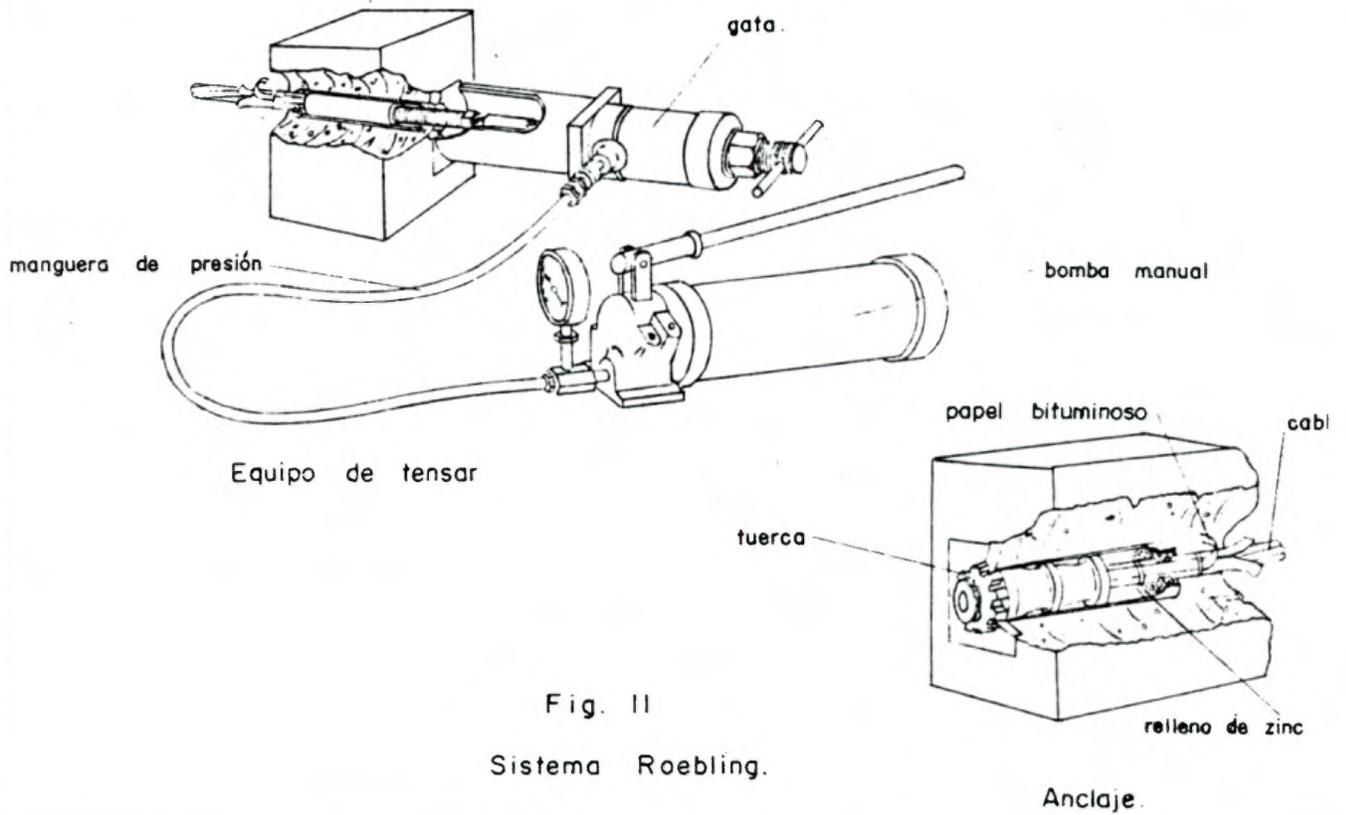


Fig. 11

Sistema Roebling.

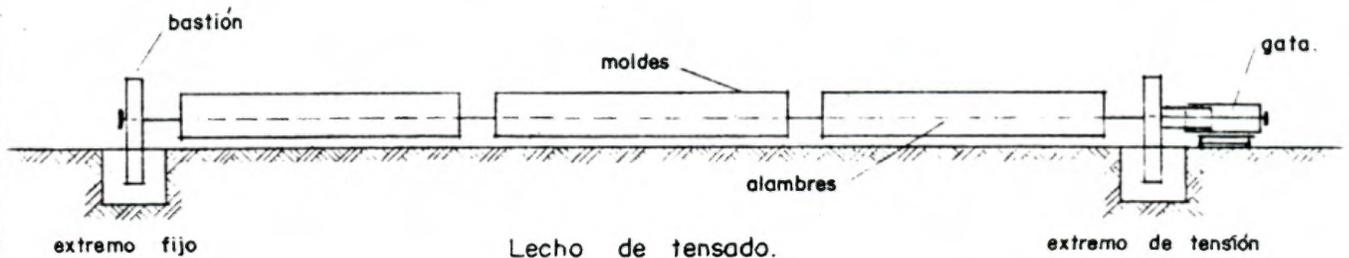


Fig. 12.

Vista esquemática
de una planta de concreto pretensado

de 12-28 mm de diámetro fue desarrollado en Inglaterra por Donovan Lee, el cual se conoce como el sistema Lee-McCall. Los extremos de las barras están provistos de una rosca fina, la que está hecha de tal forma, que desarrolla aproximadamente un 98% de la fuerza total de la barra. Por medio de una tuerca, se ancla la barra contra una arandela de acero y una placa de distribución, que transmiten la fuerza al concreto (fig. 10). Las barras se colocan dentro de la sección de concreto en ductos, los cuales se forman con mangueras de hule, que se retiran unas 8 a 12 horas después de vaciado el concreto. El diámetro de la manguera es unos 6 a 10 mm mayor que el diámetro de la barra, permitiendo el paso de la lechada de cemento. También se pueden colocar las barras cubriéndolas con una capa de bitumen o similar, que evita la adherencia y sirve de lubricante al tensar, o los ductos se forman con vainas de metal circulares. - Pueden también emplearse vainas de material plástico o de papel engrasado. -

Para el tensado se emplea una gata de 42-45 toneladas de capacidad, la que se acciona con una bomba manual. Ambos aparatos, bomba y gata, van dispuestos en un carro movable formando una sola unidad. -

El acero empleado es generalmente de resistencias de 100-110 kg mm². Las barras se entregan en longitudes hasta de 20 m. Longitudes mayores se obtienen uniendo dos o más barras por medio de empates especiales. -

2.4 Sistema Roebling.

Para el postensado de cables la John A. Roebling's -

Sosn Corp. de Estados Unidos desarrolló un sistema especial de anclaje adaptado especialmente a las condiciones de trabajo de ese país. Los miembros de pretensión consisten de cables de 7 o más alambres galvanizados, tales como los que se usan en los puentes de suspensión. Para el anclaje de los cables se emplean piezas cilíndricas, que tienen roscas en el interior y exterior de su extremo (fig. 11). Los alambres del cable penetran en el interior cónico de la pieza cilíndrica, y éste se llena con zinc fundido para anclar los alambres. -

Para evitar la adherencia con el concreto se envuelven los cables con papel o tela. Como los cables no se inyectan con lechada, prescindiendo de la adherencia posterior, este sistema permite en cualquier momento un control de la fuerza de tensión en los cables y un ajuste posterior de la fuerza. Para el tensado se adapta un tornillo a la rosca interior por medio del cual se aplica la fuerza de tensión. Cuando el cable ha sido estirado a su posición final, se sujeta con una tuerca en la rosca exterior de la pieza cilíndrica. -

2.5 Pretensado-Fabricación en Lechos de Tensado.

Un método sencillo para pretensar un miembro de concreto consiste en tensar los alambres y anclarlos contra dos bastiones en los extremos de un lecho de tensado antes del vaciado del concreto (fig. 12). Después del endurecimiento del concreto, se corta la unión de los alambres con los bastiones, transmitiendo de esta manera la fuerza de tensión de los alambres al concreto por simple adherencia. -

Los bastiones deberán diseñarse para resistir la fuer-

za de tensión en los alambres hasta el endurecimiento del concreto, lo cual supone cimientos masivos con un costo de construcción muy elevado, que será tanto mayor, cuanto mayor sea la fuerza de tensión. El sistema de fabricación en lechos de tensado será por lo tanto únicamente económico para casos de fabricación en serie y cuando las bancadas se pueden emplear repetidas veces. Es un sistema ideal para la producción en masa de miembros de concreto, los que estarán limitados en su tamaño y peso por las facilidades y el costo de transporte y erección. -

El proceso de fabricación consiste en tensar los alambres entre dos bastiones distanciados unos 50 - 100m. Los bastiones están empotrados al suelo independientemente y resisten temporalmente la fuerza de tensión. En una misma bancada se pueden producir simultáneamente varios miembros colocando divisiones en los moldes y chorroando cada unidad por separado. Los moldes empleados son generalmente de metal para poder emplearlos múltiples veces, y se colocan después de tensar los alambres. -

En la mezcla de concreto se emplean cementos de fragua rápida o acelerantes para obtener en un lapso de tiempo muy corto, a veces en 8 horas, resistencias muy altas que permiten la aplicación de la fuerza de precompresión al concreto a temprana edad. De esta manera se logra usar una misma bancada cada 24 - 48 horas, reduciendo en la economía y eficiencia de la instalación. Para acelerar el endurecimiento del concreto también se puede curar el concreto con vapor de agua, lo que requiere, sin embargo, calderas e instalaciones

costosas. -

La tensión de los alambres se efectúa en un extremo con una gata hidráulica, accionada generalmente por un motor eléctrico y montada sobre un carro, que corre sobre rieles perpendicularmente a las bancadas, sirviendo en esta forma a los diferentes lechos. En el otro extremo los alambres se anclan al bastión. Se emplean diferentes tipos de accesorios para anclar los alambres a los bastiones, ya sea por medio de cuñas, clips, etc. Estos accesorios pueden servir para uno o varios alambres. Cuando la adherencia de los alambres no es suficiente para transmitir la fuerza de compresión, se agregan piezas o accesorios especiales de anclaje a los extremos, que proveen un anclaje adicional. -

La transmisión de la fuerza de compresión de los alambres al concreto se efectúa en los extremos de los miembros por medio de adherencia, lo que requiere el uso de alambres de diámetro pequeño hasta de 2 mm. También se emplean alambres de mayor diámetro con corrugaciones o retorcidos, que mejoran la adherencia. Alambres ovalados tienen la ventaja de tener mayor superficie de contacto a igual sección. - En concreto pretensado se emplean también torones o cables de 2 a 7 alambres. -

Para la fabricación de miembros pequeños de concreto, tales como durmientes para ferrocarril, se usan también moldes de acero rígidos, que sean capaces de tomar temporalmente la fuerza de tensión de los alambres, lo que elimina la construcción de bastiones fuertes, pero exige una inversión mayor en los moldes. -

Capítulo III

Sistemas para Concreto Pre-esforzado

Leoba y Baur - Leonhardt.

Los dos sistemas para concreto pre-esforzado que a continuación se describen, se distinguen sobre todo por su sencillez en la ejecución, y por la economía que representan en la mano de obra y en el costo de sus anclajes. Los dos sistemas fueron desarrollados por los ingenieros alemanes Fritz Leonhardt y Willi Baur en 1949 y se tratan aquí en capítulo separado por el interés que han despertado en nuestro medio, siendo el sistema Leoba el primero en tener aplicación en la construcción en Costa Rica y Centro América. La firma Pretensora de Concreto S. A. posee las patentes de ambos sistemas para la zona de Centro América y ha sido la primera empresa en ejecutar una obra en concreto pre-esforzado en esta región. El sistema Baur-Leonhardt se distingue por sus cables concentrados para grandes fuerzas de tensión y tiene aplicación sobre todo en la construcción de puentes con luces mayores. El sistema Leoba se emplea en la construcción de edificios y de puentes pequeños. -

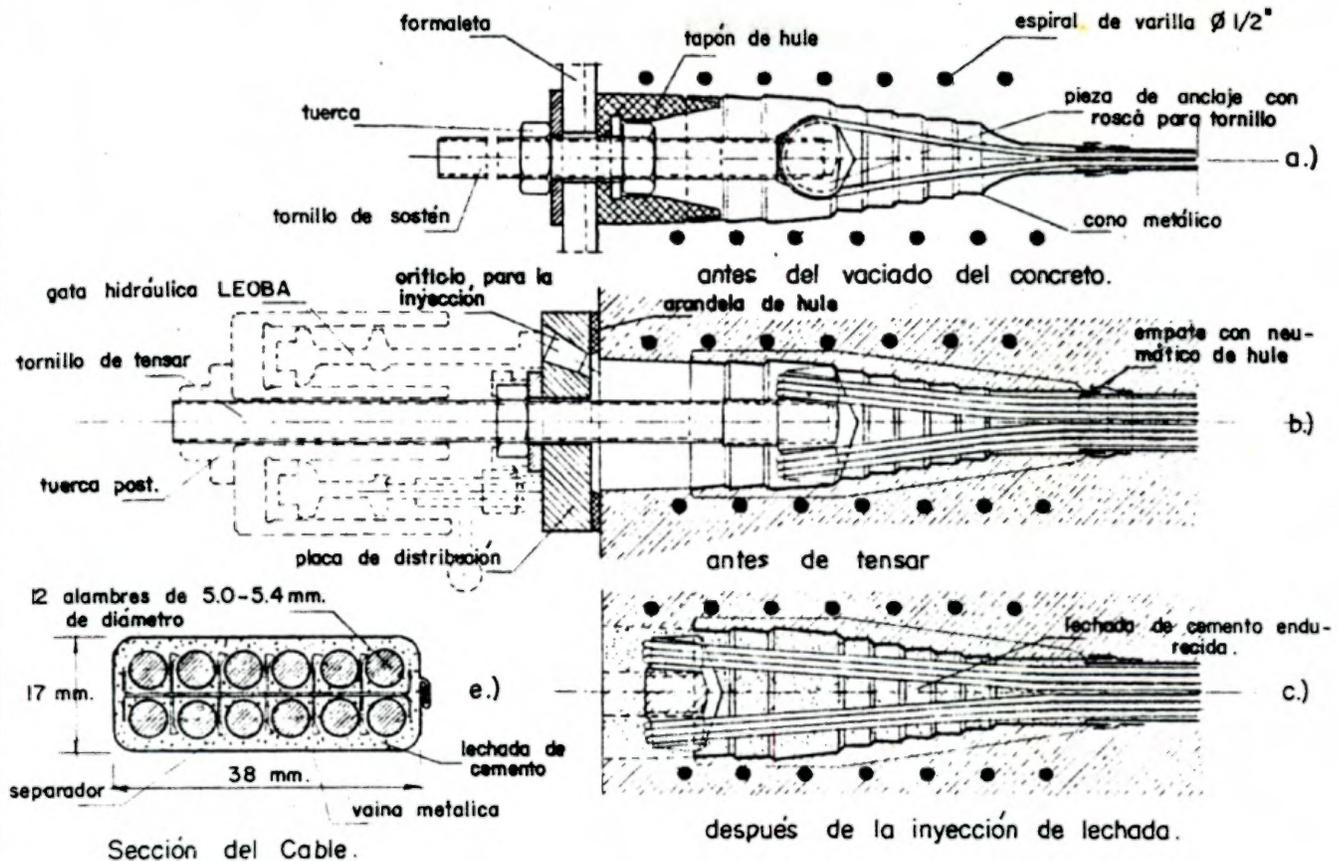
El Sistema LEOBA.

3.1 Descripción del Sistema.

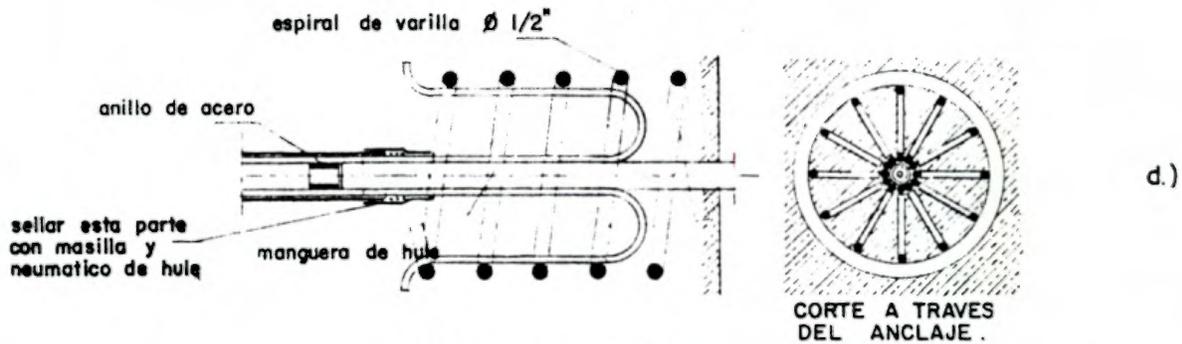
Los cables consisten de 12 alambres de 5.0 a 5.4mm de diámetro, dispuestos en una vaina metálica rectangular en dos capas horizontales. La distancia correcta entre los alambres se mantiene por medio de separadores sencillos de hojalata (fig. 13, d). En un extremo los cables se anclan formando ganchos en los alambres, que se refuerzan por medio de una espiral de varilla, quedando embebidos en el concreto (extremo de anclaje o anclaje fijo), (fig. 15) En el otro extremo los alambres forman un lazo alrededor de una pieza de hierro fundido y se tensan con un tornillo, que sujeta los 12 alambres simultáneamente. (extremo de tensión), (fig. 14). -

En el extremo de tensión la vaina metálica termina en un cono de metal de 10cm. de diámetro para dar cabida a la pieza de anclaje y un tapón de hule sella el lado exterior del cono. La pieza de anclaje tiene una perforación con rosca, en la cual se introduce un tornillo de sostén, que mediante dos tuercas y una arandela de acero sirve para sujetar el cable a la formaleta. (fig. 13, a)

En el extremo fijo los ganchos se disponen radialmente, introduciendo entre las capas de alambres un anillo de acero, que obliga a los alambres ordenarse en forma circular. Para proveer la ventilación para la inyección de la lechada, se introduce un cabo de manguera hasta el anillo de acero. Después del fraguado del concreto se retira la manguera, dejando un ducto hasta la superficie exterior. La ventila -



Anclaje de Tensión.



Anclaje de Ganchos - Extremo Fijo.



Anclaje con Alambres Ondulados.

Fig. 13

Cables Sistema LEOBA.

ción se puede hacer también colocando un tubo conduit de metal, que permanece dentro del concreto. -

Durante la chorrea, el concreto envuelve los gan - chos de anclaje, y por adherencia este extremo queda anclado al concreto. Los empates de las vainas metálicas se sellan con tape eléctrico para impedir que la lechada penetre en los ductos. El vibrado alrededor de los anclajes debe hacerse cuidadosamente para evitar que queden hormigueros en estas zonas, que pueden conducir a fallas del anclaje. -

Al desformaletear los extremos de la viga, el tapón de hule, el tornillo de sostén y las tuercas se retiran. Antes de la opera - ción de tensado se intruoduce en la pieza de anclaje un tornillo de tensar , que se sujeta con una tuerca a una placa gruesa de distribución de acero. La placa de distribución se apoya directamente sobre el concreto a través de una arandela de hule que se adapta a las irregularidades de la superfi - cie de apoyo y distribuye uniformemente los esfuerzos al concreto. Sobre el tornillo se coloca la gata hidráulica, que pesa solamente 11kg. El pis - tón de la gata se apoya sobre la placa y mediante una tuerca se sujeta el cilindro al tornillo . (fig. 13, b) La presión necesaria se obtiene accionando una bomba hidráulica manual unida a la gata por medio de una manguera de presión. Al inyectar el líquido (aceite o Diesel) a la gata, el cilindro se mueve hacia afuera estirando el cable. Alcanzada la fuerza requerida en el cable, se soca la tuerca contra la placa mediante una racha en la gata la que queda disponible para otro uso. -

De esta manera se tensan y se sujetan los 12 alam - bres simultáneamente con un tornillo y 2 tuercas, de modo que la opera -



Fig. 14

Extremo de Tensión.

