

EL PRETENSADO CONSIDERADO COMO ACCION COMPENSADORA DE LAS CARGAS EXTERIORES(*)

Por JUAN J. ARENAS DE PABLO

Dr. Ing. de Caminos, Canales y Puertos.

Partiendo de la idea fundamental de que el pretensado es una acción exterior a la estructura, voluntaria y regulable, se plantean, desde un punto de vista principalmente intuitivo, una serie de cuestiones básicas tales como las solicitaciones que aquél introduce en estructuras isostáticas e hiperestáticas, la seguridad a rotura de obras continuas pretensadas y algunas consideraciones sobre efectos secundarios de compensación en diversas estructuras.

Aunque se ha omitido todo cálculo o expresión numérica, las ideas expuestas permiten pasar directamente al cálculo de la acción de pretensado, aplicando la teoría general de estructuras.

En cualquier caso, la base de este trabajo es el entendimiento del pretensado y su concepción intuitiva como acción exterior voluntaria, compensadora de las cargas exteriores impuestas.

1. Introducción.

Con acierto se ha definido gráficamente al pretensado de una estructura como una traslación del origen, en un hipotético eje representativo de las acciones, solicitaciones y tensiones de la misma (1).

En efecto, todas las ventajas que el pretensar representa pueden ser sintetizadas en un simple esquema lineal (fig. 1).

La interpretación del esquema es simple:

Una obra no pretensada sometida a un estado de acciones que oscila desde un mínimo de \vec{OS}_1 hasta un máximo de \vec{OS}_2 , pasa mediante la traslación de origen que representa la acción de pretensar ($-\vec{OO}'$), a la nueva situación limitada por $\vec{O'S}_1$ (mínimo) y $\vec{O'S}_2$ (máximo).

(1) Guyon.

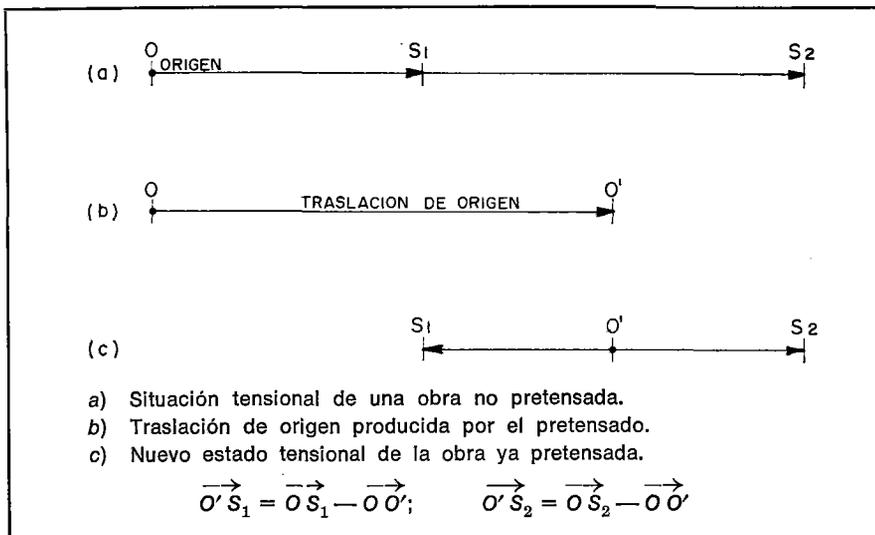


Figura 1.

(*) Se admiten comentarios sobre el presente artículo, que pueden remitirse a la Redacción de de esta Revista hasta el 31 de mayo de 1974.

La comparación visual entre los módulos de $(\vec{O}S_2)$ y de $(\vec{O}'S_1, \vec{O}'S_2)$ como magnitudes representativas del estado de sollicitación de la estructura es suficientemente expresiva de las ventajas tensionales de una estructura pretensada.

Por supuesto que estas ventajas sólo existirán en la medida en que el nuevo origen (O') se sitúe en la zona adecuada. Y ésta no es otra que la próxima al punto medio entre S_1 y S_2 . A un nivel muy teórico y olvidándonos de cuestiones de detalle, podemos afirmar que el pretensado ideal sería aquel que ejerciera sobre una estructura dada una acción igual y contraria a la media (S_m) entre la mínima (S_1) y la máxima (S_2) que solicitan a dicha estructura.

$$S_m = \frac{-1}{2}(S_1 + S_2).$$

2. La acción del pretensado.

Llegados a este punto, parece interesante recordar en qué consiste la acción que podemos ejercer sobre una estructura mediante el pretensado. Limitaremos nuestras consideraciones al tipo más habitual de pretensado, o sea, el que se ejerce mediante cables de acero, entubados, dispuestos con excentricidad variable a lo largo de una estructura, y tesos entre dos anclajes extremos, activos o pasivos.

Otros tipos de pretensado o pre-coacción que pueden obtenerse mediante desnivelaciones de apoyos en vigas continuas, gatos planos en firmes de hormigón, etc., se salen de lo que vamos a tratar en cuanto a sus detalles, si bien coinciden plenamente con la filosofía básica de la traslación del origen tensional.

Como es bien sabido, la acción de pretensado de un cable sobre una estructura (2) es la suma de las siguientes acciones parciales (figura 2):

- a) Fuerzas concentradas en los anclajes.
- b) Fuerzas repartidas de desviación produ-

(2) La palabra estructura debe interpretarse, en este caso, como toda ella menos el cable o cables de pretensado todavía no inyectados. Consta, por tanto, del hormigón propiamente dicho, del acero pasivo y adherente en él sumergido y los posibles cables ya tesos e inyectados y, por consiguiente, solidarios del hormigón que les rodea en las nuevas deformaciones que éste toma.

La estructura con cables inyectados es lo que llamamos estructura homogeneizada.

cidas por la curvatura del cable, proporcionales a esta curvatura, y dirigidas según la normal al cable en cada punto.

c) Fuerzas repartidas de rozamiento, dirigidas según la tangente a la trayectoria del cable.

Desde el momento en que el cable una vez teso y anclado queda en equilibrio, hemos de concluir que la suma de todas las acciones (a) + (b) + (c) da resultante y momento nulo en cualquier punto del espacio.

O sea, el pretensado es una acción sobre la estructura, carente de resultante exterior.

Esta es una de las diferencias más importantes que podemos establecer entre acción de pretensado y acciones exteriores.

Otras diferencias a consignar serían:

a) El pretensado es acción voluntaria y regulable en tiempo e intensidad.

b) Al pasar de la fase elástica de la estructura y aumentar proporcionalmente todas las cargas exteriores acercándonos a la rotura, la acción del pretensado no crece linealmente con aquéllas.

La consecuencia inmediata es la no linealidad de las sollicitaciones y tensiones internas una vez superada la fase elástica o de servicio, respecto a las de esta fase.

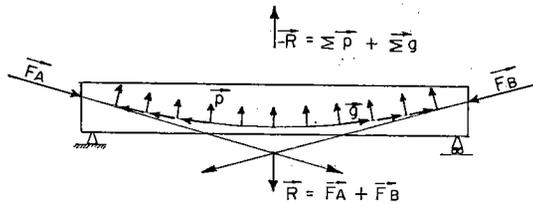
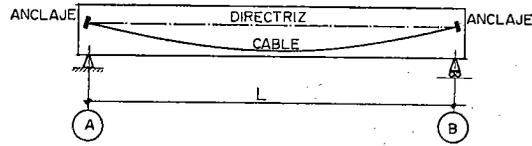
c) Los cables de pretensado crean un estado de pretensión y predeformación en el momento de su puesta en tensión. Una vez inyectados, y para todas las sollicitaciones que aparezcan posteriormente a su inyección, actúan como armaduras adherentes.

En la fase de servicio o fase elástica es la pre-compresión de la estructura el fenómeno más importante.