En la figura se observan los alambres - que forman lazos alrededor de la pieza de anclaje. También muestra el tornillo de sostén con la tuerca y el tapón de hule. -



Fig. 15

Extremo Fija

Se observan los ganchos de alambre reforzados con una espiral de varilla de hierro, y la manguera de hule, que forma el ducto de ventilación para la inyección de la lechada. -

ción de tensado requiere poco trabajo. La placa de distribución tiene un orificio a través del cual se inyecta lechada de cemento una vez finalizada la operación de tensado. La lechada endurecida sostiene la pieza de anclaje formando una cuña en el cono, de tal manera que el tornillo y la placa se pueden retirar. (fig. 13, c). Además la lechada envuelve perfectamente los alambres en toda su longitud y la adherencia provee una seguridad adicional al anclaje. -

Otro tipo de anclaje más efectivo se ha obtenido para el extremo fijo con extremos de alambres ondulados, que se forman con una máquina especial, reforzados con una espiral de varilla (fig. 13, f)

3.1 Ventajas Especiales del Sistema.

Se sabe de las experiencias, que la fricción en las curvaturas en cables con disposición circular de alambres es mayor debido a que los alambres se presan mutuamente, por lo que en este sistema los alambres se han ordenado en dos capas horizontales de cada una 6 alambres. De esta manera los alambres inferiores se apoyan al tensar directamente sobre la capa superior disminuyendo la fricción. Los cables LEOBA se prestan por esta razón sobre todo para la precompresión de vigas continuas hasta de tres tramos, a pesar que solamente se tensan desde un extremo. La forma rectangular del cable también es superior a una disposición circular, porque el cable es más flexible en el sentido angosto, y más rígido en el otro sentido, lo que facilita su colocación. -

Los anclajes empleados en este sistema son muy sencillos y requieren para su construcción mano de obra poco especiali -

zada y su costo también es menor que en otros sistemas. Siendo el costo del anclaje un porcentaje alto del costo total del cable, esto representa una ventaja importante del sistema. En el extremo fijo el anclaje se obtiene con ganchos formados por el propio alambre; la espiral de varilla se fabrica en el mismo sitio de la construcción con restos de varilla de hierro de $\frac{1}{2}$ " , y el único material requerido son un anillo de acero de 15mm. de diámetro, masilla, alambre de amarrar y un cabo de neumático de hule . La manguera hule para el ducto de ventilación se puede usar repetidas veces. En el extremo de tensión todos los accesorios tienen varios usos y las únicas piezas que se pierden en el concreto con cada cable son la pieza de hierro fundido y el cono metálico. Se ve claramente la sencillez de los anclajes y la economía que representa en el costo. No se requieren conos de concreto caros, placas o cuñas de acero, etc. que se emplean en número de 2 por cable y que tienen exclusivamente un sólo uso. -

Los aparatos empleados para el tensado de los cables y la inyección de la lechada son muy simples en su construcción y casi no requieren mantenimiento. La gata que pesa sólo 11kg. puede ser manejada con facilidad por un solo hombre y los alambres se sujetan simultáneamente con un tornillo facilitando la operación de tensado. Tampoco esta operación requiere por su sencillez operarios especializados. La lectura de la elongación del alambre se lee directamente de una escala grabada en el pistón de la gata y se verifica fácilmente con la lectura del manómetro. -

La sencillez en su ejecución y la economía de este sistema representan ventajas importantes, que han hecho posible incluir

el concreto pre-esforzado como nuevo método de construcción en los pro
gramas de trabajo de las empresas y dependencias nacionales. -

El Sistema BAUR- LEONHARDT.

3.3 Generalidades.

Este sistema se distingue especialmente por sus cables concentrados con capacidades de fuerza de tensión de varios cientos de toneladas. Como acero se emplean alambres lisos de aproximadamente 5mm. a 8 mm. de diámetro, o más comúnmente, torones (cables) formados por 7 alambres de 2.5 a 3.5mm. de diámetro. Los torones se colocan en ductos de metal rectangulares y se disponen en varias capas horizontales. El número de alambres o torones varía de acuerdo con la capacidad del cable y es de 200 o más alambres. La distancia entre alambres se mantiene por medio de separadores de hojalata (fig. 16) que proveen el espacio para la inyección de la lechada y ordenan los torones. -

En los extremos, los cables se anclan pasando los torones alrededor de bloques de concreto móviles (fig. 17-18). La fuerza de tensión se aplica mediante gatas hidráulicas, que se colocan en nichos o en espacios entre el block y la estructura propiamente (fig. 18). Las gatas desplazan el block hacia afuera, estirando los alambres y comprimiendo de esta manera el concreto. -

La fuerza de tensión se puede aplicar desde ambos extremos, colocando en cada lado un block de tensión, lo cual se acostumbra para vigas continuas. En puentes simples de un tramo se tensa generalmente sólo desde un extremo; en el otro los cables se anclan por medio de lazos alrededor de blocks de concreto fijos. -

El número de los blocks y de las gatas depende prin

FRANZ SAUTER F.

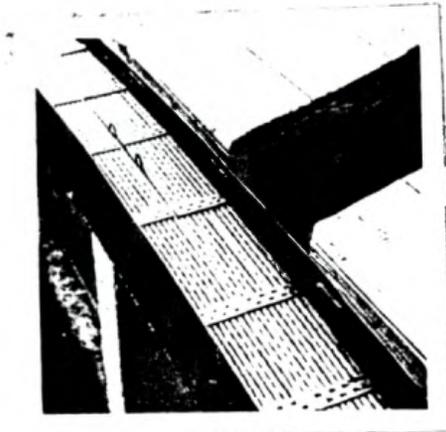


Fig. 16.

Torones de alambre dispuestos en un ducto de metal. Separadores de hojalata mantienen la distancia entre alambres.
(Sistema Baur-Leonhardt)

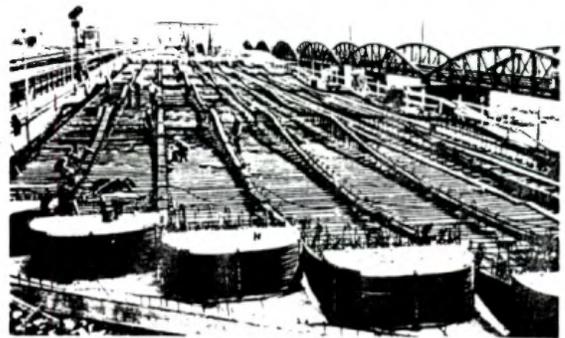


Fig. 17.

Cables continuos para un puente de ferrocarril. Los alambres se pasan alrededor de los blocks de concreto en los extremos.

(Sistema Baur-Leonhardt)

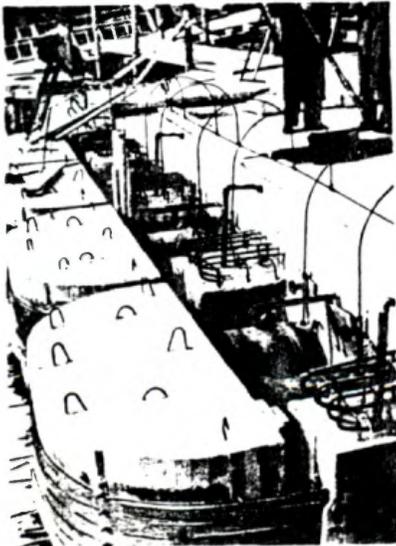


Fig. 18.

Las gatas se colocan en espacios entre el block y la estructura y se tensan simultáneamente en una operación.

principalmente de las consideraciones constructivas y económicas, de la capacidad de los cables y del sistema estructural. Así se han hecho obras con un solo block para anclar una fuerza de 3600 toneladas y en otras ocasiones esta misma fuerza se ancló por medio de 10 blocks de 360 toneladas cada uno. Las gatas empleadas son para fuerzas de 200 a 500 toneladas y su número varía entre 2 y 10 o más. -

Los torones están formados por 7 alambres de 2.5 a 3.5 mm. de diámetro estirados en frío y con límites de ruptura de 180kg / mm.² y más. Estos torones presentan diversas propiedades favorables, siendo poco susceptibles al manipuleo durante su colocación, y se suministran en carruchas en longitudes hasta de 20,000mts. También se emplean alambres de diámetro 5 - 8mm. con resistencias a la ruptura de 140 - 160kg / mm². estirados en frío o laminados en caliente. Últimamente estos alambres se suministran también en longitudes considerables. -

Los ductos metálicos son de forma U, abiertos en su parte superior y se soportan en la formaleta sobre estribos fuertes de acero o blocks de concreto. La dimensión del ducto depende del número de torones, pero puede ser de aproximadamente 15x15cm. Los torones se colocan en los ductos a todo lo largo del cable, se hacen pasar alrededor del block de anclaje en forma de lazo, se regresan por el cable adyacente hasta el otro extremo y así sucesivamente se colocan en forma continua, alrededor de los 2 blocks extremos. Los extremos libres de los alambres se introducen en perforaciones en el block, que luego se llenan de concreto y se anclan por adherencia. -

Este sistema requiere, desde luego, alambres o to

rcnes suministrados en longitudes muy grandes. Una vez colocados los a lambres, el ducto se sella soldando la tapa superior. -

Los cables se adaptan a la forma de la línea de momentos y siguen una línea poligonal, compuesta por secciones rectas. - Los quiebres de la línea poligonal se redondean con pequeñas secciones curvas, donde se colocan entre el cable y la pared del ducto 2 placas de acero con una capa intermedia de parafina. Al tensar, el cable se apoya sobre las placas de acero, que debido a la capa lubricante, presentan me nor fricción al deslizarse el cable. En las secciones rectas el cable no tiene contacto con las paredes del ducto. Este dispositivo sencillo reduce considerablemente las pérdidas por fricción, permitiendo pretensar con este sistema vigas continuas sobre varios tramos (fig. 17). -

Los blocks de anclaje en los extremos se colocan sobre una superficie lisa de concreto lubricada, por ejemplo con asfalto, para permitir el movimiento del block. Los blocks, que son de concreto armado pueden prefabricarse o se hacen en el mismo sitio. Las gatas se conectan mediante una tubería de presión común a una hidráulica, operada con motor eléctrico con suficiente capacidad para tensar toda la estruc tura simultáneamente en una sola operación. Después del tensado el espa cio entre el block y la estructura se llena con concreto y las gatas se re tiran. Los cables se inyectan posteriormente con lechada de cemento para producir la adherencia entre el acero y el concreto. -

3.4 Ventajas del Sistema.

Las ventajas especiales del sistema se pueden resu

mir en la siguiente forma:

1. -Ejecución sencilla. La colocación de un cable re quiere menor trabajo que el correspondiente armado de una estructura de concreto convencional. -

2. -En comparación con sistemas de concreto pre - esforzado, que emplean un número grande de cables con capacidades me nores de sólo 25-50 toneladas, el tiempo requerido para colocar un sólo cable concentrado es menor. -

3. -Los medios para anclar las grandes fuerzas de tensión son sumamente sencillos y se realizan mediante blocks de concre to y lazos formados por el propio alambre . -

4. -El empleo de dispositivos especiales para dismi nuir la fricción, permite pretensar en una sola operación puentes con cables continuos hasta sobre 7 tramos, sin necesidad de traslapar o empa - tar los cables. -

5. -La operación de tensado se realiza simultánea - mente para toda la estructura, economizando tiempo y mano de obra. -

6. -Un solo cable requiere menos campo en la sec - ción de concreto, que muchos cables pequeños, permitiendo usar concre - tos más espesos. Además el chequeo de la posición exacta de un solo ca - ble es más sencilla y eficiente, que para varios cables. -

Capítulo IV.

Consideraciones y Detalles Constructivos.

Sistema Estructural del Balcón para el Cine REX

4.1 Descripción General del Sistema Estructural.

Para dar al nuevo edificio del Cine Rex una capacidad adicional de 486 espectadores, se proyectó la construcción de un balcón, que se extiende a todo el ancho de la sala de proyección y que tiene un voladizo de 11.50 m. La estructura para soportar este balcón presentaba por su magnitud diversos problemas tanto en el diseño, como en la construcción. La empresa Arguedas-Dobles-Soto, a cargo del planeamiento general de la obra, presentó un diseño en el cual la estructura principal consistía de 4 vigas de concreto armado en voladizo empotradas en las columnas y formando, junto con la placa de cimentación, un marco de concreto en forma de \square . Las dimensiones de estos miembros resultaban incompatibles con el aspecto arquitectónico y requerían una cantidad considerable de acero y de concreto. Para dar una idea general del volumen de estos materiales, se da a continuación algunos datos y dimensiones de los marcos:

Viga en voladizo:

dimensión de la sección de empotramiento: 1.00.x 1.50m.
cantidad de varillas de acero: 58 varillas No. 9

Columna del marco:

Sección circular: 1.50 m. de diámetro
144 varillas No. 11
estribos: espiral de varilla No. 5 cada 3 pulgadas.

Materiales:

Concreto : 280 kg/cm² al cilindro (4000 lb/pulg²)
Acero : Billet Street bars of intermediate grade
1700 kg/cm² (Fs = 24 000 lb/pulg²)

Volúmen total de materiales, sin incluir los cimientos:

Concreto: 138 m³.

Acero : 1149 quintales

Del diseño preliminar de la fundación resultaron placas de 7.50 m. de longitud, 3.00 m. de ancho y una altura de 1.50 m., que fueran capaces de transmitir los grandes momentos de las columnas al suelo. Esto representaba un volúmen adicional de concreto de 108 m³.

La firma Pretensora de Concreto S. A. propuso a su vez ejecutar los marcos mencionados en concreto pre-esforzado, postensando las vigas en voladizo y las columnas con cables del sistema LEOBA. El diseño correspondiente arrojó los siguientes datos:

Volúmen de concreto 450kg/cm ² al cubo (5200 lb/pulg. ² al cilindro) :	42.0 m ³ .
Acero de pretensión :	76.0 quintales
Acero convencional :	72.0 quintales

La economía obtenida mediante este sistema se estimó en aproximadamente \$15,000. - para los 4 marcos. -

Este proyecto se cambió, sin embargo, a proposición del Doctor Ing. Fritz Leonhardt, consultor especial de la Pretensora en Alemania, por una nueva solución más económica para el sistema estructural del balcón, que consistía en la construcción de una viga de concre-

to pre-esforzado de 27.50 m. de luz en sentido transversal a la longitud del cine y apoyado en dos columnas laterales. Esta solución se aceptó definitivamente, tomando en consideración la economía en materiales y mano de obra que representaba y por simplificar enormemente la ejecución de la misma. -

Los cálculos y planos de esta obra estuvieron a mi cargo y fueron revisados cuidadosamente y aprobados por el Doctor Leonhardt y constituyen la base para el tema de los capítulos siguientes en los cuales he tratado de dar un resumen de las consideraciones necesarias para el diseño y la ejecución de una estructura de concreto pre-esforzado.

En el corte longitudinal de la lámina 10 se aprecia la forma general de la estructura del balcón, a igual que la posición de la viga; para poder dar suficiente altura a la misma, ésta se colocó retirada del extremo libre del volado. La sección de la viga es hueca (box girder) con una altura de 2.00 m. y 2.30 m. de ancho. Las paredes del cajón son de 35 cm. de espesor y las alas inferior y superior tienen únicamente un grueso de 20 cm. . Para las cargas en consideración y la luz total de 27.50 m. , esto representa una sección relativamente esbelta, sólo posible gracias a la precompresión del concreto . Para la pretensión se emplearon 40 cables LEOBA con una fuerza total de 1185 toneladas métricas, cada uno con 12 alambres de 5.4 mm. de diámetro. - La viga está soportada en dos columnas laterales de 2.30x0.60m de sección ocultas en la pared. -

El piso de los asientos delanteros es una losa reforzada en sentido paralelo a la viga postensada y se apoya sobre vigas de con-

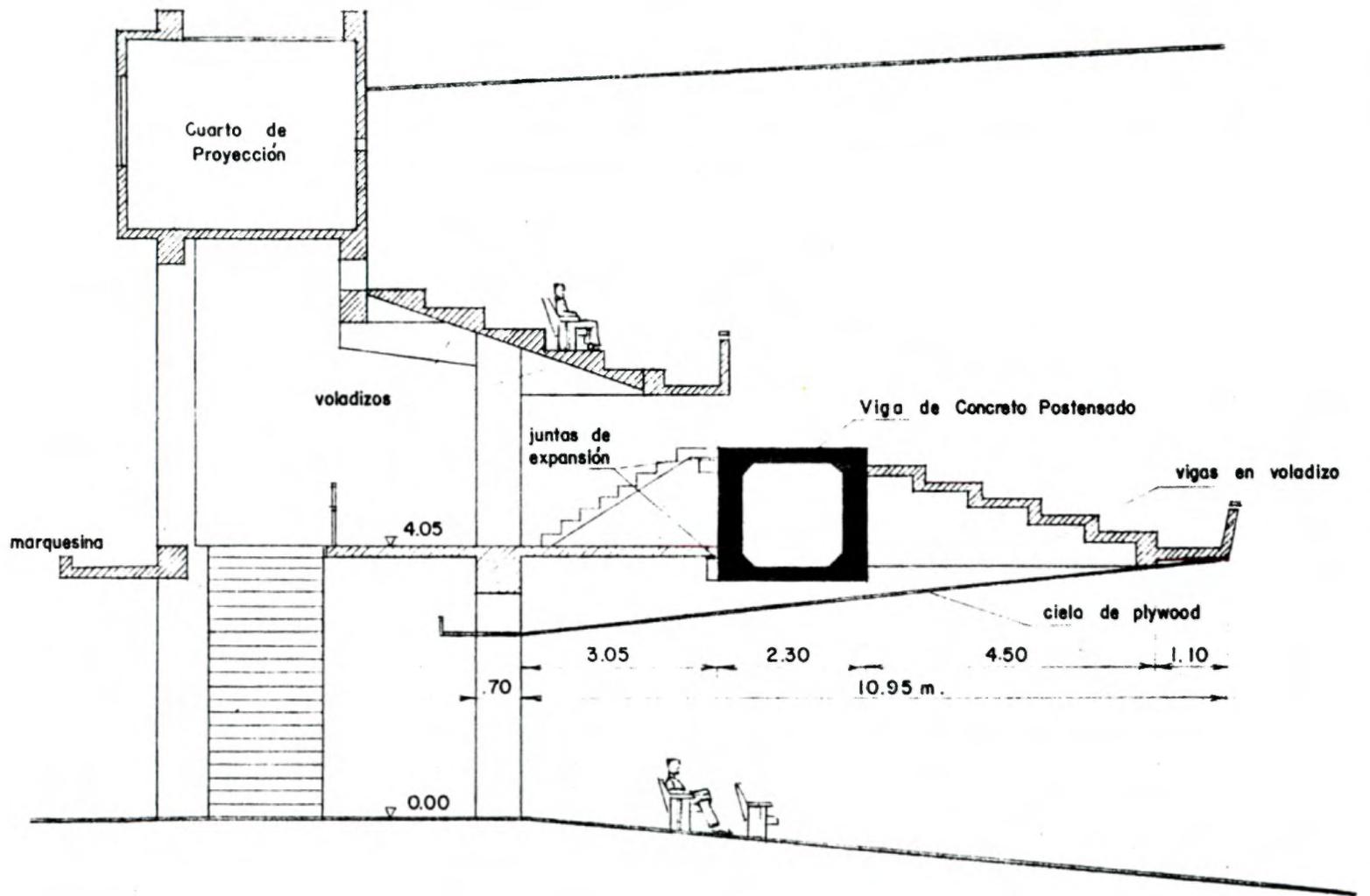


Fig. 19

Corte Transversal del Balcón del CINE REX.

creto armado con un voladizo de 5.75 m. , empotradas en la sección del box-girder; éste transmite la torsión de los volados por medio de las columnas , a la fundación. -

La parte superior del balcón es una estructura independiente de la viga y se soporta por medio de vigas en voladizo sobre columnas de concreto armado. También las escaleras de acceso y la losa de piso en el lado Este se apoyan simplemente y no tienen conexión rígida con la viga; de esta manera se logró una mayor independencia entre las dos estructuras. -

4.2 La Torsión - Forma de la Sección.

Una forma posiblemente más económica de transmitir los momentos debidos a los voladizos, hubiese sido continuar estas vigas hasta las columnas posteriores y anclarlas a éstas por medio de una articulación .Sin embargo, la distribución arquitectónica no permitía atravesar con vigas de concreto los servicios sanitarios y las áreas de bodega, que se encuentran junto a la viga postensada. Además el Doctor Leonhardt manifestó sus dudas respecto a la seguridad de este tipo de anclaje y recomendó empotrar los voladizos en la sección de concreto para transmitir la torsión hacia las columnas laterales. -

Los voladizos penetran en la sección de la viga y forman un diafragma atravesado por una pequeña ventanilla de inspección de 70 x 70 cm. La sección más eficiente para transmitir la torsión , a excepción de la circular o rectangular, que no convenían en este caso, es la sección hueca (en forma de cajón), que tiene gran rigidez para absorer

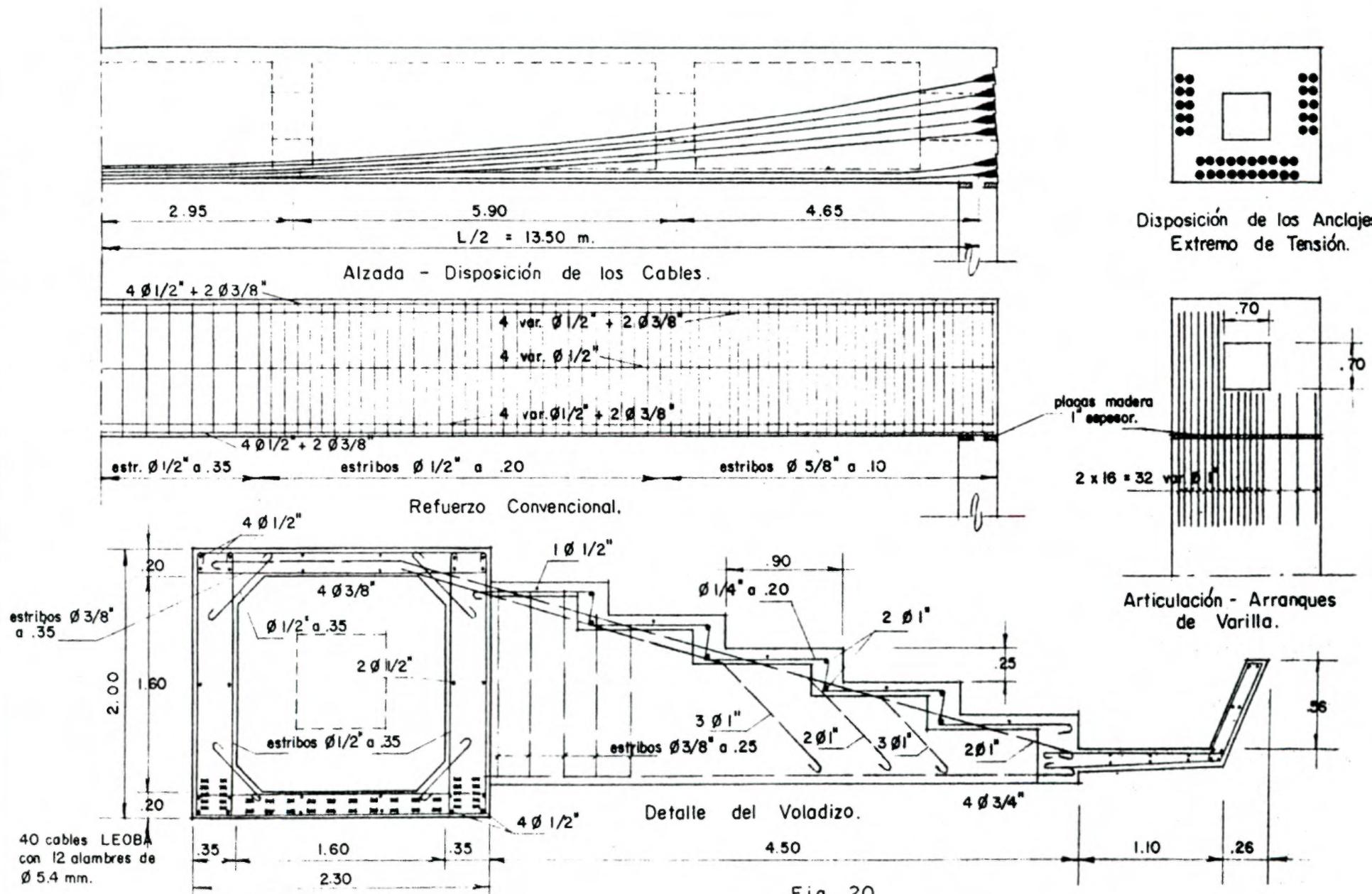


Fig. 20

ber momentos transversales y además por su forma constituye la sección más económica en flexión. -