En la fase de rotura, la precompresión desaparece totalmente como realidad física, y deja el paso a la predeformación. En efecto, en el agotamiento la diferencia básica entre una armadura pretensada y otra pasiva son los alargamientos que ambas tienen en un estado cualquiera de referencia, como, por ejemplo, el estado permanente de la estructura. La armadura pretensa tiene siempre por encima de la otra el prealargamiento que sufrió en el momento de su puesta en tensión, algo disminuido por las pérdidas posteriores.

Es este pre-alargamiento el que permite al

2-a. *Viga isostática simplemente apoyada.*



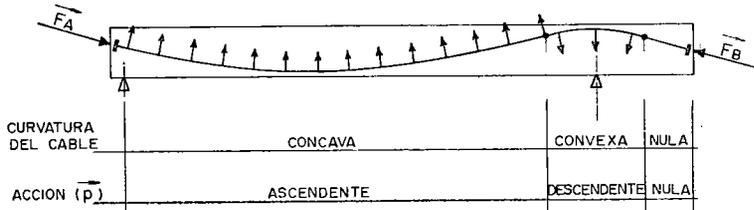
\vec{F}_A, \vec{F}_B = Fuerzas concentradas ejercidas en los anclajes.

\vec{p} = Fuerza repartida de desviación = $N_D \cdot y''$.

\vec{g} = Fuerza repartida de rozamiento.

Se tiene: $(\vec{F}_A + \vec{F}_B) + \int_A^B \vec{p} dx + \int_A^B \vec{g} dx = 0$

2-b. *Viga isostática con un voladizo.*



2-c. *Viga continua de dos vanos con inercia variable.*

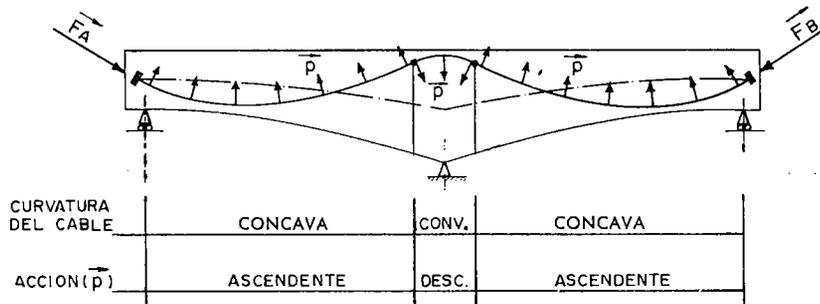
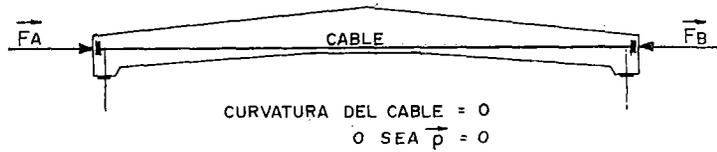
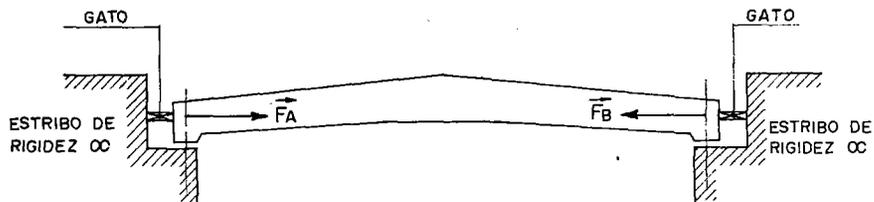


Fig. 2. — Diversos tipos de acciones de pretensado sobre una estructura.

2-d. *Viga de inercia variable con cable recto.*



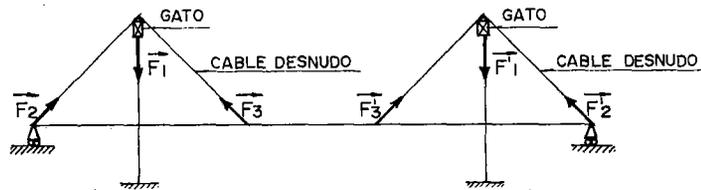
2-e. *Viga de inercia variable pretensada mediante gatos exteriores, sin cable.*



NOTA: La acción de pretensado sobre la estructura, es idéntica en los casos (d) y (e). El comportamiento de ambas estructuras sería similar en fase de servicio, pero muy diferente en el agotamiento.