Para hacer más uniforme la distribución de esfuerzos en las esquinas interiores del cajón donde los esfuerzos cortantes de torsión alcanzan teóricamente un valor infinito se formaron ochavos de 20 cms. para evitar estas concentraciones de esfuerzos. -

Los esfuerzos diagonales de tensión provenientes de la torsión y de las fuerzas cortantes, se absorben por medio de estribos de varilla. Debido a los altos esfuerzos de precompresión a que está sometida la viga, estos esfuerzos principales de tensión se reducen considerablemente y la inclinación de los mismos respecto a la vertical es pequeña. -

Esto permitió el uso de estribos verticales, evitando la colocación de aros en forma de espiral cerrada, que requiere una cantidad considerable de acero y mano de obra costosa. -

Debido a la fuerza de precompresión y, como lo veremos enseguida, debido a la curvatura de los cables, se obtuvo una gran economía en la cantidad de hierro necesaria para los estribos, y además se logró por este medio simplificar la colocación del refuerzo. -

La torsión se transmite a las columnas por simple adherencia mediante varillas de acero que pasan a través de la articulación; ésta permite el giro en el sentido de la viga y en cambio, perpendicular a la misma, provee el empotramiento necesario para coger los momentos de torsión. -

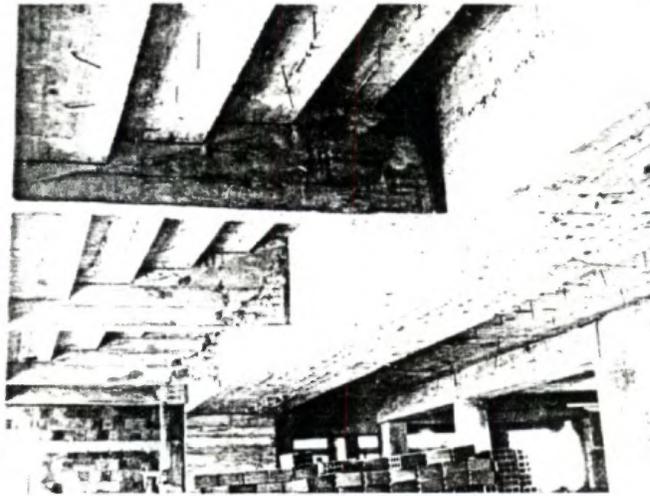


Fig. 21.

Vista inferior del Balcón .

En la fotografía se pueden observar las vigas en voladizo que nacen de la viga postensada y que soportan la losa del piso. -

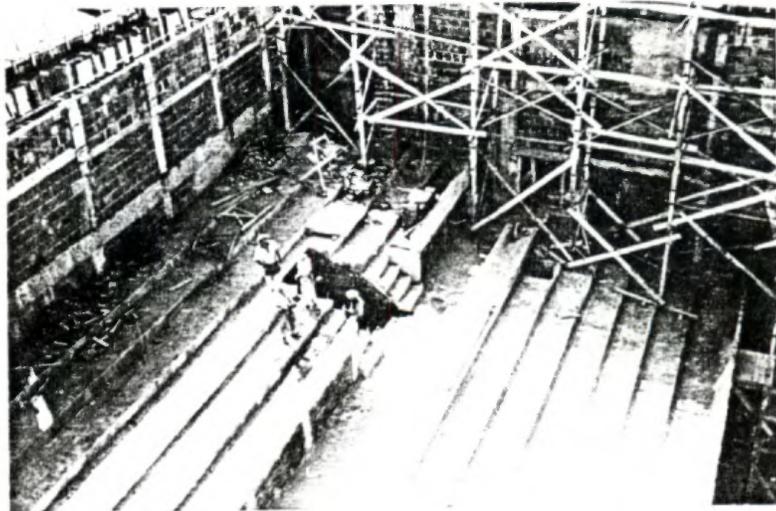


Fig. 22.

Vista superior del Balcón terminado.

4.3 Disposición de los Cables.

Los cables de postensión se disponen generalmente siguiendo una curva parabólica. Esto se hace con el objeto de colocar el cable en el centro de la viga con la mayor excentricidad posible y en cambio en los extremos, donde no hay momentos, anclarlos con su centroide aproximadamente a altura del centro de gravedad de la sección. Además esta forma curva permite absorber parte de los esfuerzos cortantes debidos a las cargas verticales. Después de endurecido el concreto, se tensan los cables, que tienden a enderezarse ejerciendo una reacción negativa sobre el concreto, que es uniforme a lo largo de toda la viga para el caso de cables parabólicos, y se opone directamente a las cargas verticales. El esfuerzo cortante neto resultante se obtiene de la resta de las dos cantidades debidas a las cargas exteriores y a la fuerza de pretensión. De aquí se observa que los cables tienen doble objeto: eliminar esfuerzos de tensión debidos a la flexión y disminuir los esfuerzos cortantes. -

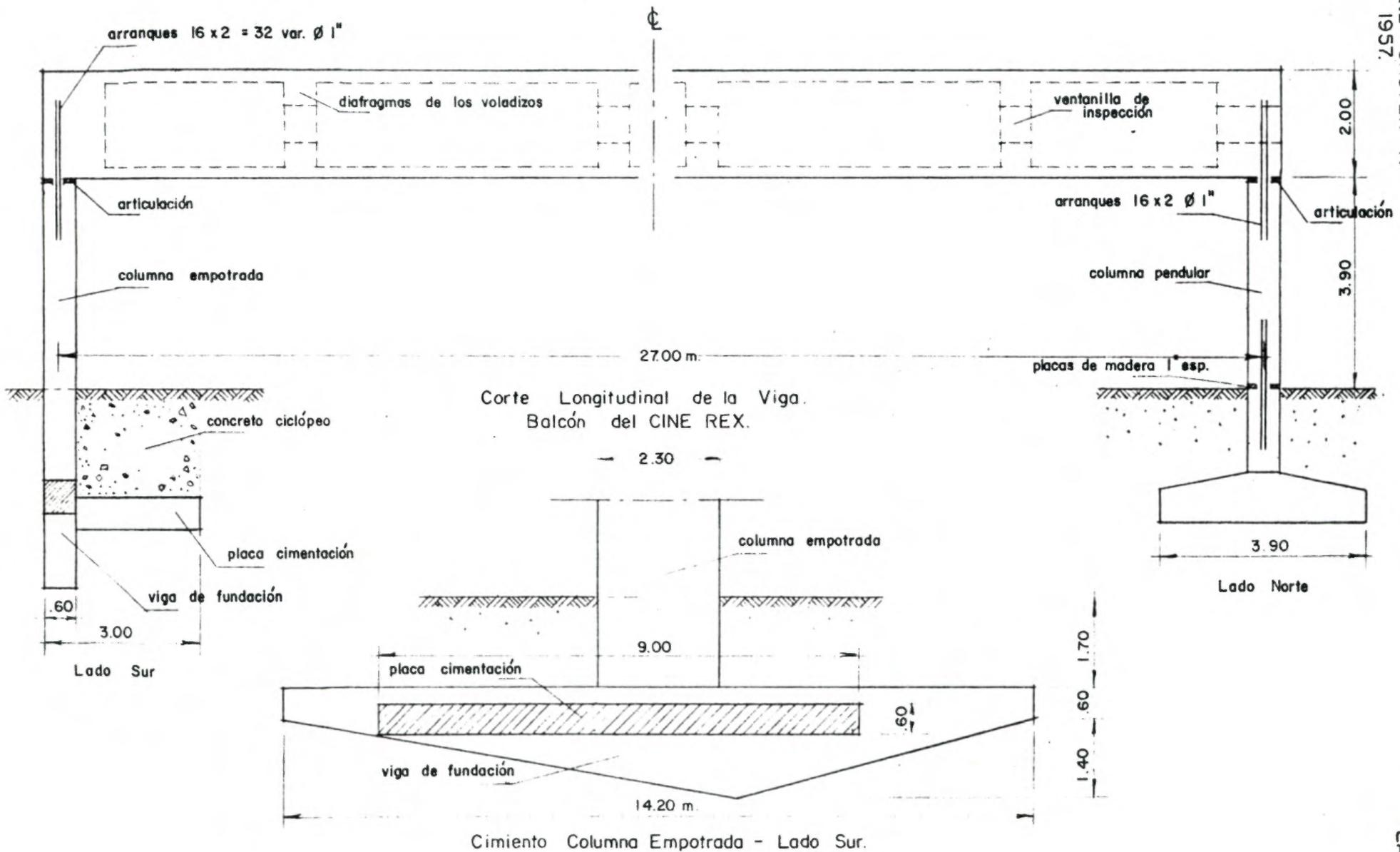
Con este propósito de reducir los esfuerzos cortantes, se tratará de disponer cada vez el mayor número de cables en forma parabólica, Sin embargo, para permitir espacio suficiente para el vibrador durante el vaciado del concreto, se colocaron en cada nervio de la viga solamente 10 cables, que se llevaron parabólicamente hasta los extremos. Los 20 cables restantes se colocaron en el ala inferior de la sección y se condujeron en línea recta a lo largo de la viga. -

4.4. Deformaciones Elásticas y Plásticas-Articulaciones

En concreto pre-esforzado debemos siempre contar con una deformación elástica inicial de la estructura, que se sucede al precomprimir el concreto endurecido. Además en el curso del tiempo estas deformaciones aumentan debido a los efectos del flujo plástico y retracción del concreto alcanzando valores que pueden ser 2 a 4 veces mayores que la deformación elástica. En este tipo de obras debemos por lo tanto proveer a la estructura los medios necesarios para deformarse libremente sin restricción. En vigas simples esto se realiza disponiendo en un extremo algún tipo de apoyo movable o construyendo una columna pendular con dos articulaciones en la parte inferior y superior. - Por esta razón se construyó una columna lateral articulada para permitir las contracciones debidas a cambios de temperatura y a los fenómenos plásticos. Esta columna se independizó además de la propia pared con juntas de expansión y la loza del volado se apoyó, separada de la pared, sobre una viga en voladizo en este extremo. En cambio, en el otro extremo la columna está empotrada a la placa de fundación para resistir las fuerzas horizontales de temblor. -

Las articulaciones se proyectaron del tipo simple con placas de madera suave, que restringen el ancho de la sección de concreto a 20 cm. , haciendo pasar aquí solamente cabos de varilla de hierro, los que se pasaron en suficiente número para transmitir por adherencia la torsión en el sentido transversal. -

Las varillas de $1\frac{1}{4}$ " de diámetro van dispuestas en dos hileras y de tal manera que no interfieren con los anclajes. Este tipo de arti



Corte Longitudinal de la Viga.
Balcón del CINE REX.

Cimiento Columna Empotrada - Lado Sur.

Fig 23

culación, empleado principalmente en Alemania, ha demostrado permitir un grado de giro suficiente para considerarlo teóricamente como apoyo simple. -

4.5 Fundación de las Columnas.

La columna pendular transmite a la placa de cimentación únicamente fuerzas normales y está centrada respecto a la misma.

La placa se diseñó para esfuerzos directos y sólo en el sentido perpendicular a la viga debe soportar los momentos de torsión. En el otro extremo se construyó la columna empotrada en el cimiento, que es una placa excéntrica y que debe resistir las fuerzas horizontales y momentos debidos al temblor, y además absorber los momentos de torsión. La fuerza de temblor se consideró actuando en los sentidos más desfavorables : en sentido perpendicular a la viga la torsión se combina con el efecto de temblor; en este sentido se construyó una viga de fundación de sección variable de 14 mts. de longitud y 0.60 m. de ancho, que resiste estos momentos. - Para distribuir las cargas verticales uniformemente sobre el suelo, se diseñó una placa de 3.00 x 9.00mts., sobre la cual se colocó un relleno de concreto ciclópeo, que sirve de contrapeso para evitar el vuelco del cimiento hacia afuera. Esta placa arranca de la viga de fundación y va conectada rígidamente a la misma. De acuerdo con los estudios realizados por el Ingeniero Max Sittenfield se obtuvo un valor de 3.90 kg/cm^2 . (8000 lb/pie^2). para el esfuerzo permisible en el suelo, que es un valor relativamene alto y que permitió un diseño económico de las fundaciones. -

Capítulo V.

Consideraciones para el Diseño.

Diseño de la Viga Postensada para el Balcón del

CINE REX .

5.1 Generalidades y Asunciones.

El diseño del box-girder para el balcón del Cine Rex se hizo de acuerdo con las Normas Alemanas para Concreto Pre-esforzado DIN 4227 en lo concerniente al postensado del concreto. De esta manera se quiso aprovechar las experiencias obtenidas en Europa en la aplicación de este tipo de obras, cuyo resultado son estas normas. Los demás miembros de la estructura se diseñaron de acuerdo con las especificaciones del A. C. I., siguiendo la práctica establecida en Costa Rica. -

Los valores para los esfuerzos permisibles en el acero y concreto se obtuvieron de las tablas correspondientes del DIN 4227, a igual que los coeficientes para el cálculo del flujo plástico y retracción los módulos de elasticidad para el concreto y el acero etc. -

Como base para el diseño se asumió pretensión parcial, es decir, se permitían esfuerzos de tensión para el estado de carga final bajo momento máximo total, los cuales no debían exceder el esfuerzo permisible de tensión. Esta asunción permitió aumentar los valores para

los esfuerzos diagonales permisibles, lo que trajo por consecuencia un diseño más económico de la sección y del refuerzo de estribos; sin embargo, como se verá más adelante, no sucedían para ningún estado de carga tensiones en las fibras inferior o superior, permaneciendo la sección sometida a una compresión permanente y exenta de grietas. La pretensión parcial se puede aplicar en términos generales a estructuras cuya carga viva total probablemente no sucederá del todo o solamente en casos muy contados; también se asume para estructuras con carga estática y que no están expuestas a condiciones climáticas severas. -

Para todas aquellas aéreas con asientos fijos se asumió una carga viva de $400 \text{ kg} / \text{m}^2$ ($80 \text{ lb} / \text{pie}^2$); pasillos, escalesras, etc. se consideraron cargados con $500 \text{ kg} / \text{m}^2$ ($100 \text{ lb} / \text{pie}^2$). El efecto del temblor se consideró con una fuerza horizontal de $1/20 g$ actuando en el centro de gravedad de los miembros. -

El tipo de concreto asumido en el cálculo fue un concreto B 300 según el DIN 4227; esta designación denota una resistencia al cubo (20 cm. de lado) de $300 \text{ kg} / \text{cm}^2$. y corresponde aproximadamente a $3500 \text{ lb} / \text{pulg}^2$, medido en cilindros de 6×12 ", y es la resistencia menor que las normas alemanas permiten para miembros de concreto pre-esforzado. Para las demás partes de la estructura, tales como voladizos, columnas y cimientos se exigió una resistencia mínima de $3000 \text{ lb} / \text{pulg}^2$.

El acero para los cables de postensión, con una resistencia mínima garantizada a la ruptura de $180 \text{ kg} / \text{mm}^2$. ($256,000 \text{ lb} / \text{pulg}^2$), se tensó a un esfuerzo inicial de $108 \text{ kg} / \text{mm}^2$. ($154,000 \text{ lb} / \text{pulg}^2$); este es

Diseño de la Viga para el Balcón del
CINE REX.

1.- CARGAS:

Carga viva: área de asientos : 400 kg/m^2 (80 lb./pie^2)
pasillos y escaleras: 500 kg/m^2 (100 lb./pie^2)

2.- MATERIALES:

Concreto: B 300 - 300 kg/cm^2 de resistencia en cubos de 20 cm. de lado. =
aprox. 3500 lb/pulg.^2 en cilindros de $6" \times 12"$.

Acero de pretensión: ST. 160/180 - limite de fluencia : 160 kg/mm^2
esfuerzo ruptura : $180 \text{ kg/mm}^2 = 256,000 \text{ lb/pulg.}^2$

Refuerzo convencional: Steel of intermediate grade.

Cables : Sistema LEOBA con 12 alambres de $\varnothing 5.4 \text{ mm}$.

3.- ESFUERZOS PERMISIBLES:

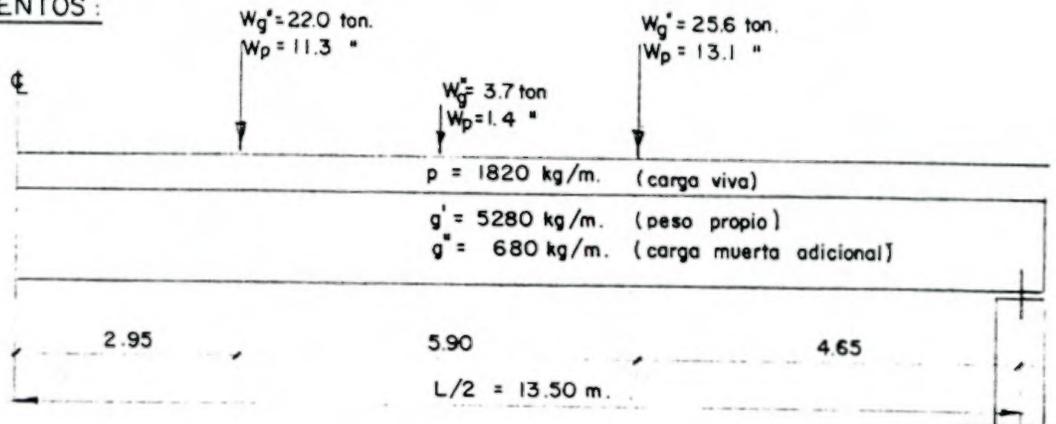
Acero pretensión: $f_e = 0.60 \times S_{rup.} = 108 \text{ kg/mm}^2$

Acero convencional: $f_s = 1400 \text{ kg/cm}^2 \sim 20,000 \text{ lb/pulg.}^2$

Concreto : Compresión estado inicial : -130 kg/cm^2
estado final : -100 kg/cm^2

Tensión : $+30 \text{ kg/cm}^2$

Esfuerzo diagonal : 20 kg/cm^2

4.- MOMENTOS:

Peso propio : $M_{g'}$ = 481.0 ton - m

Carga muerta adicional: $M_{g''}$ = 462.9 ton - m

Carga viva : M_p = 366.5 ton - m

Momento total : M_{g+p} = 1,310.4 ton - m.

$$M_g = M_{g' + g''} = 943.9 \text{ ton-m.}$$

NOTA :

El subíndice g' se refiere al peso propio
" " g'' " " a la carga muerta adicional.
" " g " " a la carga muerta total.
" " p " " a la carga viva

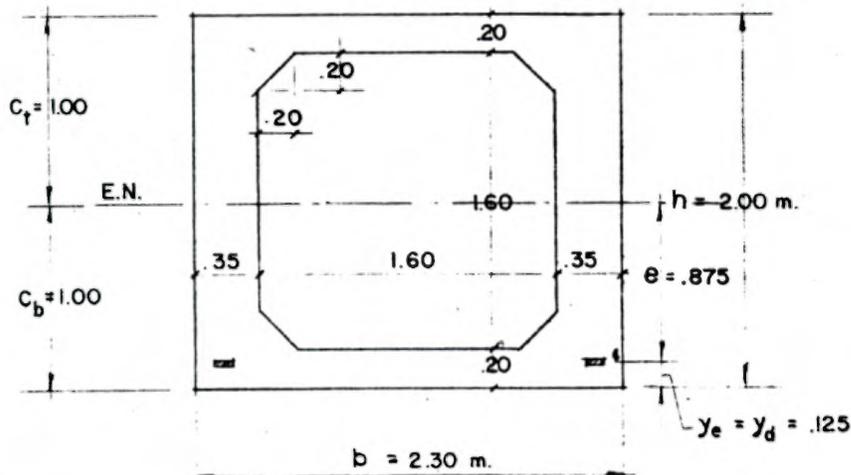
fuerzo corresponde a un 60% de su resistencia a la ruptura y es mayor que el esfuerzo permisible dado por el DIN 4227, que es de un 55 % de la ruptura. Este aumento del esfuerzo permisible en el acero se hizo tomando en consideración los resultados altos obtenidos en las pruebas de laboratorio efectuados por la propia fábrica de acero, y de acuerdo con la práctica del Doctor Leonhardt. -

5.2 Análisis y Diseño de la Sección. -

Con las cargas asumidas y los pesos de los diferentes miembros obtenidos del diseño de la empresa Arguedas - Dobles - Soto, se procedió al análisis de la viga y se calcularon los momentos de flexión y de torsión y los esfuerzos cortantes para el centro y para varias secciones de la viga. El análisis no presentaba ninguna dificultad especial, tratándose de una viga determinada sobre dos apoyos simples.