El pretensado (e) exigiría, además, un mantenimiento a largo plazo de la presión en los gatos, para compensar el acortamiento diferido del hormigón.

2-f. *Dintel atirantado.*

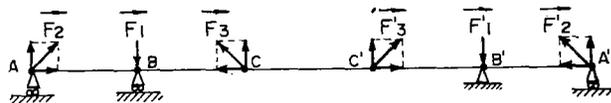


NOTA: Este es un caso de pretensado con cable exterior a la estructura.

Se tiene: $\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 = 0$.

El concepto de fuerzas de rozamiento carece aquí de sentido.

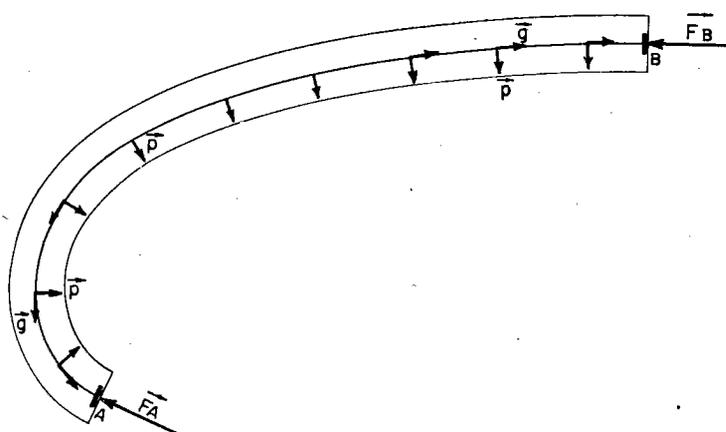
La acción exterior sobre el dintel es:



Obsérvese que además de los esfuerzos de flexión internos que originen las componentes verticales de F_2 , F_3 , F'_3 y F'_2 , aparece una compresión axial entre (A y C) y entre (C' y A'). La zona de dintel entre (C y C') no queda comprimida.

Figura 2. (Continuación.)

2-g. Pieza curva con pretensado centrado.



Como siempre, se tendrá:

$$\vec{F}_A + \vec{F}_B + \int_A^B \vec{p} dx + \int_A^B \vec{g} dx = 0$$

Obsérvese que, en el caso del pretensado axial, la única deformación que sufre la pieza es de acortamiento. A pesar de la curvatura de la pieza, el pretensado no engendra flexión alguna.

Figura 2. (Conclusión.)

acero duro de pretensado alcanzar su carga de rotura junto con el acero pasivo, siempre que la cuantía mecánica no sea excesiva.

Resumiendo esta tercera diferencia, podremos decir que las cargas exteriores, al amplificarse hacia el estado de rotura, son siempre cargas exteriores, mientras que el pretensado, que comienza siendo una sollicitación exterior a la estructura en el sentido de (2), evoluciona hacia un prealargamiento del acero duro y un preacortamiento del hormigón de la estructura homogeneizada en el estado de rotura (3).

3. El pretensado, como cualquier acción exterior, provoca deformaciones elásticas.

Pero, y volviendo a la primera diferencia consignada, aunque la acción total del pretensado tenga resultante nula, es bien sabido que:

(3) Esto, que es rigurosamente válido para las estructuras isostáticas, requiere algunas matizaciones en las hiperestáticas. Véase el apartado 6.

1. Sobre cada rebanada elemental de la estructura, el pretensado ejerce una sollicitación dada (que podemos reducir a los clásicos axil y esfuerzos cortantes y momentos flectores según los dos ejes principales de inercia de la sección, más el momento torsor), la cual provoca deformaciones elementales en aquélla.

2. La integración de estas deformaciones elementales conduce a unos movimientos en los apoyos. Si tales movimientos son aceptables para las vinculaciones de apoyo, éstos no darán reacción sobre la estructura.

En el caso más general de que dichos movimientos no sean compatibles con tales vinculaciones, aparecerá un conjunto de reacciones de los apoyos sobre la estructura. Es claro que este conjunto de reacciones, llamadas reacciones hiperestáticas de pretensado, deben satisfacer estas dos condiciones:

- a) Tener una resultante general nula.
- b) Hacer que los corrimientos totales de los apoyos, suma de los originados por las de-

formaciones elementales del pretensado isostático o pretensado directo de cada sección, y de las deformaciones debidas a los esfuerzos internos engendrados por dichas reacciones hiperestáticas, sean compatibles con las vinculaciones de dichos apoyos.

3. Al ser los movimientos de apoyos provocados por el pretensado, admisibles por las sustentaciones de las estructuras isostáticas, las llamadas reacciones y esfuerzos hiperestáticos internos de pretensado no existen en ellas.

Esto significa que en cada rebanada diferencial el pretensado actúa como dos fuerzas de compresión iguales y contrarias, situadas a nivel del cable, y con dirección tangente al mismo.

Es el caso de las estructuras representadas en las figuras 2-a-b-d-e-g.

Por ejemplo (fig. 3):

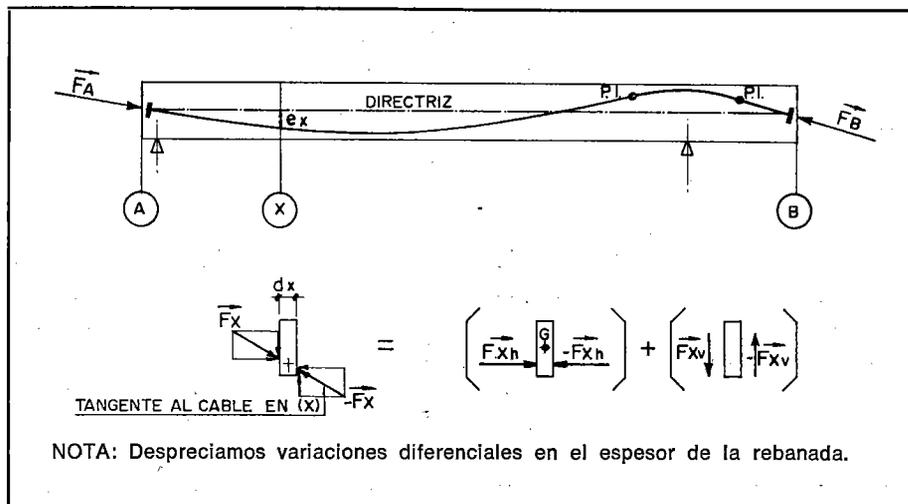


Figura 3.

En la sección (x) tendremos:

$$\vec{F}_x = \vec{F}_A + \int_A^x \vec{p} dx + \int_A^x \vec{g} dx,$$

y también:

$$\vec{F}_x = \vec{F}_B + \int_B^x \vec{p} dx + \int_B^x \vec{g} dx.$$

Y pasando a ecuación escalar, podremos de-

cir desde el momento en que las (\vec{p}) son fuerzas normales al cable:

$$F_x = F_A + \int_A^x g dx = F_B + \int_B^x g dx$$

(g = fuerzas de rozamiento negativas).

En el caso teórico de rozamiento nulo será:

$$F_x = F_A = F_B,$$

conclusión bien conocida de la teoría de los hilos.

4. En cambio, las estructuras hiperestáticas no admitirán, en general, las deformaciones del pretensado en sus órganos de apoyo, y provocarán reacciones adicionales y esfuerzos internos.

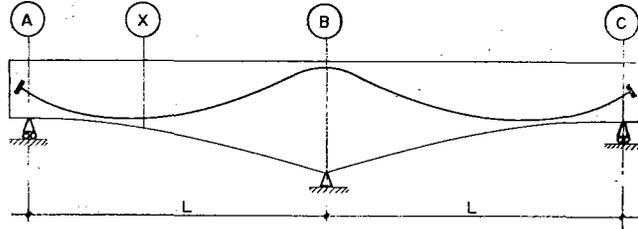
Esto supondrá que en una sección genérica (X) de una tal estructura, la acción del pretensado no coincidirá ya, en general, ni con la

posición ni con la dirección del cable, ni con la intensidad de la fuerza del mismo.