El diseño de la sección se hizo para la sección más desfavorable al centro de la viga y se comprobaron los esfuerzos para las demás secciones. A continuación mostraremos para ilustración solamente el análisis de la sección central. Con la ayuda de tablas y gráficos dados en forma práctica en el libro del Doctor Leonhardt: "La Práctica del Concreto Pre-esforzado" se hizo un diseño preliminar para obtener las dimensiones de la sección y luego se calculó la fuerza de tensión inicial necesaria y el número de cables. Antes de seguir adelante es preciso verificar si las dimensiones de la sección son suficientes para dar cabida a todos los cables y permitir suficiente espacio para el vibrado y la colocación del concreto y así mismo para la disposición de

5.- VALORES DE SECCION :



NOMENCLATURA :

- h = altura de la viga.
 b = ancho de la viga.
 e = excentricidad de los cables.
 b_o = ancho del nervio.
 y_e = distancia del C.G. de los cables a la fibra interior.
 y_d = distancia del C.G. de los ductos a la fibra inferior.
 A = área
 I = momento de inercia
 Z = módulo de resistencia
 C = distancia del E.N. a las fibras extremas.
 S = esfuerzo

SUBINDICES :

- c para el concreto
 e " el acero de pretensión
 s " el acero de refuerzo convencional
 d " los ductos de los cables
 b " la fibra inferior (bottom)
 t " la fibra superior (top).
 n " los valores netos
 i " los valores ideales

a) VALORES BRUTOS :

$$A_c = (2.30 \times 2.00) - (1.60 \times 1.60) + 4 \left(\frac{1}{2} \times 0.20 \times 0.20 \right) = 2.120 \text{ m}^2$$

$$c_b = c_t = 1.00 \text{ m.}$$

$$I = \frac{2.30(2.00)^3}{12} - \frac{(1.60)^4}{12} + \frac{4(0.20)^2 \times 0.733}{2} = 1.0458 \text{ m}^4 \quad (\text{despreciando el mom. de inercia de los triángulos respecto a su propio cen troide}).$$

$$A_e = 40 \times 12 \times \frac{(5.4)^2 \cdot \pi}{4} = 109.8 \text{ cm}^2 = 0.01098 \text{ m}^2 \quad (\text{área de acero de pretensión}).$$

$$A_d = 40 \times (1.7 \times 3.8) = 258.4 \text{ cm}^2 = 0.02584 \text{ m}^2 \quad (\text{sección de los ductos})$$

b) VALORES NETOS :

$$A_n = A_c - A_d = 2.120 - 0.0258 = 2.0942 \text{ m}^2$$

$$c_{bn} = \frac{A_c c_b - A_d y_d}{A_n} = \frac{2.12 \times 1.00 - 0.0258 \times 0.125}{2.0942} = 1.0107 \text{ m.} \quad c_{tn} = 0.9893 \text{ m.}$$

$$I_n = I + A_c (c_{bn} - c_b)^2 - A_d (c_{bn} - c_d)^2 = 1.0458 + 2.12 \cdot (1.0107 - 1.00)^2 - 0.0258 \cdot (1.0107 - 0.125)^2 = 1.0257 \text{ m}^4$$

$$Z_{bn} = \frac{I_n}{c_{bn}} = \frac{1.0257}{1.0107} = 1.0148 \text{ m}^3$$

$$Z_{tn} = \frac{I_n}{c_{tn}} = \frac{1.0257}{0.9893} = 1.0367 \text{ m}^3$$

los anclajes en los extremos . Luego se calcula la posición del centro de gravedad del acero de pretensión y su excentricidad respecto al eje neutro de la sección,

Se calculan a continuación los valores del área, posición del eje neutro, momento de inercia y módulo de resistencia para la sección bruta, sin considerar las áreas de los ductos o las áreas de acero de los cables . Para vigas corrientes se puede continuar el análisis con estos valores brutos. Se recomienda, sin embargo, calcular los valores netos e ideales, cuando el área total de acero es mayor que un 1% del concreto, o los esfuerzos de trabajo exceden un 60% de los esfuerzos permisibles. -

Los valores netos se obtienen restando a la sección de concreto las áreas de los ductos de los cables, sin considerar adherencia entre concreto y acero. Estos valores se emplean en el cálculo de todos los estados de carga, que suceden antes de la inyección de los cables, es decir, para el peso propio de la viga, para la precompresión, etc. -

Los valores ideales se obtienen con la sección de concreto más $(n - 1)$ veces el área de acero de pretensión, considerando adherencia, y se emplean para todos los casos de carga posteriores a la inyección, tales como la carga viva y la parte de peso muerto, que se aplica después de efectuar la adherencia. Para los valores netos e ideales no se considera, sin embargo, la influencia del hierro de refuerzo convencional y de temperatura. -

Los esfuerzos en las fibras inferior y superior se calculan por separado para cada estado de carga y se ordenan en forma de tabla.

c) VALORES IDEALES :

$$A_i = A_c + A_e \cdot (n-1) = 2.120 + 0.01098 (6.7-1) = 2.1826 \text{ m}^2$$

$$C_{bi} = \frac{A_c \cdot C_b + (n-1) \cdot A_e \cdot y_e}{A_i} = \frac{2.12 \times 1.00 + (6.7-1) \cdot 0.01098 \times 0.125}{2.1826} = 0.9748 \text{ m.}$$

$$C_{ti} = 1.0252 \text{ m.}$$

$$I_i = I + A_c \cdot (C_{bi} - C_b)^2 + (n-1) \cdot A_e \cdot (C_{bi} - y_e)^2 =$$

$$= 1.0458 + 2.12 (0.9748 - 1.00)^2 + (6.7-1) \times 0.01098 \times (0.9748 - 0.125)^2 = 1.0923 \text{ m}^4$$

$$Z_{bi} = \frac{I_i}{C_{bi}} = \frac{1.0923}{0.9748} = 1.1205 \text{ m}^3$$

$$Z_{ti} = \frac{I_i}{C_{ti}} = \frac{1.0923}{1.0252} = 1.0654 \text{ m}^3$$

6.- ESFUERZOS DE FLEXION :

CARGA VIVA : (p)

$$S_{bp} = + \frac{M_p}{Z_{bi}} = \frac{366.5}{1.1205} = + 327 \text{ ton/m}^2$$

S_{bp} = esfuerzo en fibra inferior (b) debido a carga viva (p)

$$S_{tp} = - \frac{M_p}{Z_{ti}} = \frac{366.5}{1.0654} = - 344 \text{ ton/m}^2$$

S_{tp} = esfuerzo en fibra superior (t) debido a carga viva (p)

PESO PROPIO : (g')

$$S_{bg'} = + \frac{M_{g'}}{Z_{bn}} = \frac{481.0}{1.0148} = + 475 \text{ ton/m}^2$$

$$S_{tg'} = - \frac{M_{g'}}{Z_{tn}} = \frac{481.0}{1.0367} = - 464 \text{ ton/m}^2$$

$$S_{eg'} = + \frac{M_{g'} \cdot e_n}{I_n} = \frac{481(1.0107-0.125)}{1.0257} = + 416 \text{ ton/m}^2$$

$S_{eg'}$ = esfuerzo en el concreto a altura del centroide de los cables debido a peso propio

CARGA MUERTA ADICIONAL : (g'')

$$S_{bg''} = + \frac{M_{g''}}{Z_{bn}} = \frac{462.9}{1.0148} = + 456 \text{ ton/m}^2$$

$$S_{tg''} = - \frac{M_{g''}}{Z_{tn}} = \frac{462.9}{1.0367} = - 446 \text{ ton/m}^2$$

$$S_{eg''} = + \frac{M_{g''} \cdot e_n}{I_n} = \frac{462.9 \cdot (0.8857)}{1.0257} = + 400 \text{ ton/m}^2$$

Esto facilita el cálculo de los esfuerzos para los estados críticos. Vi - mos anteriormente que debemos calcular los esfuerzos que se suceden cuando se aplica la fuerza de pretensión, actuando únicamente el peso propio de la viga . Para este estado resultan compresiones muy altas en la fibra inferior, y en cambio, compresiones pequeñas en la superior, que a veces se convierten en tensiones. La fuerza de tensión para este caso es la fuerza inicial, antes de efectuarse las pérdidas por flujo plástico y retracción. También debemos calcular el estado de carga final, para momento máximo debido a carga muerta y viva, con la fuerza de tensión final es decir después de haber sucedido las pérdidas por flujo plástico y retracción. -

Otros estados de carga, generalmente menos críticos, son también por ejemplo, la carga muerta actuando con la fuerza de pretensión sumados a las pérdidas de tensión, o el momento máximo de carga viva antes de efectuarse las pérdidas de tensión. Estos estados se muestran también en la tabla de la lámina 18 , para ilustración, aunque producen esfuerzos intermedios entre los dos primeros estados de carga. -

Las pérdidas por flujo plástico y retracción se calculan como un estado de carga separado y se estiman con la fórmula 12.10 del libro del Doctor Leonhardt. En esta fórmula se sustituyen los coeficientes plásticos del concreto con los valores recomendados por las normas alemanas, que dependen de la calidad del concreto, del ambiente, del porcentaje de humedad en el aire, de la resistencia del concreto en el instante de tensar, etc. Los esfuerzos que afectan el flujo plástico son los esfuerzos, que se suceden en el concreto a la altura del centroide

FUERZA DE PRECOMPRESION : (F_o)

$$F_o = A_e \times f_e = 109.8 \times 108 \times 100 = 1,185,000 \text{ kg.} = 1,185 \text{ ton.}$$

$$M_f = F_o \times e_n = 1185(1.0107 - 0.125) = 1,049 \text{ ton-m}$$

F_o = fuerza de tensión inicial.

M_f = momento debido a la excentricidad de los cables.

$$S_{bf} = - \frac{F_o}{A_n} - \frac{M_f}{Z_{bn}} = - \frac{1185}{2.0942} - \frac{1049}{1.0148} = - 566 - 1060 = - 1626 \text{ ton/m}^2$$

$$S_{tf} = - \frac{F_o}{A_n} + \frac{M_f}{Z_{tn}} = - \frac{1185}{2.0942} + \frac{1049}{1.0367} = - 566 + 1011 = + 445 \text{ ton/m}^2$$

$$S_{ef} = - \frac{F_o}{A_n} - \frac{M_f \cdot e_n}{I_n} = - \frac{1185}{2.0942} - \frac{1049 \times 0.8857}{1.0257} = - 566 - 906 = - 1472 \text{ ton/m}^2$$

PERDIDAS POR FLUJO PLASTICO Y RETRACCION : (ΔF)

Para el cálculo de las pérdidas de tensión se aplica la siguiente fórmula :

$$\frac{\Delta F}{F_o} = \frac{\epsilon_s \cdot E_e + n \cdot \phi \cdot (S_{eg} + S_{ef})}{n \cdot S_{ef} \cdot (1 + \frac{\phi}{2}) - f_e}$$

Siendo :

ϕ = coeficiente de flujo plastico = 4.0 (para interiores secos, DIN 4227.)

ε_s = " " retracción = -18 x 10⁻⁵ (" " ")

E_e = módulo de elasticidad del acero = 20 x 10⁶ ton/m²

n = relación de módulos = E_e / E_c = 6.7 (para B 300).

f_e = esfuerzo permisible en el acero = 108000 ton/m².

S_{eg} = esfuerzo en el concreto a altura del centroide de los cables debido a carga muerta permanente.

S_{ef} = " " " " " " " " a la fuerza de precompresión.

$$S_{eg} = S_{eg1} + S_{eg2} = + 416 + 400 = + 816 \text{ ton/m}$$

$$S_{ef} = - 1472 \text{ ton/m}^2$$

$$\begin{aligned} \frac{\Delta F}{F_o} &= \frac{-18 \times 10^{-5} \times 20 \times 10^6 + 6.7 \times 4.0 (+816 - 1472)}{6.7 \times (-1472) \cdot (1 + \frac{4.0}{2}) - 108,000} = \\ &= \frac{-3600 - 17,600}{-29,600 - 108,000} = - 0.154 \end{aligned}$$

$$\underline{\Delta F = - 15.4 \%}$$

$$\Delta S_{bf} = - 0.154 \times (- 1626) = + 250 \text{ ton/m}^2$$

$$\Delta S_{tf} = - 0.154 \times (+ 445) = - 69 \text{ ton/m}^2$$

de los cables y que actúan permanentemente, o sea, los esfuerzos debidos a la carga muerta permanente y a la fuerza de pretensión. La carga viva se asume que no influencia el flujo, ya que actúa sólo temporalmente. Si una parte de la carga viva, sin embargo, actúa durante un lapso de tiempo considerable, por ejemplo mercadería almacenada en bodegas, hay que incluirla en el cálculo. -

5.3. Momento de Ruptura. -

En el capítulo I expusimos las razones por las cuales debemos siempre comprobar la seguridad a la ruptura de una viga de concreto pre-esforzado. La viga puede romper de diferentes maneras:

1. -) El acero alcanza su resistencia de ruptura antes que la resistencia en la zona de compresión se agote y la sección falla por ruptura de los cables. -

2. -) La elongación del acero hace que la línea neutra se desplace hacia arriba disminuyendo la zona de compresión, la que finalmente falla por compresión. -

3. -) La zona de compresión es débil comparada con la resistencia del acero y falla antes que éste alcance su límite de fluencia (yield-point). -

Debemos calcular el modo de ruptura probable para la sección y calcular el momento máximo, que la sección puede resistir; éste debe ser mayor que el momento máximo bajo carga útil. Las normas especifican que para secciones, que fallan por deficiencia del acero, el momento de ruptura debe ser 1.75 veces mayor que M_{g+p} . Siendo

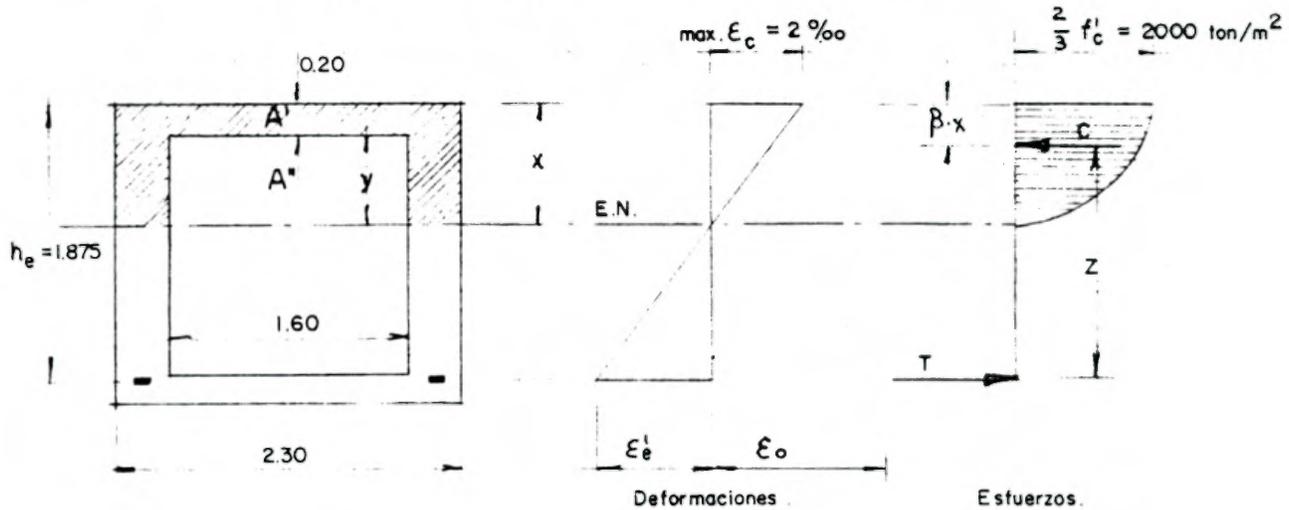
TABLA DE ESFUERZOS.

	Fibra Inferior	Fibra Superior
Carga viva - p	+ 327	- 344
Peso propio - g'	+ 475	- 464
Carga muerta adicional - g''	+ 456	- 446
Fuerza de precompresión - F _o	- 1626	+ 445
Pérdidas de tensión - ΔS	+ 250	- 69
g' + F_o	- 1151	- 19
g' + g'' + p + F_o + ΔS	- 118	- 878
g' + g'' + F_o + ΔS	- 574	- 432
g' + g'' + p + F_o	- 368	- 809

≠ 1300
≠ 1000

7.- MOMENTO DE RUPTURA.

$$\text{min. } M_{rup} = 1.75 \times M_{g+p} = 1.75 \times 1,310.4 = 2,293.2 \text{ ton-m}$$



$$M_{rup} = C \times z = T \times z$$

$$T = A_e \times s_e = A_e \times (E_e \times \epsilon_e)$$

$$\epsilon_e = \epsilon_e' + \epsilon_o$$

ϵ_o = elongación inicial del acero

$$D = \alpha_1 \cdot \frac{2}{3} \cdot f'_c \cdot A' - \alpha_2 \cdot \frac{2}{3} f_c A''$$

$$\epsilon_o = \frac{108,000 \times 0.846}{20 \times 10^6} = 4.57\%$$

El coeficiente α expresa el area de la parábola del diagrama de esfuerzos y se obtiene de los diagramas de Mörsch. Varía de acuerdo con la deformación del concreto. El coeficiente β fija la posición de la resultante de compresión.

$$D = \alpha_1 \cdot \frac{2}{3} \cdot 3000 \times 2.30 \cdot x - \alpha_2 \cdot \frac{2}{3} \cdot 3000 \times 1.60 \cdot y$$

Para varios valores de X se plotean los valores correspondientes de C y T, los que se unen con una línea suave. Donde se cortan las líneas: C = T y se obtiene el valor de X.

Linea	X	Y	ϵ_b ‰	α_1	α_2	C'	C''	C C ₁ - C ₂	ϵ_0 ‰	ϵ'_e	ϵ_e	T
1	0.535	0.335	1.25	0.69	0.59	1700	633	1067	4.57	5.00	9.59	2090
2	0.650	0.450	1.39	0.69	0.61	2062	879	1183	4.57	3.80	8.37	1825
3	0.800	0.600	1.50	0.69	0.62	2540	1190	1350	4.57	2.72	7.29	1590
4	1.000	0.800	1.60	0.69	0.64	3175	1638	1537	4.57	1.77	6.34	1381
T = C	0.920	0.720	1.58	0.69	0.64	2920	1475	1445	4.57	2.10	6.67	1445

Para $X = 0.92$ m. $y = 0.72$ m.
 $T = C = 1445$ ton.
 $\max \epsilon_b = 2.0$ ‰ $\epsilon_b = 1.58$ ‰
 $C' = 0.69 \cdot \frac{2}{3} \cdot 3000 \cdot 2.30 \cdot 0.92 = 2920$
 $C'' = 0.64 \cdot \frac{2}{3} \cdot 3000 \cdot 1.60 \cdot 0.72 = 1475$
 $C = 1445$ ton.

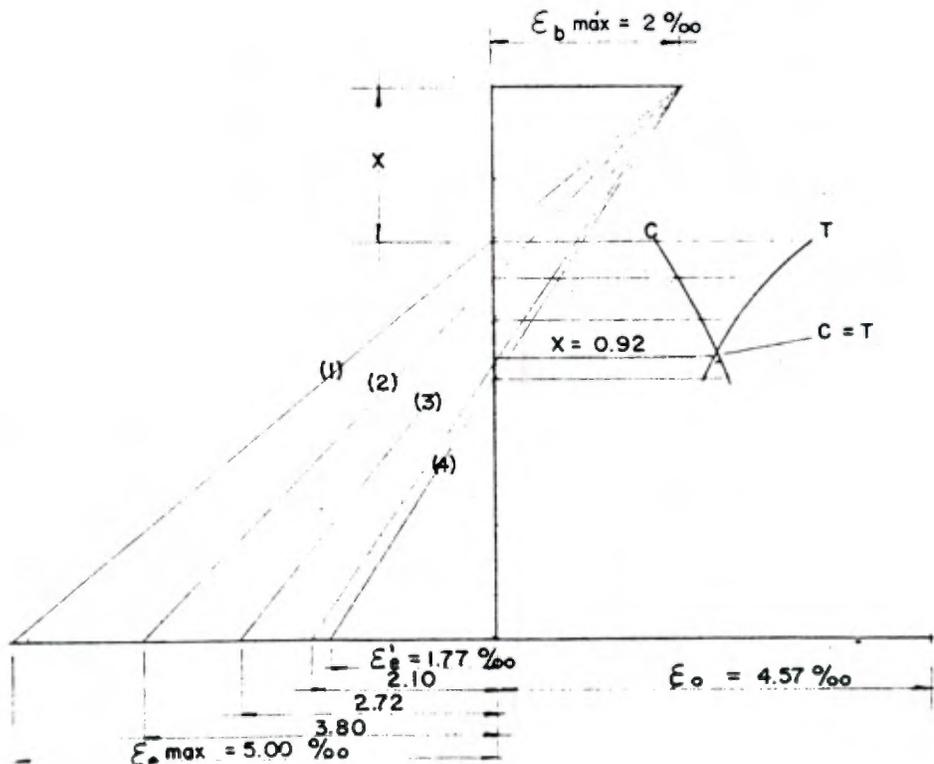
Posición de la resultante: 0.274 m. de la fibra superior.

$Z = h_e - 0.274 = 1.601$ m.

$M_{rup} = C \cdot Z = T \cdot Z$

$M_{rup} = 1445 \times 1.601 = 2315$ ton-m

$M_{rup} = 2315$ ton-m $>$ min. $M_{rup} = 2293$ t-m. O.K.



M_{g+p} el momento total debido a carga muerta más carga viva. -

Para el cálculo del momento de ruptura se puede recurrir a cualquiera de las teorías modernas de ruptura, tales como las de Whitney Saliger etc. Para referencia se recomienda la literatura correspondiente del American Concrete Institute (Journal, Enero 1956). El siguiente cálculo está basado en los experimentos recientes de Rüsck y es el método en uso general en Alemania. -

Para secciones rectangulares se pueden derivar fórmulas, que expresan el momento de ruptura directamente en función de los valores de la sección, de la resistencia del concreto y del área de acero, etc. Por tratarse de una sección hueca se siguió el método gráfico de Mösck (Beton-und Stahlbetonbau, Juli 1950), evitando así el cálculo por aproximaciones sucesivas (iteración). -

5.4 Esfuerzos Cortantes y Diagonales. -

Los esfuerzos cortantes y diagonales se calcularon en diferentes secciones de la viga combinando el efecto de la torsión con las fuerzas cortantes. -

Los esfuerzos cortantes puros se calcularon aplicando la fórmula conocida de resistencia de Materiales para secciones homogéneas, obteniendo un máximo en el centro de la viga. En su cálculo se emplearon los valores brutos de la sección. -

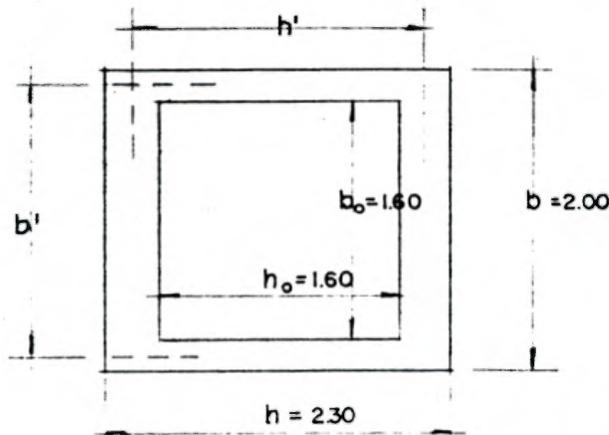
Los esfuerzos cortantes debidos a la torsión se estimaron según la fórmula corregida del Manual para Cálculo del Ministerio de Obras Públicas de Venezuela (1945), página 592, tabla No. 88, y se chequearon con la fórmula más exacta de Bredt para secciones huecas de

8.- ESFUERZOS CORTANTES Y DIAGONALES:

SECCION EN EL APOYO:

Momento máx. de torsión:

$$T_{g+p} = 239.8 \text{ ton-m}$$



Fórmula del Manual de Cálculo del M.O.P. de Venezuela (corregida):

$$V_t = \frac{\phi \cdot T_{g+p} \cdot b}{(b^3 \cdot h - b_o^3 \cdot h_o)}$$

Siendo:

h = lado más largo

b = lado más corto.

$$\phi = 3.00 + \frac{2.60}{0.45 + h/b} = 3.00 + \frac{2.60}{0.45 + 2.3/2.0} = 4.63$$

$$\max. V_t = \frac{4.63 \times 239.8 \times 2.0}{(2.0)^3 \cdot 2.3 - (1.6)^3 \cdot 1.6} = 187 \text{ ton/m}^2$$

max. V_t sucede en el centro del lado h ; se asume igual para el lado b .

Fórmula de Bredt

$$V_t = \frac{T_{g+p}}{2 \times b' \times h' \times d} = \frac{239.8}{2 \times 1.95 \times 1.80 \times 0.20} = 179 \text{ ton/m}^2$$

ESFUERZOS CORTANTES:

Fuerza cortante debido a cargas exteriores (g+p):

$$V_{g+p} = +181.3 \text{ ton.}$$

Fuerza cortante debido a la fuerza de precompresión (F_o):

carga equivalente:

$$w = -\frac{8 \cdot F_{\infty} \cdot f}{L^2} = -\frac{8 \times 502.5 \times 1.00}{(27.0)^2} = -5.51 \text{ ton/m (20 cables)}$$

f = flecha de la parábola de los cables.

L = longitud de la viga.

$$F_{\infty} = 20 \times 29.7 \times 0.846 = 502.5 \text{ ton.}$$

$$V_f = -\frac{1}{2} w \cdot L = -\frac{5.51 \times 27}{2} = -74.4 \text{ ton.}$$

$$V_{\text{neto}} = V_{g+p} + V_f = +181.3 - 74.4 = +106.9 \text{ ton.}$$

$$V_v = \frac{V \times Q}{I \times b}$$

$$V_v = \frac{106.9 \times 0.6673}{1.0458 \times 0.70} = 97 \text{ ton/m}^2 \text{ (al centro de la sección).}$$

V = fuerza cortante

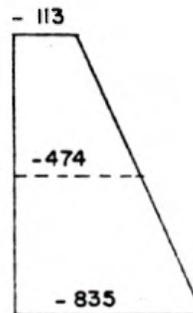
Q = mom. estático del área sobre el punto considerado respecto al E.N.

I = mom. de inercia de la sección

b = ancho de la sección

$$V = V_f + V_v = 187 + 97 = 284 \text{ ton/m}^2$$

Esfuerzos normales :

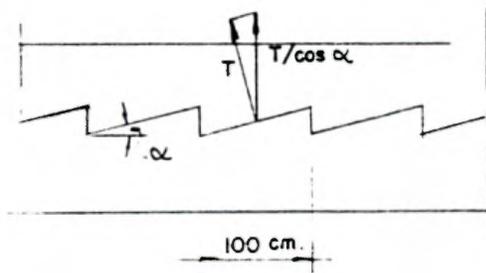


$$S_p = -\frac{S}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{S}{2}\right)^2 + V^2} = -\frac{474}{2} \pm \sqrt{(237)^2 + (284)^2} = +133 \text{ ton/m}^2$$

$$S_p = 13.3 \text{ kg/cm}^2$$

$$\tan \alpha = \frac{2 \times V}{S} = \frac{2 \times 284}{474} = 1.20$$

$$\alpha = 25.1^\circ$$



$$A_s = \frac{S_p \cdot 100 \cdot b}{f_s \cdot \cos \alpha} = \frac{13.3 \times 100 \times 35}{1400 \times \cos 25.1^\circ} = 36.8 \text{ cm}^2 / \text{mt. lineal}$$

$$A_s = 5.70 \text{ pulg.}^2 / \text{mt.}$$

Usar : Estribos dobles de \emptyset 5/8" a 10 cm. ($A_s = 6.20 \text{ pulg.}^2$)

que da valores ligeramente más pequeños . -

El cálculo de los esfuerzos diagonales se realiza combinando el efecto de los esfuerzos normales, que actúan sobre la sección debido a la precompresión y a la flexión, con los esfuerzos cortantes en diferentes niveles de la sección. Con la magnitud y la inclinación de los esfuerzos principales se calcula el área de estribos necesaria, asignando toda la tensión al acero, asumiendo que el concreto no toma esfuerzos de tensión ; esto es una práctica diferente a la americana, que considera cierto esfuerzo cortante tomado por el concreto. También deben comprobarse los esfuerzos diagonales para el estado de ruptura. -

Capítulo VI.

Ejecución de una Obra de Concreto Pre-esforzado

6.1 Armado de los Cables LEOBA.

En el sitio de la construcción o en un lugar apropiado se preparan los bancos de trabajo, protegidos de la lluvia y de la humedad. Los bancos deben ser suficientemente largos para armar cómodamente los cables. En un extremo se coloca el rollo de alambre en una armazón giratoria; sobre el banco o suelo apiñado se extienden los alambres y se cortan a la longitud exacta. -

Con una placa de doblaje especial se forman en el centro del alambre los lazos de anclaje (Fig. 24). Esta operación requiere bastante pericia para dar al lazo la curvatura exacta; se deben evitar golpes fuertes al doblar, ya que estos aceros son muy susceptibles. -

Seis alambres se arman simultáneamente para formar un cable; se coloca la pieza de anclaje y cada 80cm. a 1.50m. se insertan los separadores, que unen las dos capas de alambres y mantienen la separación de los mismos. Por un extremo se introducen el cono y las vainas metálicas, que se suministran en longitudes cómodas de 3m. Los empates de los ductos se sellan con tape o cabos pequeños de neumático de hule para evitar que la lechada penetre durante la chorrea del concreto. A continuación se doblan los ganchos para el anclaje fijo con una placa espe

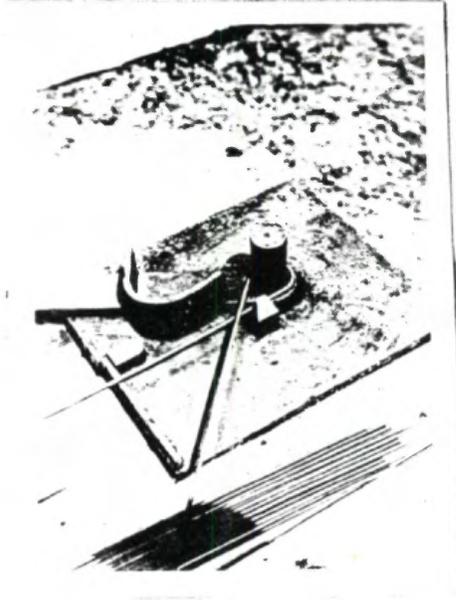


Fig. 24.

Placa para doblaje de Lazos

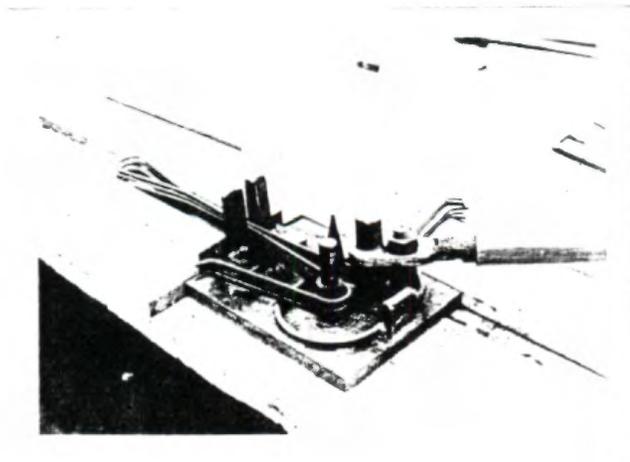


Fig. 25.

Placa para doblaje de Ganchos

cial (fig. 25). Mediante un punzón de acero se introduce un anillo entre las dos capas de alambres, obligando a los mismos disponerse en esta parte en forma circular. Este extremo se sella cuidadosamente con masilla y neumático. Los ganchos se refuerzan con una espiral de varilla de hierro y la manguera para la ventilación se introduce hasta el anillo. (Fig. 13). -

En el extremo de tensión se inserta el tornillo de sostén con las tuercas y se coloca el tapón de hule. -

Si los cables han de almacenarse antes de su colocación, deberan guardarse en lugar seguro para protegerlos de la lluvia. -

6.2 Transporte y Colocación de los Cables.

Durante la colocación de los cables, estos deberán mane- jarse con cuidado para evitar que las vainas metálicas reciban quiebres o dobladuras, que luego obstaculizarán la operación de tensado. Preferiblemente se transportan los cables en una armazón de madera y se alzan con la ayuda de un número suficiente de trabajadores. En la formaleta se apoyan los cables sobre cabos de varilla soldados a los estribos a la altura correspondiente y se amarran fuertemente con alambre para evitar que su posición se altere durante el vaciado y vibrado del concreto. También se emplean pequeños bloques de concreto con una ranura, que sujeta lateralmente el cable. -

En el extremo de tensión se refuerza el anclaje con una espiral de hierro, en igual forma que para el anclaje de ganchos. El tornillo de sostén se pasa por un agujero de 30mm. a través de la formaleta y por medio de una arandela de hierro y de dos tuercas se sujeta bien a la

misma. La formaleta en este extremo deberá hacerse de madera dura o planchas de plywood, para evitar que la superficie se pandee con la humedad. La gata debe apoyarse sobre una superficie perfectamente plana y quedar perpendicular al cable, lo cual es absolutamente necesario para una operación de tensado correcta. Esto mismo obligó en la construcción del Cine Rex a calzar la gata varias veces, por haber existido negligencia en este sentido. -

La manguera de hule se lleva hasta el extremo de la viga o hasta la superficie de concreto y debe terminar en una posición más alta que el propio cable. No debe amarrarse la manguera con alambre para poderla extraer después del fraguado del concreto. Esta ventilación se puede hacer también con tubos conduit de metal de 15 mm. de diámetro, que permanecen luego en la viga. Esto es aconsejable para ventilaciones muy largas o donde existen curvaturas. -

6.3 Inspección de la Obra.-

La ejecución de una obra de concreto pre-esforzado requiere una inspección muy cuidadosa, si se quieren evitar errores y defectos en la misma. Antes de la colocación del concreto, se deben chequear exactamente las alturas de los cables, así mismo, los empates de los ductos. Pequeños cambios en la posición de los cables traen consigo grandes variaciones de los esfuerzos en el concreto y pueden perjudicar seriamente la seguridad de la estructura. Lechada de cemento, que penetra durante la chorrea en los cables, forma tacos que obstaculizan el tensado y la inyección de los cables. Estos errores en la ejecución, fáciles de evitar,

son difíciles de corregir y traen por consecuencia atrasos en el programa de trabajo. -

El vaciado del concreto tiene que ser vigilado por una persona competente y el vibrado deberá realizarse con operarios cuidadosos. Las operaciones de tensado y de inyección también deben estar al cargo de un ingeniero responsable. -

6.4 Vaciado del Concreto.

En los extremos de anclaje se emplean concretos trabajables con agregados no mayores, de 15mm. y con revenimientos mayores de 5-6%. Estas zonas, especialmente alrededor de los anclajes de ganchos, deberá vibrarse cuidadosamente y el concreto deberá penetrar y envolver bien los alambres. Deficiencias en el vibrado de esta sección trajeron como consecuencia la falla de dos cables en la primera obra de este tipo, que fue la construcción de vigas de concreto pre-esforzado para el M. O. P. Estos anclajes se arreglaron perforando el concreto e inyectando mortero en el interior de la espiral; los cables se tensaron luego sin consecuencias serias, pero siempre acompañados de dificultades y atrasos en el trabajo. Con el empleo de operarios entrenados y mejor disposición de los cables, ha sido posible evitar por completo estas fallas en construcciones posteriores. - Durante la colocación del concreto en la viga deberá procederse hacia adelante, teniendo cuidado que el concreto penetre bien debajo de los cables. Estos se disponen en la sección previendo suficiente espacio para el vibrador, que no debe golpear y dañar las vainas metálicas. El uso de vibradores externos permite secciones de concreto más delgadas y con

cretos más espesos. -

6.5 Preparativos para el Tensado.

Después del fraguado del concreto se retira la manguera de ventilación. Al cabo de 2 a 3 días se quita la formaleta de los extremos y se retiran el tapón de hule y el tornillo con las tuercas. El ducto de ventilación y el extremo de tensión deben protegerse contra la humedad y la suciedad. -

A continuación se introduce el tornillo de tensar en la pieza de anclaje; con un cabo de neumático se protege la rosca del mismo contra la lechada de cemento. La placa de distribución se coloca sobre una arandela de hule, que sirve para adaptarse a las irregularidades de la superficie, y en tal forma que el orificio para la inyección de la lechada quede hacia arriba. La placa se sujeta con una tuerca y debe estar perfectamente centrada y perpendicular al tornillo. -

6.6 Operación de Tensado.

a. -) Aparatos para Tensar. - Para el tensado de los cables se emplean una gata hidráulica tipo LEOBA, que pesa solamente 11kg. (Fig. 27) y se acciona con una bomba manual (Fig. 26) a la cual está conectada por medio de una manguera de alta presión. El líquido de presión puede ser agua, o aún mejor, un aceite liviano. -

b. -) La elongación del Alambre. - Antes de iniciar la operación de tensado se debe calcular la elongación del acero y la presión correspondiente del manómetro. Estos valores se tabulan en una ho

ja en la cual se anotan también los valores actuales obtenidos durante la operación. -

La tabla de tensado debe indicar además en cuanto se debe aumentar la fuerza de tensión en el extremo para vencer las pérdidas de fricción y obtener en la sección más desfavorable, por ejemplo al centro de la viga, la fuerza necesaria. El coeficiente de fricción recomendado para los cables LEOBA varía entre 0.18 y 0.22 (promedio de 0.20). En la práctica se pueden presentar valores aún menores, aproximadamente 0.13, para ejecuciones muy cuidadosas, y el valor definitivo se calcula de los datos obtenidos en la tabla de tensado. La operación de tensado se termina al alcanzar la elongación necesaria. Para vencer la fricción se permite aumentar temporalmente la tensión en un 10% más y luego bajarla nuevamente a su valor especificado. -

La tabla debe considerar además el orden de tensado de los cables; el esfuerzo en los mismos varía de acuerdo. Al tensar el primer cable, el concreto se acorta en una cantidad proporcional a su esfuerzo y el alambre sobresale de la superficie de concreto, fuera de la elongación propia del acero, en esta cantidad adicional. Al tensar el segundo cable, el concreto se acorta nuevamente y el primero pierde parte de su tensión y así sucesivamente para los cables subsiguientes. Debemos tensar los primeros cables a un esfuerzo mayor, de tal manera, que al tensar los demás y al perder parte de su fuerza, estos queden con su tensión necesaria. -

c. -) El tensado. - Sobre la tuerca del tornillo se coloca la racha de la gata, y ésta se sujeta a la placa con una tuerca que se

soca contra la parte posterior del cilindro. La escala grabada en el pistón debe marcar cero. La elongación del acero se lee en esta escala o por medio de una regla milimétrica. -

La presión se eleva a 20 kg/cm^2 . y se toma la primera lectura. La elongación medida de 0 a 20 kg/cm^2 . no corresponde realmente a la elongación del acero; esto es cierto porque los alambres pueden estar ondulados en el ducto y se elongan cierta cantidad hasta alcanzar la primera tensión o porque los cables pueden tener ya originalmente una pequeña tensión, que proviene de las variaciones de temperatura o de sólo socar la tuerca de la placa. -

Esta primera lectura incluye por lo tanto un error. Este inconveniente se elimina considerando las elongaciones a partir de un cierto límite, por ejemplo 20 kg/cm^2 . y calculamos las cantidades correspondientes a la presión a partir de este valor, Este cálculo lo anotamos previamente en la tabla de tensado. -

El tensado se continúa hasta que el alambre alcance su elongación total y la lectura en el manómetro debe coincidir con la calculada. Es conveniente calcular algunos valores intermedios. Si al alcanzar la presión calculada no se ha obtenido la elongación correspondiente, no se debe continuar tensando y más bien se debe buscar la razón por la cual la elongación resultó pequeña. Se debe tensar unos 2mm. sobre lo estimado para tomar en cuenta la elongación de la gata y del tornillo y la deformación de la arandela de hule.

A medida que el cable se estira, se soca la tuerca por medio de la ranura y cuando se alcanza la presión total, ésta se soca fuertemente; podemos ahora quitar la presión de la bomba y retirar la gata,

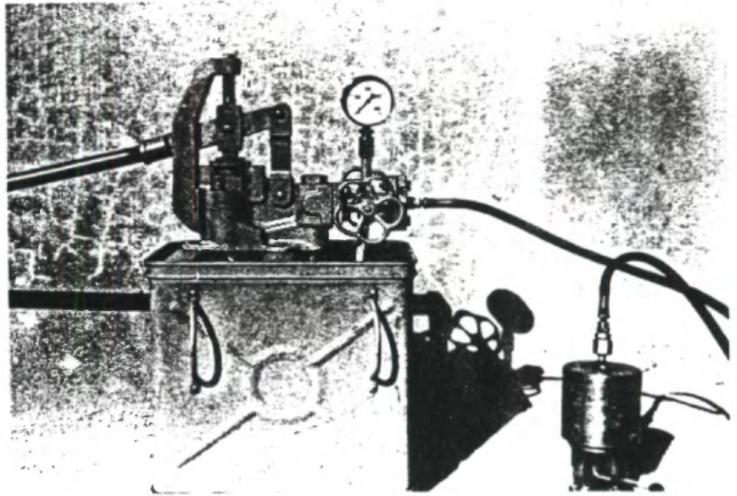


Fig . 26.

Conjunto de Bomba y gata.

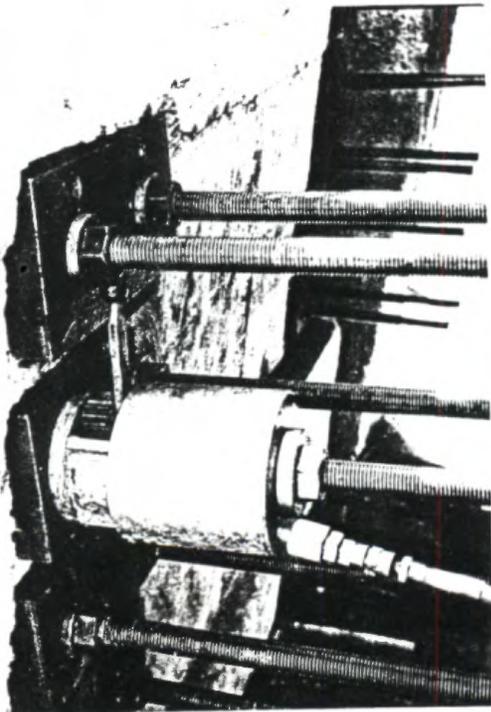


Fig. 27.

Gata Hidráulica LEOBA
durante la operación de tensado.

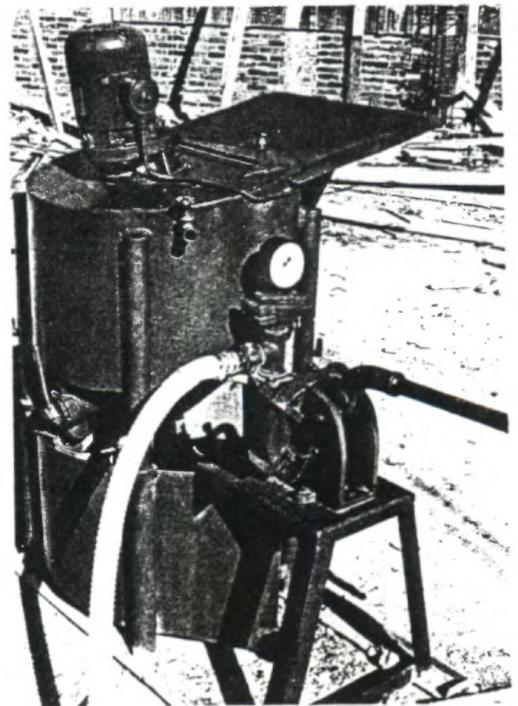


Fig. 28.

Aparato de inyección.

que se prepara para la siguiente operación. -

d. -)Fuentes de Error. - Si la elongación y la presión del manómetro no coinciden entonces, esto puede deberse a la inexactitud del manómetro, el cual debe ajustarse de vez en cuando; conviene tener siempre dos manómetros en la construcción. - Si la elongación es mayor que la calculada, entonces el coeficiente de fricción es menor o en el anclaje de ganchos ha sucedido un pequeño deslizamiento en los alambres. Si la elongación es menor, entonces ha habido mayor fricción, debido al herrumbre en los alambres o porque el cable no se colocó perfectamente recto. También puede suceder que durante el vaciado del concreto penetre lechada en los ductos, que obstaculiza el tensado. Tacos de lechada se pueden eliminar tensando repetidas veces, destruyendo la adherencia. El ducto se lava luego con agua. -

6.7 Inyección de la Lechada.

Primero se llena el ducto del cable con agua desde un extremo y se observa si el agua fluye libremente en el otro. Si esto no es el caso, se debe inyectar agua a presión en el cable para eliminar cualquier obstáculo. Enseguida se inyecta desde el extremo de tensión la lechada de cemento a través del orificio en la placa de distribución. El agua en el ducto es desplazada por la lechada. Cuando ésta sale en forma pura por el ducto de ventilación, se taponan ambos extremos, teniendo cuidado que el cono de anclaje quede bien lleno. -

Para la inyección de la lechada se debe emplear un cemento que no segregue mucha agua. La prueba de segregación se hace en u

na lata de conservas y se observa en la misma el endurecimiento de la lechada; el cilindro se prueba luego para determinar su resistencia. -

La mezcla de la lechada se hace por medios mecánicos en una batidora (Fig. 28) con dos recipientes. Los adimentos se mezclan en la parte superior, donde se baten durante 4 minutos como mínimo. Luego, se pasa la lechada al recipiente inferior, donde se continúa batiendo durante la inyección. Con una bomba manual de membrana se inyecta la lechada a través de una manguera. -

Una mezcla muy conveniente para la lechada ha sido con las siguientes proporciones, y se empleó en las construcciones del Cine Rex y del M. O. P. :

100kg. de cemento Alsen

42½lts. de agua

9½onzs. de Plastiment líquido

La segregación de agua obtenida con esta lechada no sobrepasó el máximo de 2% por volumen, especificado por las normas alemanas y se obtuvieron resistencias de 5000 lb/pulg.² en los cilindros de 9 x 12cm. -

Después del endurecimiento de la lechada, a los 2-8 días, según el cemento y la temperatura ambiente, se pueden soltar las tuercas y retirar la placa de acero y el tornillo de tensar. El pequeño hueco que queda se tapa con mortero de cemento. -

Capítulo VII

Materiales para Concreto Pre-esforzado

7.1 Concreto.

Los concretos empleados para miembros precomprimidos requieren resistencias mayores que para concreto armado corriente. Esto se debe a diferentes razones; en primer término, como se explicó anteriormente, en concreto pre-esforzado se pueden aprovechar las ventajas de los materiales de alta resistencia y su uso permite reducir considerablemente las secciones. A su vez, la reducción del peso muerto hace posible económicamente la construcción con luces mayores. Los concretos de alta resistencia tienen un módulo de elasticidad mayor y experimentan deformaciones menores por efecto del flujo plástico, lo que trae por consecuencia una reducción de las pérdidas de la fuerza de tensión. También se agrietan en menor escala debido a la retracción del concreto, antes de aplicar la fuerza de tensión. Para disminuir los costos de los anclajes, estos se diseñan basados en concretos de mayor resistencia. También presentan mayor resistencia a la tensión y a los esfuerzos cortantes por lo que se prestan especialmente para este tipo de estructuras, cuyas partes están generalmente sometidas a esfuerzos muy altos.

La práctica americana exige concretos con resistencias

de 4000 - 5000 lb/pulg². a los 28 días, medidas en cilindros de 6 x 12", mientras que para concreto convencional se emplean concretos de 2500 lb/pulg². en término medio. Las Normas Alemanas permiten para concreto pre-esforzado una resistencia mínima a los 28 días de 300 kg./cm². en cubos de 20cm. de lado; esto corresponde a aproximadamente 3500 lb/pulg². en cilindros, si se asume la resistencia en cilindros como el 80% de la resistencia al cubo. Comúnmente se emplean también concretos de 450 y de 600 kg/cm. ² . No sólo se deben especificar concretos con resistencias altas para trabajos pre-esforzados, sino también la resistencia asumida deberá obtenerse con seguridad en la construcción. Los esfuerzos altos estimados en el cálculo se suceden realmente durante la pretensión y por otro lado el factor de seguridad a la ruptura es de sólo 2.5, lo cual es suficiente, pero no es un valor excesivo. Debemos asumir concretos cuya resistencia se puede obtener sin dificultad con el equipo disponible, con los agregados y cementos empleados y así mismo con los operarios disponibles. -

Fuera de la resistencia se requieren otras propiedades importantes para concreto precomprimido. Especialmente debe presentar en menor grado el flujo plástico y la retracción. La retracción depende en primer término de las condiciones del ambiente en que está situada la estructura; miembros que se mantienen en un ambiente húmedo (p. ej. una viga de puente directamente sobre un curso de agua) se contraen menos por efecto de la retracción, que en ambiente seco (vigas en interiores de edificios). El porcentaje de agua y la cantidad de cemento y mortero afectan fundamentalmente la retracción; la razón de agua-cemento

no deberá exceder en términos generales 0.45 y el revenimiento del con
creto se deberá mantener bajo, con el objeto de reducir la cantidad de a
gua; pero esto a su vez depende de la trabajabilidad del mismo y del e
quipo de vibrar. El curado del concreto también afecta este fenómeno ;
se debe mantener húmedo el concreto por un lapso de tiempo suficiente .
Estas mismas propiedades afectan el flujo plástico y observándolas se
puede reducir sus efectos. -

El concreto debe desarrollar también poco calor debido a
la fragua del cemento, porque especialmente en miembros gruesos se su
ceden grandes diferencias de temperatura, que producen tensiones en
las zonas exteriores; el concreto que está prácticamente sin reforzar no
es capaz de resistir estos esfuerzos y se agrieta. Por esta razón se de
ben evitar generalmente el empleo de cementos de fragua rápida y de al
ta resistencia, o su empleo deberá hacerse solamente en casos especia
les . -

7. 2. Acero.

Para concreto pre-esforzado se emplean solamente aceros
con límites de ruptura altos, porque una parte de la fuerza de tensión se
pierde por la contracción plástica del concreto. Esta pérdida es propor-
cional a la razón de la deformación del concreto con la elongación inicial
del acero. Cuanto mayor sea esta elongación inicial, menor serán las
pérdidas de tensión. -

Obs ervamos antes que la elongación inicial en el acero de
pende prácticamente del esfuerzo permisible, y por lo tanto de su resis
ta

tencia, ya que el módulo de elasticidad varía dentro de límites muy pequeños. -

Es lógico, pues, que en concreto pre-esforzado sólo se empleen aceros muy resistentes. En Europa no se permiten aceros con rupturas bajo $90-100 \text{ kg/mm}^2$. y prácticamente todos los sistemas de pretensado hacen uso de resistencias de 140 a 180 kg/mm^2 . El límite superior de la resistencia está dada por la propiedad que deben tener los alambres de ser suficientemente dúctiles para trabajarlos y doblarlos. Barras de acero se fabrican generalmente con resistencias hasta de $100-120 \text{ kg/mm}^2$. ; alambres de aproximadamente 5 mm . de diámetro pueden producirse con resistencias hasta $180-200 \text{ kg/mm}^2$. ; este límite para alambres muy delgados de 2 mm . o menos (cuerdas de piano) se puede llevar hasta 240 kg/mm^2 . Si la resistencia se aumenta aún más, el acero se vuelve quebradizo y no permite trabajarlos, con lo que pierde su aplicación práctica para la construcción. -

La resistencia del acero se puede obtener de diferentes maneras:

1. - Por medio de aleaciones adecuadas de metales (aceros naturales). -
2. - Estirado o laminado en frío. -
3. - Por tratamientos en caliente, por el cual se calienta el acero a cierta temperatura y luego se enfría en un baño de plomo o de aceite. -

Los aceros se suministran en varias formas, dependiendo de su uso final. Para miembros pretensados se emplean alambres lisos redondos con diámetros hasta de 2.5 mm . , o alambres ovalados con corrugaciones, que tienen mejor adherencia; también se ha generalizado

el uso de torones de 2 a 7 alambres para miembros de puentes prefabricados . -

Los sistemas de postensado emplean en su mayoría alambres de 5 - 8 mm. de diámetro (sistemas Freyssinet, Leoba, etc.) o barras de acero natural (sistema Lee-Mc. Call). -

El alambre se suministra en rollos de 50 a 100 kg. empacados en papel asfáltico y yute para protegerlos de la humedad y la corrosión. El diámetro del rollo es de aproximadamente 2. m. y debe ser tal que al arrollar el alambre éste no se esfuerce sobre el límite proporcional, de modo que al desarrollarlo de nuevo, quede perfectamente recto. -

Para hacer el pedido correspondiente del acero se deben especificar a la fábrica los siguientes requisitos:

1.) Límite de fluencia, que representa el esfuerzo bajo el cual queda una deformación permanente de 0. 2%. -

2.) Límite de ruptura. -

3.) Deformación total a la ruptura, que es la elongación alcanzada por el acero a la ruptura medida en una longitud de 10 veces el diámetro, y su valor depende de cada sistema y la forma de trabajar el alambre. Para el sistema Leoba se especifica una deformación no menor del 6%. La deformación a la ruptura representa el grado de ductilidad del acero y a la vez su trabajabilidad. -

4.) Las pérdidas de tensión debido a la fluencia del acero. -

5.) El diámetro mínimo garantizado del alambre, que especialmente para aceros laminados no es constante y varía levemente. -

Capítulo VIII

Ventajas del Concreto Pre-esforzado y su Importancia Económica.

8.1 Ventajas Generales del Sistema

El extraordinario auge obtenido por el concreto pre-esforzado en los últimos años no sería posible a no ser por las importantes ventajas que el pretensado ofrece sobre otros sistemas de construcción. Estas ventajas las podemos resumir en la siguiente forma:

a. -Debido a que durante el estado de carga la sección permanece sin agrietarse, ésta trabaja como sección homogénea (y como tal se calcula), haciendo trabajar el concreto en compresión eficientemente. De esta manera se logra una economía en la sección de concreto de un 15 a un 30%, lo que a su vez trae consigo una reducción del peso muerto de la estructura. La economía en el acero es aun mayor y alcanza un valor de un 60 a un 90%, lo que se debe principalmente a las altas resistencias de los aceros empleados. La economía de materiales es en parte compensada por el costo de los anclajes y de los alambres; sin embargo, este sistema redunda generalmente en estructuras más económicas. -

b. -Las deflecciones de una viga de concreto pre-esforzado son menores que las de una viga de concreto armado convencional, a igual altura y a igual aprovechamiento de los esfuerzos permisibles. Las deformaciones son aun menores que las de una viga correspondiente de a-

cero; sus deflecciones alcanzan un valor de un 33% de las del acero estructural. Esta propiedad permite construir vigas con peraltes pequeños, sin que sucedan vibraciones indeseables en la estructura. -

c. -El concreto pre-esforzado tiene la propiedad de reponerse completamente después de estar sometido a sobrecargas imprevistas, sin que queden deformaciones permanentes que inutilicen la estructura. Las grietas que se suceden durante la aplicación de las cargas, desaparecen por completo después de retirar la misma, ya que la fuerza de precompresión tiende a cerrarlas de nuevo (high resilience). -

d. -La duración de la vida útil de una estructura de concreto pre-esforzado es mayor que para el concreto armado, ya que, debido a la ausencia completa de grietas se obtiene una mejor protección del acero contra la corrosión y el concreto permanece menos expuesto a las influencias del medio ambiente. Con respecto al acero estructural, el concreto pre-esforzado presenta la ventaja de no requerir prácticamente ningún mantenimiento. -

f. -Para el ingeniero el concreto pre-esforzado representa un medio sencillo para cubrir en forma económica espacios amplios con luces grandes, logrando el arquitecto mayor flexibilidad en el planeamiento y distribución de locales comerciales y oficinas, de edificios industriales o escolares, etc. A su vez se logra un mejor aprovechamiento del espacio libre disponible. Llama la atención sobre todo la apariencia estética de una estructura pretensada, que con sus luces grandes y pequeños peraltes, luce esbelta. -

8.2 La Economía del Sistema.

Contrario a la creencia general, el concreto pre-esforzado presenta en la mayoría de los casos considerables ventajas económicas sobre los demás sistemas constructivos, como lo demuestran las experiencias obtenidas en las obras ejecutadas con este sistema en Costa Rica. Aun en casos particulares, en los cuales resulta un mayor costo de construcción, pueden las ventajas anteriormente enumeradas decidir a favor del concreto pre-esforzado. -

El primer proyecto presentado para pretensar las vigas en voladizo y las columnas para el balcón del Cine Rex, arrojó una economía de aproximadamente \$ 15,000. - Adoptando la solución propuesta por el Doctor Leonhardt se logró simplificar la ejecución y el trabajo, obte - niéndose una economía total estimada en aproximadamente \$35,000. -, ya que en esta forma se logró también una economía en el resto de la estructura y de las fundaciones. Para un balcón de cine es de suma importan - cia que las vibraciones se mantengan dentro de límites pequeños. -

Con el concreto pre-esforzado esta condición quedó sa - tisfecha plenamente, como lo demostraron las pruebas efectuadas y las deflecciones medidas. -

Debido a que el diseño de las vigas postensadas de 16m. de luz para el Plantel Central del Ministerio de Obras Públicas se inició cuando ya se había comenzado la construcción de las columnas de soporte, y debido a otras consideraciones hechas para este caso particular, hubo que adaptar el diseño a las condiciones existentes y no se logró un máxi - mo de eficiencia en el mismo. Sin embargo, el análisis comparativo de los

costos dió una diferencia de ₡ 1000. - a favor del concreto pre-esforzado.

Un ejemplo muy claro de la importancia económica de este sistema, lo da la estimación del costo para la superestructura del puente sobre el Río Torres en la Urbanización Tournon, en San José. La propuesta presentada por la Pretensora de Concreto S.A. para ejecutar esta obra en concreto postensado dió los siguientes datos:

Concreto:	169 yds ³ .	a ₡ 150. -	₡ 25,350. -
Cables de pretensión:	40 unidades	a ₡ 800. -	₡ 32,000. -
Hierro convencional :	210 qq.	a ₡ 64. -	₡ 13,440. -
Formaleta :			₡ 15,000. -
Mano de Obra :	formaleta		₡ 6.000. -
	colocación refuerzo:		₡ 4.000. -
	vaciado del concreto:		₡ 3.500. -
	Total:		₡ 99,290. -

El precio de los cables incluye los materiales, el armado y su colocación, las operaciones de tensado e inyección y el diseño de la estructura. -

Para las mismas cargas de diseño e igual luz, se obtuvo una oferta para una estructura de acero con un valor de ₡ 112,000. -, precio CIF San José, sin incluir la losa de piso y la erección de la armadura. Esta diferencia notable expone claramente las posibilidades que el concreto pre-esforzado ofrece para la construcción en nuestro país. -

Capítulo IX

Las Aplicaciones del Concreto Postensado en Costa Rica.

En los últimos años ha experimentado el concreto pre-esforzado un desarrollo considerable en los Estados Unidos, la América Latina y principalmente en Europa. El número de obras realizadas con este sistema ha aumentado extraordinariamente y encontramos sus aplicaciones prácticamente en todas las ramas de la ingeniería moderna. Este auge no sería posible a no ser por las importantes ventajas que el pretensado ofrece sobre otros sistemas constructivos y que pueden ser bien aprovechadas también por las empresas nacionales. El propósito de este capítulo es describir las posibilidades que el concreto pre-esforzado ofrece para la ingeniería y las aplicaciones que pueda tener en nuestro medio a base de obras ejecutadas o de proyectos elaborados por la Pretensora de Concreto S. A. . en la confección de los cuales yo he tenido parte activa, y que demuestran claramente la diversidad de sus aplicaciones. -

He dejado como tema para un capítulo aparte la descripción de otras aplicaciones especiales, tales como la fabricación de postes y de viguetas pretensados, que ofrecen un campo amplio para nuestra construcción y en la cual la empresa mencionada ha venido trabajando activamente y cuya realización se espera llevar a cabo en el transcurso del año presente. -

A continuación daré una explicación de los proyectos, cuyo estudio ha sido elaborado cuidadosamente y que representan trabajos en firme, los cuales están ilustrados en las láminas siguientes; éstas muestran únicamente los detalles esenciales. -

9. EJEMPLOS DE OBRAS Y PROYECTOS DESARROLLADOS.

1. - Puente sobre el Río Torres. - Urbanización Tournon

Para el acceso a la nueva Urbanización Tournon se proyectó la construcción de un puente de 2200 m. de luz, diseñado para cargas H 15, con un ancho de vía de 9.00 m. y aceras de 1.50 m. a ambos lados. El puente se había previsto para una estructura de acero; sin embargo, con base en una propuesta hecha por la Pretensora de Concreto S. A., se decidió realizar esta obra en concreto postensado, tomando en cuenta la considerable economía que representaba (ver cap. VIII) y por la mejor apariencia estética. -

La sección del puente consta de dos vigas de cajón generales, cuyas dimensiones se pueden apreciar en la Fig. 29 (Lám. 24) Esta forma es muy conveniente para puentes muy anchos y con pocas vigas, en los cuales la repartición uniforme de las cargas juega un papel importante, ya que presenta una rigidez torsional muy grande. -Estructuralmente el puente es una viga simplemente apoyada; en los extremos y en los puntos tercios se dispusieron diaframas para aumentar la rigidez del sistema y facilitar la repartición de las cargas. En cada nervio de los cajones se colocaron 12 cables LEOEA con una fuerza total de 1018 toneladas llevados en forma parabólica hasta los extremos. Un apoyo es movible para permi

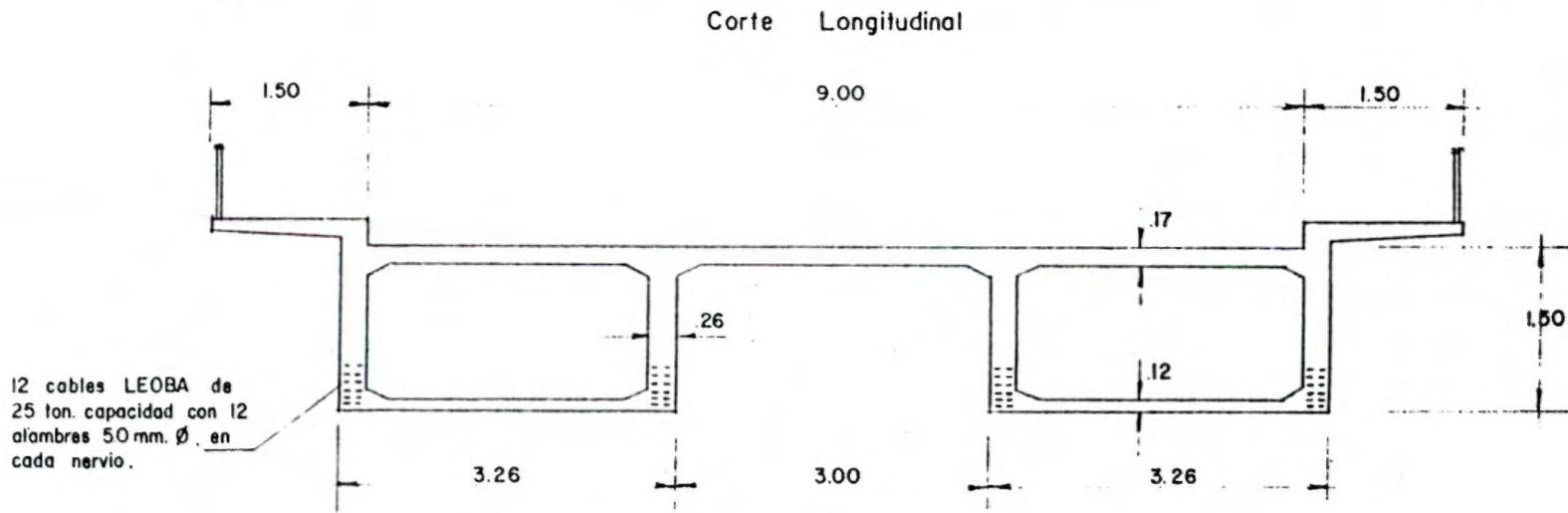
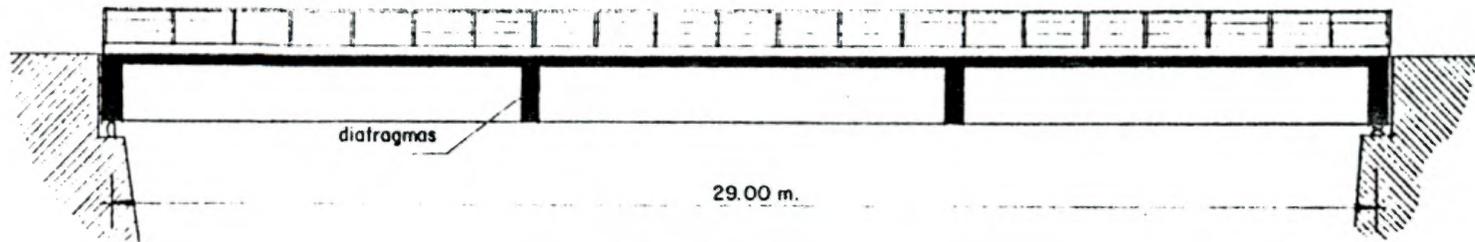


Fig. 29

Puente sobre Rio Torres - Urbanización Tournon.
Vigas de Cajón Gemelas.

tir la contracción elástica y plástica del puente y está formado con péndulos de acero; el otro apoyo es fijo, pero permite el giro de la viga en el extremo ; éste último está formado con dos placas cóncavas de acero. -

2. - Puente sobre el Río Damas.

Una alternativa presentada al Ministerio de Obras Públicas para la construcción del puente sobre el Río Damas es una losa sólida de concreto postensado con un espesor de sólo 34 cm. Para la luz total de 11.80 m. esto representa una razón de delgadez de 1/ 35. El puente se pretensa con un total de 57 cables LEOBA., que también se conducen parabólicamente a los extremos. Por su sencillez en la formaleta y en el doblaje y colocación del refuerzo convencional, que es una malla de varilla de hierro, éste tipo de puente resulta bastante económico para luces hasta de 15 m. La carga asumida fue para H 20 - S 16.

3. - Una demostración típica de la aplicación del concreto postensado a la construcción de edificios comerciales son las vigas ejecutadas en el Plantel Central para el Ministerio de Obras Públicas. Las vigas con una luz total de 16 m. soportan una losa de concreto para la sección de oficinas (fig. 34). Por consideraciones hechas para este caso particular, se dispuso construir y tensar las vigas antes de chorrear la losa superior; de esta manera se quiso evitar esfuerzos indeseables en la losa debido a la pretensión. Para aprovechar la forma de viga T para las sobrecargas se previeron dobelas (fig. 33) que toman el esfuerzo cortante entre la losa y la viga. Para el peso propio de la viga y la pretensión, ésta actúa como viga rectangular. En el diseño se consideró el efecto que so

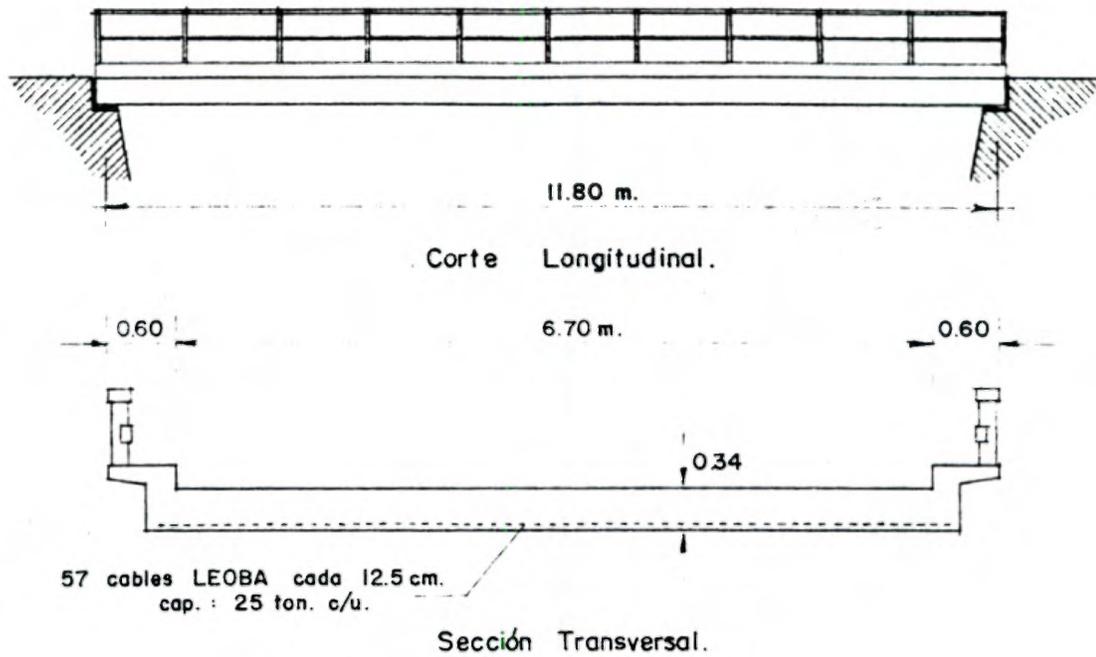


Fig. 30
Puente sobre Rio Damas.
Losa de Concreto Postensado.

Min. Obras Públicas.

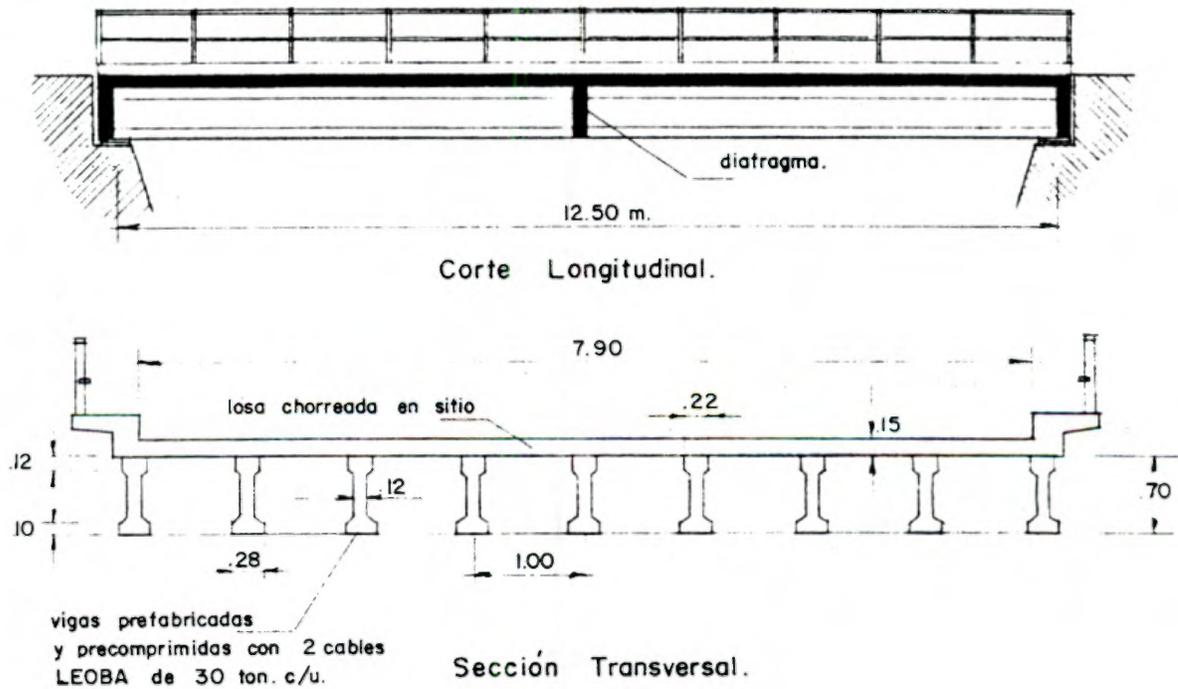


Fig. 31
Puente de Colima.
Vigas I Prefabricadas.

Min. Obras Públicas.

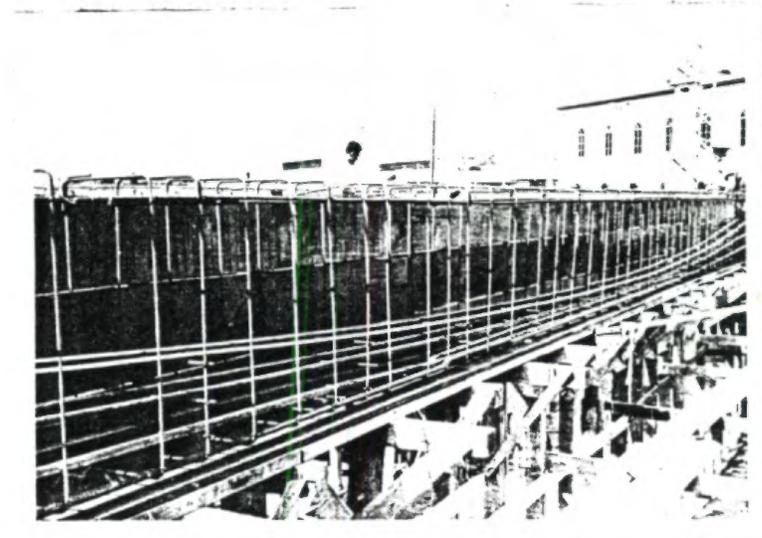


Fig. 32.

Detalle de la armadura y de los cables. Vigas de 16.0 m. de luz. - Ministerio de Obras Públicas, Plantel Central.



Fig. 33.

Ministerio Obras Públicas, Plantel Central. Vigas terminadas, antes de chorrear la losa; dobelas formadas por los estribos proveen la adherencia con la losa haciendo trabajar la viga como T.

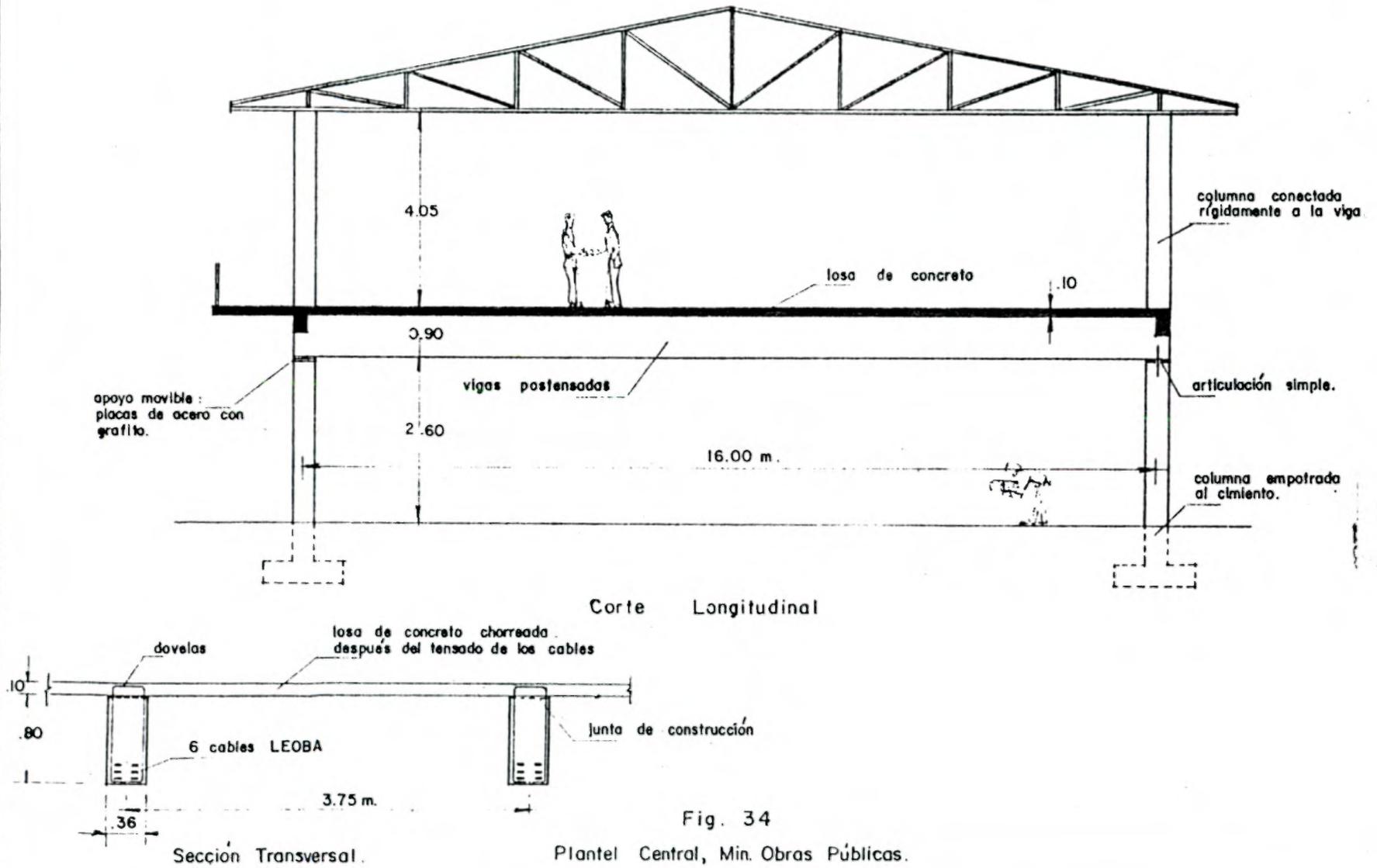


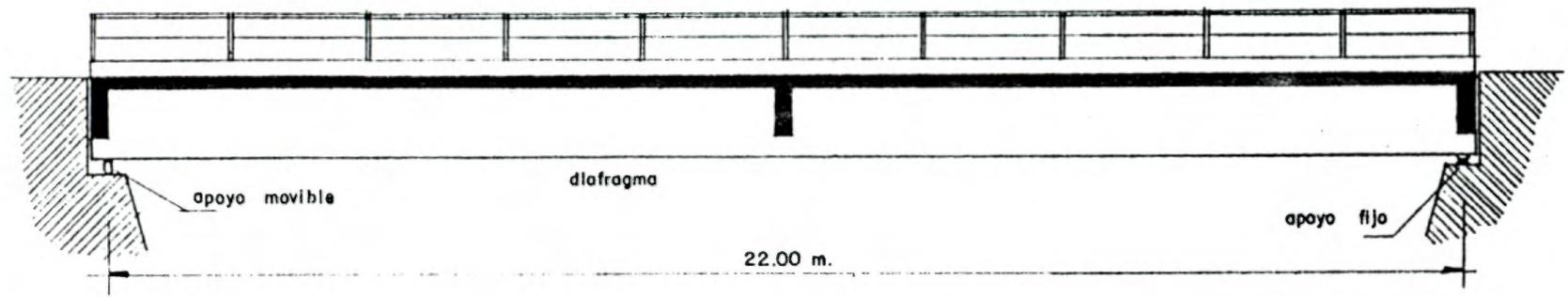
Fig. 34

Plantel Central, Min. Obras Públicas.

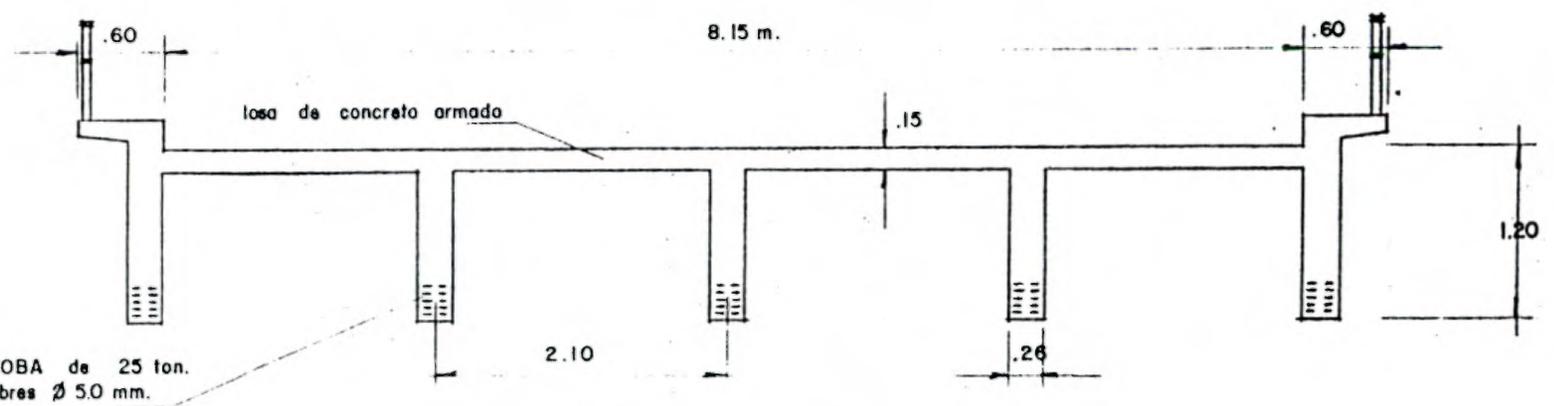
bre los esfuerzos produce la diferencia de retracción entre el concreto de la losa y de la viga. Las vigas son simplemente apoyadas; en un extremo tienen una articulación sencilla de concreto y en el otro, dos placas de acero con una capa de grafito proveen el movimiento necesario para la contracción de la viga; este tipo de apoyo movable fue necesario, ya que cuando se inició el diseño, ya las columnas soportantes estaban construídas, lo que no permitió disponer una columna pendular. Las vigas tienen un ancho de 36 cm. y una altura de 80 cm. más el espesor de la losa, que da una altura total de 90 cm. Cada viga lleva 6 cables LEOBA, cuya disposición se puede apreciar en la fig. 32. La separación de las vigas es de 4.00 m.

d. - Puente sobre el Río Cañas, Desamparados, M. O. P.

La sección de este puente consiste de 5 vigas de forma T con una altura de 1.20 m. y un grueso de 26 cm. en el nervio (fig. 35). La separación de las vigas es de 2.10 m. y el espesor de la losa del piso de 15 cm. con una capa adicional de asfalto de $3/4$ " para la superficie de rodamiento. La luz del puente es de 22.00 m. c. a. c. y el ancho de la vía es de 8.14 m. Cada viga se pretensa con 8 cables LEOBA de cada uno 12 alambres de 5.0 mm. de diámetro. Al centro de la luz se dispuso un diafragma para distribuir las cargas más uniformemente en las diferentes vigas. El puente se diseñó para una carga H 20, estando en el trayecto de la ruta proyectada a Quepos, en la cual se puede esperar un tráfico pesado. Para tomar los esfuerzos de tensión que se suceden para la carga viva total se colocaron en la parte inferior varillas de $5/8$ " de diámetro; sin embargo, la fuerza de tensión es tal que para carga muerta total más la mitad de la carga viva no se sucedan tensiones. Fuera de unas varillas de $1/2$ " de diág



Corte Longitudinal



10 cables LEOBA de 25 ton.
con 12 alambres \varnothing 5.0 mm.

Seccion Transversal

Fig. 35
Puente sobre Rio Cañas, Desamparados.
Vías T. de Concreto Postensado

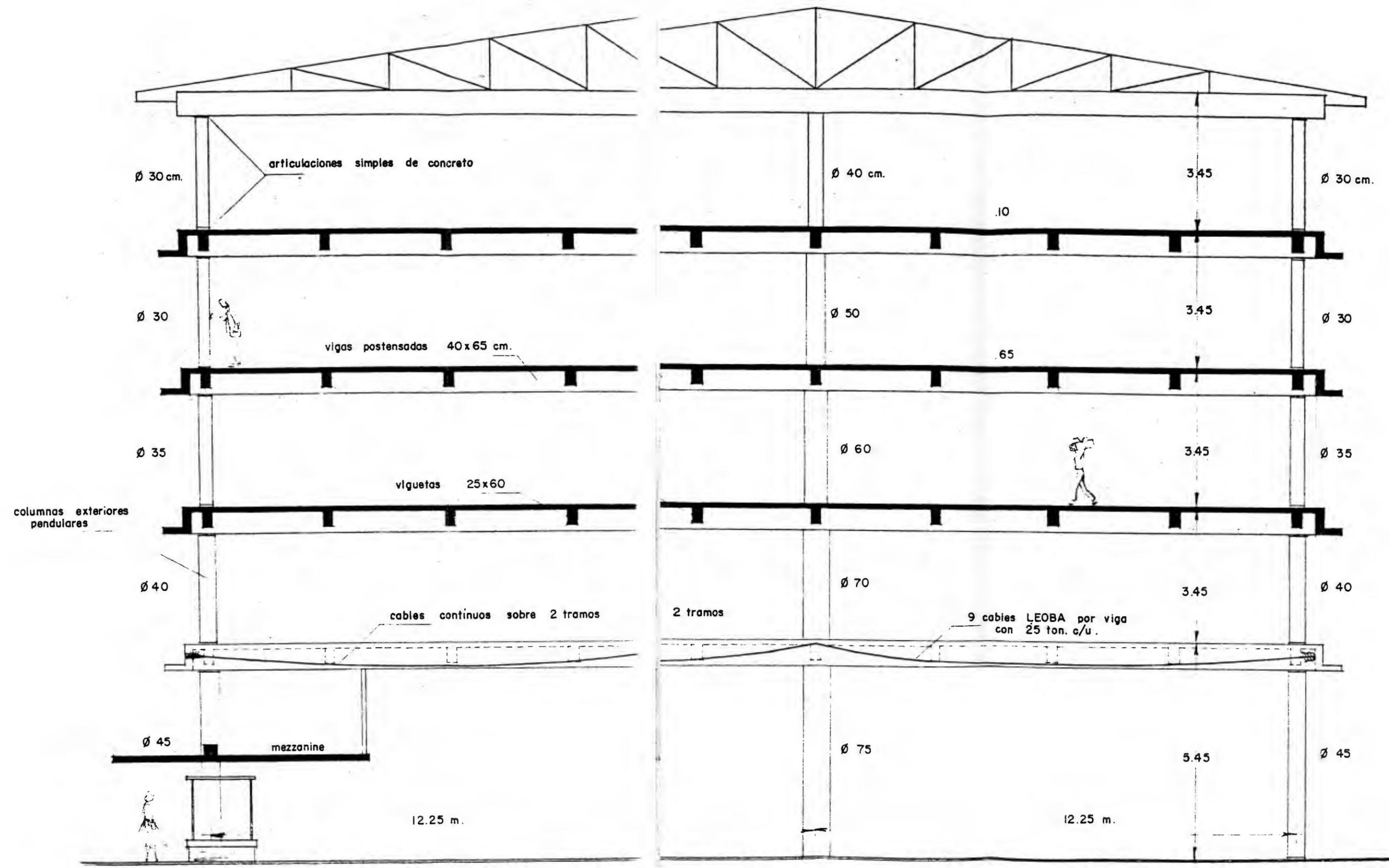
metro que forman la canasta, se colocó un refuerzo de estribos nominal, ya que los esfuerzos diagonales se reducen considerablemente debido a la precompresión y a la curvatura de los cables. -

e. - Puente de Colima M. O. P.

Para sustituir un tramo del puente de Colima, que está en estado defectuoso, se proyectó prefabricar las vigas con el objeto de acelerar su construcción y de interrumpir el tráfico solamente por un período corto. Las vigas son de forma I de 70 cm. de altura (fig. 31). El grueso del nervio es de solamente 12 cm. y cada viga lleva 2 cables LEOBA, que se pretensan antes de erigir las vigas. Estas se fabrican cerca del sitio y se transportan sobre rodillos y rieles de acero, haciéndolas mover con la ayuda de un winch. Colocadas en su posición final, se chorrea una losa de concreto de 15 cm. de espesor apoyando la formaleta sobre las propias vigas. Para las sobrecargas la losa actúa conjuntamente con la viga como viga T. A pesar del pequeño espesor del nervio, los esfuerzos diagonales se mantienen dentro de límites bajos. La luz del puente es de 12.00m y está diseñado para carga H 15. -

f. - Propuesta para un Edificio Comercial en la Avenida Central.

Este proyecto, que no se pudo llevar a la práctica debido a la rapidez con que fue necesario iniciar los trabajos y la que no dió tiempo para finalizar este estudio, se presenta aquí por ser un ejemplo típico de las posibilidades del concreto postensado en la construcción de edificios comerciales o industriales. La estructura de este edificio de 5 pisos es un marco rígido con vigas continuas sobre 2 tramos de 12.25 m. Todas las co



separación entre columnas : 12.25 x 6.80 m.

Fig. 36

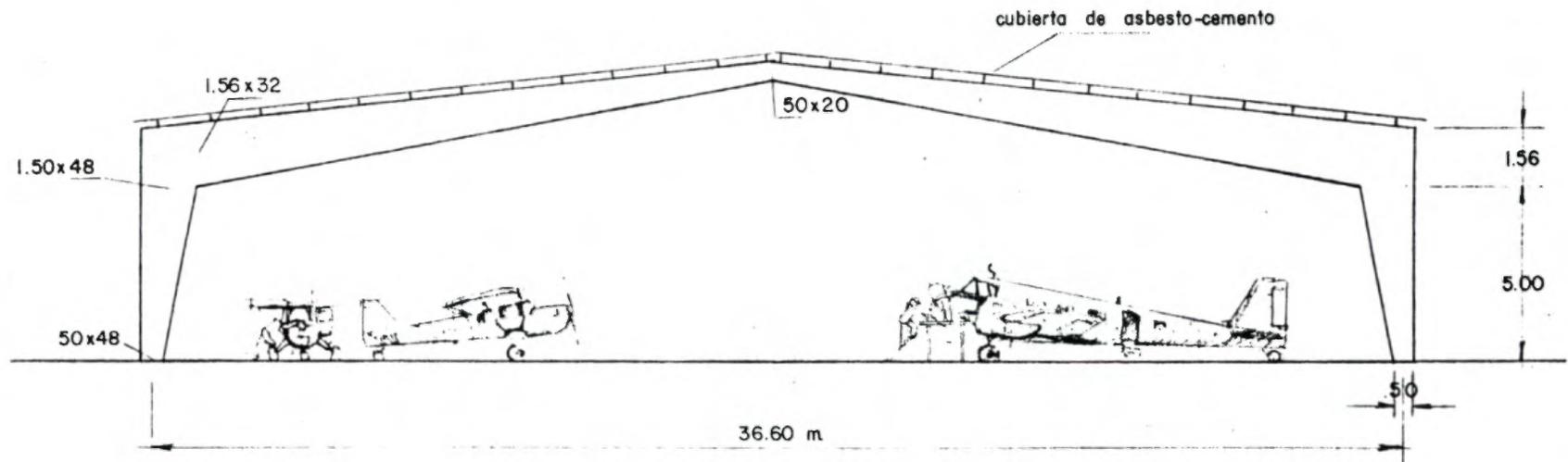
Edificio Comercial, Ave. Central, S.J.
Vigas continuas sobre 2 tramos sobre 2 Tramos - Marco Rígido de 5 Pisos

lumnas exteriores se proyectaron como columnas pendulares, para permitir la contracción de las vigas debido a la precompresión y al efecto del flujo plástico y retracción. La columna central es monolítica con las vigas y toma el momento debido a la fuerza horizontal producida por el temblor o el viento. La sección de la viga es de 40 cm. de ancho por 65 cm. de altura y se pretensa cada una con 9 cables que pasan sobre el apoyo desde un extremo al otro en forma continua. -Para disminuir las pérdidas de fricción debido a la curvatura del cable, estos se tensan desde ambos extremos. Las cargas que debe soportar son, fuera de la carga muerta, $200\text{kg}/\text{m}^2$. para carga viva, $100\text{kg}/\text{m}^2$. para considerar el efecto de las divisiones interiores y $100\text{kg}/\text{m}^2$. para el peso del mosaico y repello. La losa de concreto se refuerza paralelamente a la viga principal y se apoya en viguetas con una separación de 3.00m. Los marcos pretensados tienen una separación de 6.75 m., con lo que se obtienen módulos de 12.05 x 6.75 m. en la distribución de las columnas. Para el arquitecto esto da una idea muy clara de lo que el concreto pre-esforzado puede significar como material de construcción útil en el planeamiento de futuros proyectos. -

g. - Hangar para el Aeropuerto El Cocco. Aeronáutica Latino-Americana. -

Un estudio realizado por el Doctor Ingeniero Fritz Leonhardt, de Alemania, para la construcción de un hangar en el Aeropuerto El Cocco, es un marco de tres articulaciones con una luz total de 36 m. libres, y una separación de 6.00 m. Tanto la viga como la columna son de sección variable y llevan cada una 4 cables LEOBA, que se tensan desde el nudo del marco. La sección de la viga es de 1.56 m. x 32 cm. y

separación entre marcos : 5.00 m. c.a.c.



Alzada Principal.

Fig. 37.

Hangar para el Aeropuerto 'El Coco.'
A.L.A. - Aeronáutica Latino-Americana.

Marco Postensado de 3 Articulaciones.

reduce a 50 x 20 cm. en la articulación central . Para poder acomodar los anclajes de los cables en el nudo del marco, se le dió a la columna un ancho constante de 48 cm y la sección reduce a 50 x 48 cm. en la articulación inferior . Dos de los cables de la viga se anclan a aproximadamente $1/4$ de la luz; un cable se corta a una corta distancia antes de la articulación y el cable restante se pasa por la misma hasta el otro lado del marco, cruzándose con otro cable simétrico de la otra mitad. La cubierta del hangar es de láminas de asbestocemento apoyadas sobre correas (purlins) de acero I. La carga viva es de 5 kg/m^2 que es suficiente para tomar en cuenta el peso de operarios en caso de reparaciones. Además se consideró el efecto del temblor con una fuerza horizontal de $1/20g$, actuando en el centro de gravedad de los miembros y el efecto del viento para una velocidad máxima de 80 mph. -

Capítulo X

Aplicaciones Especiales del Concreto Pre-esforzado

10.1 Postes de Alumbrado.

Postes de concreto pretensado para líneas eléctricas o de alumbrado han obtenido cada día mayor aplicación debido a las ventajas que ofrecen sobre los otros tipos de postes, tales como los de madera, de acero tubular o de concreto armado o centrifugado. El tiempo de duración de un poste pretensado es prácticamente ilimitado y no requiere ningún mantenimiento. Su costo ha resultado menor que el de concreto centrifugado, y debido a la grave escasez de acero, considerablemente menor que el poste de acero tubular. El poste pretensado se caracteriza por su esbeltez y elegancia (fig. 38); debido a la sección hueca tiene un peso relativamente pequeño, lo que reduce el costo de transporte y facilita el manejo.

Además presenta todas las ventajas del concreto pretensado, siendo muy resistente a las sobrecargas y permaneciendo libre de grietas durante el tiempo de servicio. En una prueba de carga de un poste de 10 m. de longitud, se empotró el poste en la base de manera que su extremo se pudiera deflecionar libremente en una longitud de 8.2 m. El poste, calculado para resistir una fuerza de 200 kg. en la cúspide, se sometió a una carga de 100 kg., obteniéndose una deflexión de 1.48 m. En la zona de compresión el concreto permaneció intacto y en la zona de tensión

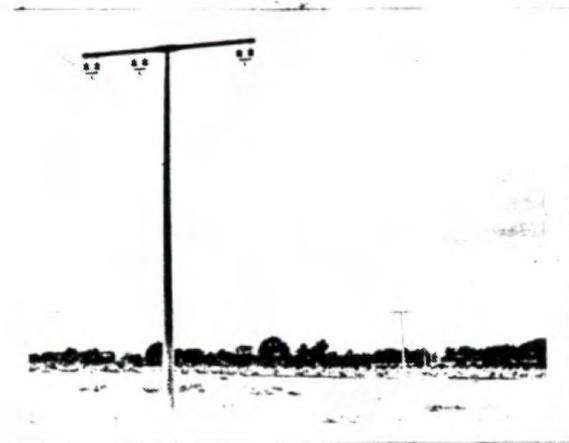


Fig. 38.

Líneas de transmisión con postes de concreto pretensado. Se observa especialmente la forma elegante de los postes (Sistema Giese)

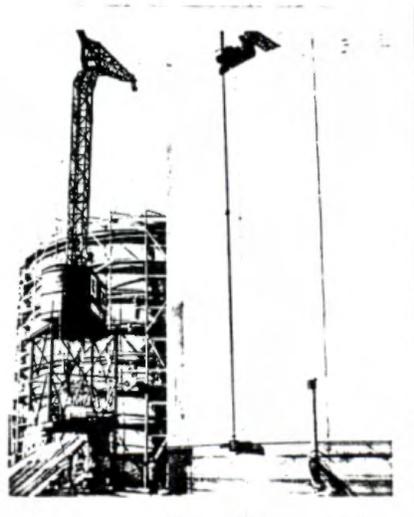


Fig. 39.

Precompresión de depósitos circulares según el sistema BBRV. El sistema de ruedas es impulsado por un motor que corre en el borde superior alrededor del tanque, arrollando de esta manera el a lambre a tensión. -

aparecieron grietas, finas, que después de remover la carga desaparecieron por completo. El poste pudo ser usado de nuevo y después de la prueba no quedaron deformaciones permanentes. Este hecho sorprendente demuestra la gran elasticidad y flexibilidad del concreto pretensado. -

Los postes se fabrican generalmente en lechos de tendido, consistiendo cada bancada de 4-8 moldes. Para reducir el peso de los postes se emplean preferiblemente sólo concretos con resistencias de 600kg/cm^2 . (aproximadamente 7000lb/pulg^2 .) o más. La sección del poste es cilíndrica y hueca, o rectangular, y reduce su diámetro en forma cónica. Los moldes son de metal y consisten de dos secciones semicilíndricas y de un núcleo interior, que se retira luego para darle la forma hueca al poste. En instalaciones grandes se ha generalizado el curado del concreto con vapor de agua, lo que permite acelerar el proceso de fabricación; si se prescinde de este tipo de cura, se emplean acelerantes como aditivos, para obtener un mayor uso de los moldes, que representan un porcentaje grande del costo total de la inversión. -

Habiendo realizado un estudio económico detenido, la Pretensora de Concreto S. A. proyecta la instalación de una planta para la producción de postes en Costa Rica. -

10.2 Durmientes para Ferrocarril.

A pesar que este tipo de aplicación del concreto pre-esforzado todavía está en una etapa de experimentación, ya existen grandes trayectos de vía construídos con traviesas pretensadas, que han dado resultados satisfactorios. Actualmente los Ferrocarriles Alemanes han ido cancelando gradualmente los pedidos de durmientes de madera y han genera -

lizado el empleo de durmientes de concreto pretensado: existen ya varias plantas que operan cada una con una capacidad de 400,000 - 500,000 traviesas por año, lo que representa una gran parte de las necesidades de los ferrocarriles alemanes. -

A igual que para concreto postensado, existen diferentes sistemas para la fabricación de traviesas, lo que confunde al principio al técnico, principalmente al novato en la materia. Aquí nos concretamos a dar una idea general del método de fabricación BBR-THOSTI, que es un método desarrollado conjuntamente por ingenieros alemanes y suizos, relativamente nuevo pero con resultados muy halagadores. -

Los moldes de metal son suficientemente rígidos para resistir la fuerza de tensión de los alambres, mientras endurece el concreto, evitando la necesidad de bastiones fuertes. Los alambres en número de 4 tienen un diámetro de 8 mm. y anclan contra el molde por medio de pequeños cabezotes que se le forman en el extremo del alambre. La fuerza de tensión se transmite al concreto soltando la unión con el molde. El riel se apoya sobre la traviesa por medio de placas de acero especiales; para sujetar la placa al concreto se proveen pequeñas perforaciones cónicas, que se llenan con baquelita o madera y en la cual se atornilla un perno de forma de tirabuzón. La traviesa debe apoyarse sobre el lastre únicamente debajo de los rieles para distribuir uniformemente la presión y para evitar que en la sección central se sucedan momentos de flexión. Esta es generalmente más esbelta que los extremos y no tiene contacto con la base y en algunos tipos de traviesa se ha hecho con riel de acero, que simplemente tiene el objeto de mantener la separación exacta entre los rieles; sin embargo, este tipo de durmiente no ha dado resultados, ya que

en descarrilamientos es fácilmente retorcida. -

El costo inicial del durmiente de concreto pretensado es todavía bastante elevado con relación al de madera, pero presenta frente a este otro tipo, una mayor duración que puede variar entre 40 a 60 años sin mantenimiento alguno. La vida útil de una traviesa de madera, con el tratamiento previo que se le da en Costa Rica, es de apenas unos 15 años en promedio. Actualmente se están llevando a cabo los pasos necesarios para un estudio completo del costo de las traviesas pretensadas en Costa Rica y la posibilidad de su aplicación a los ferrocarriles nacionales y se proyecta la realización de un trecho de prueba de aproximadamente 500 durmientes, que lo llevará a cabo en conjunto el Ferrocarril al Pacífico y la Pretensora de Concreto S. A.

10.3 Tanques y Depósitos Circulares.

Para almacenar agua, aceite u otros líquidos han dado los depósitos de concreto pre-esforzado considerables ventajas, especialmente en U. S. A., donde la Preload Company ha trabajado desde aproximadamente 20 años en este tipo de aplicación. - Si se aprovechan las altas resistencias del concreto, se obtienen aun en depósitos altos espesores de pared extremadamente pequeños, que, aun sin la aplicación de impermeabilizantes, permanecen, debido a la ausencia de grietas, impermeables. -

El ingeniero suizo Vogt ha desarrollado un sistema muy sencillo, que se basa en el mismo principio de la Preload Co., y que es conocido corrientemente con la designación BBRV. Consiste en una serie de ruedas y engranajes que corren alrededor del tanque arrollando el

alambre a presión. Este aparato es impulsado por un motor de 5 HP., que corre arriba alrededor del borde y está unido al centro del depósito por medio de un brazo de acero. La tensión se le aplica al alambre por medio del sistema de ruedas y su principio consiste en que el alambre es gradualmente desarrollado de una carrucha, cuyo perímetro es menor que el de la rueda que corre sobre la pared del depósito en una cantidad igual a la elongación necesaria del alambre. Estas ruedas son movidas por el motor al cual están unidas por medio de una barra vertical la cual controla además el paso (pitch) del alambre. El alambre empleado es de aproximadamente 4 mm. Con este sistema se pueden precomprimir depósitos de 5 m. a 100 m. de diámetro con alturas hasta de 24 m. La superficie exterior del depósito se cubre con una capa de Torkret, que consiste en imprimir el mortero de cemento a presión, para proteger el alambre de la corrosión. -

10.4. Tuberías.

La pretensión de tuberías de presión se llevó a muy temprana edad a la práctica, habiéndose obtenido mayores ventajas con relación a los otros tipos de tubos de concreto. Los tubos precomprimidos tienen la ventaja especialmente de que no son dañados por las sobrecargas. Se ha demostrado por medio de pruebas que tubos sometidos a una presión exagerada, si se agrietan, pero debido al agua que brota por la grieta se evita a modo de válvula un aumento de la presión; en cuanto desaparece la sobrepresión los tubos se vuelven impermeables, ya que la fuerza de precompresión cierra nuevamente las grietas. -



Fig. 40.

Tubos de concreto pretensado
Sistema BBRV.

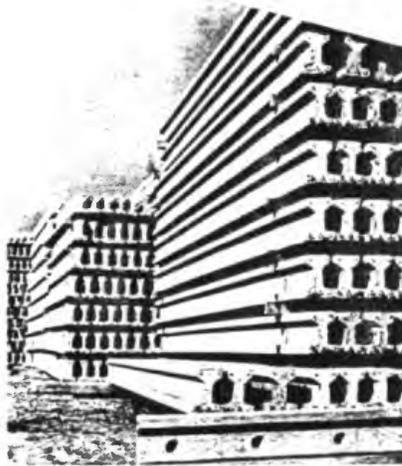


Fig. 41.

Viguetas de Concreto pretensado

Para la aplicación de la fuerza de tensión existen también diferentes sistemas, uno de los cuales ha sido desarrollado por la firma BBRV, que ha obtenido también considerable éxito en la pretensión de depósitos y durmientes. El tubo gira alrededor de un eje vertical (fig 40) y el alambre se arrolla alrededor del mismo haciéndolo pasar por un sistema de ruedas, que le imprimen la tensión. Esta es una variación del mismo sistema para la precompresión de depósitos. Los alambres se cubren posteriormente con Torkret. -

10.5 Losas y Viguetas.

Gran aplicación ha tenido el concreto pretensado sobre todo en la fabricación viguetas para sistemas de losas prefabricadas, para edificios y puentes en general, donde el uso de vigueras en muchos casos ha sustituido el empleo de secciones de acero laminado. Llegará el día en que habrán manuales y tablas con los valores de sección de diferentes tipos de viguetas pretensadas, que serán suministrados por la fábrica en tamaños standard, la fig. 41 da una idea de la producción en serie de viguetas, cuyo uso es muy variado. Se emplean generalmente para puentes de luces pequeñas en sustitución de las vigas de acero I; en la construcción de edificios se emplean para dinteles o cargadores de puertas y ventanas, y sobre todo para losas prefabricadas (fig43); estas losas consisten de viguetas espaciadas cada 50 - 65 cm. entre las cuales se intercalan blocks de cemento. Las viguetas pueden ser manejadas fácilmente por dos hombres y se transportan al sitio de construcción por medio de camiones apropiados. La erección no presenta dificultad alguna y ofrece la ven

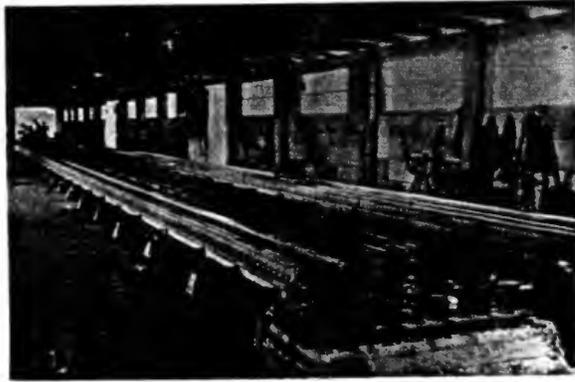


Fig. 42.

Planta para la fabricación de viguetas pretensadas. En el extremo próximo se observan los bastiones que resisten las fuerzas de pretensión. -



Fig. 43.

Losa prefabricada consistente de viguetas pretensadas y blocks de concreto intercalados. -

taja de economizar la formaleta para la losa. Después de colocados los blocks, se chorrea una pequeña capa de concreto que amarra monolíticamente las viguetas y forma una superficie de desgaste; esta operación no requiere formaleta. Por debajo queda una superficie casi lisa, que luego se repella, si se prescinde de un plafond falso. Este tipo de losa tiene propiedades acústicas muy grandes y las luces que se obtienen de esta manera son de 6 a 8 m., aun hasta 11 m. -

En los lechos de tensado se producen además todo tipo de miembros pretensados, tales como poseen para cercas, losas y bal-fosas, etc. -

FSF-mao.