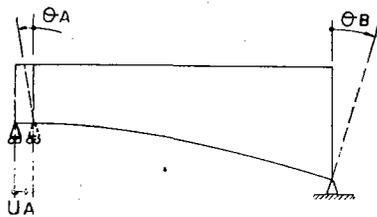
Sucede esto porque a la acción isostática del pretensado se superponen unos esfuerzos internos, que pueden descomponerse en el caso de estructuras lineales planas en:

- a) Axil hiperestático de pretensado.
- b) Flector hiperestático de pretensado.
- c) Cortante hiperestático de pretensado.

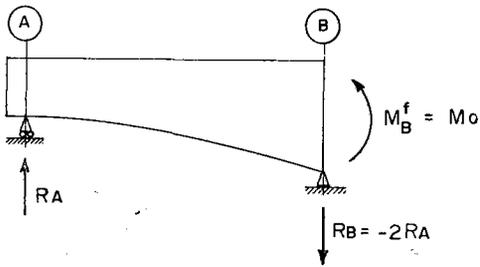
a) Esquema.



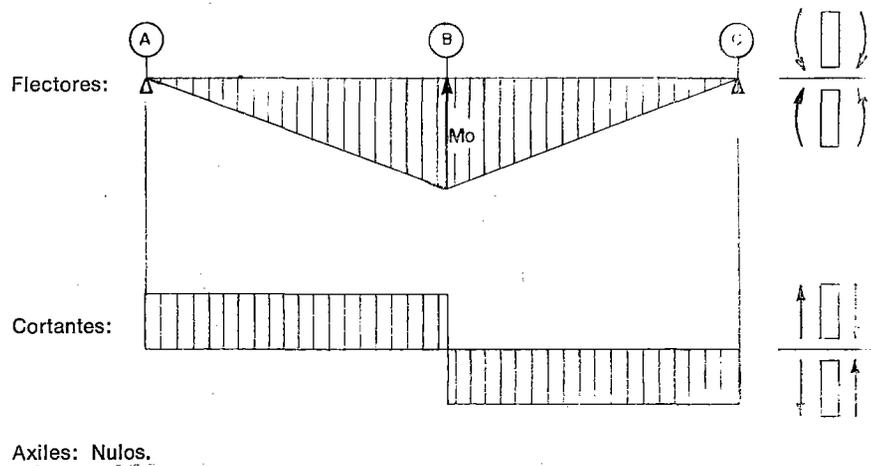
b) Deformaciones en la estructura isostática asociada.



c) Reacciones y esfuerzos hiperestáticos.



d) Leyes de esfuerzos hiperestáticos internos, debidos al pretensado.



Axiles: Nulos.

Figura 4.

Obsérvese que (fig. 4) de los corrimientos de la estructura isostática asociada (b) tan sólo la rotación θ_B es incompatible con la continuidad de la viga. En cambio, el corrimiento u_A del apoyo A y la rotación θ_A son perfectamente compatibles con las coacciones del mismo.

El flector hiperestático interno en el apoyo central (M_{f_B}) tiene como misión provocar en la estructura isostática asociada una rotación igual y contraria a θ_B . De tal modo que será:

$$|M_{f_B}| = \theta_B \times R_{BA},$$

siendo R_{BA} la rigidez de flexión del vano BA (hablamos de estructura y pretensado simétricos).

La existencia de (M_{f_B}) exige la aparición de reacciones ascendentes en los apoyos extremos y descendentes en el apoyo central:

$$R_A = R_C = \frac{[M_{f_B}]}{L}$$

$$R_B = -(R_A + R_C) = -2 \frac{[M_{f_B}]}{L}$$

Y estas reacciones engendran la ley de corrientes correspondientes.

Obsérvese también que pudimos igualmente elegir como estructura isostática asociada la que resulta suprimiendo el apoyo central (B) (fig. 5).

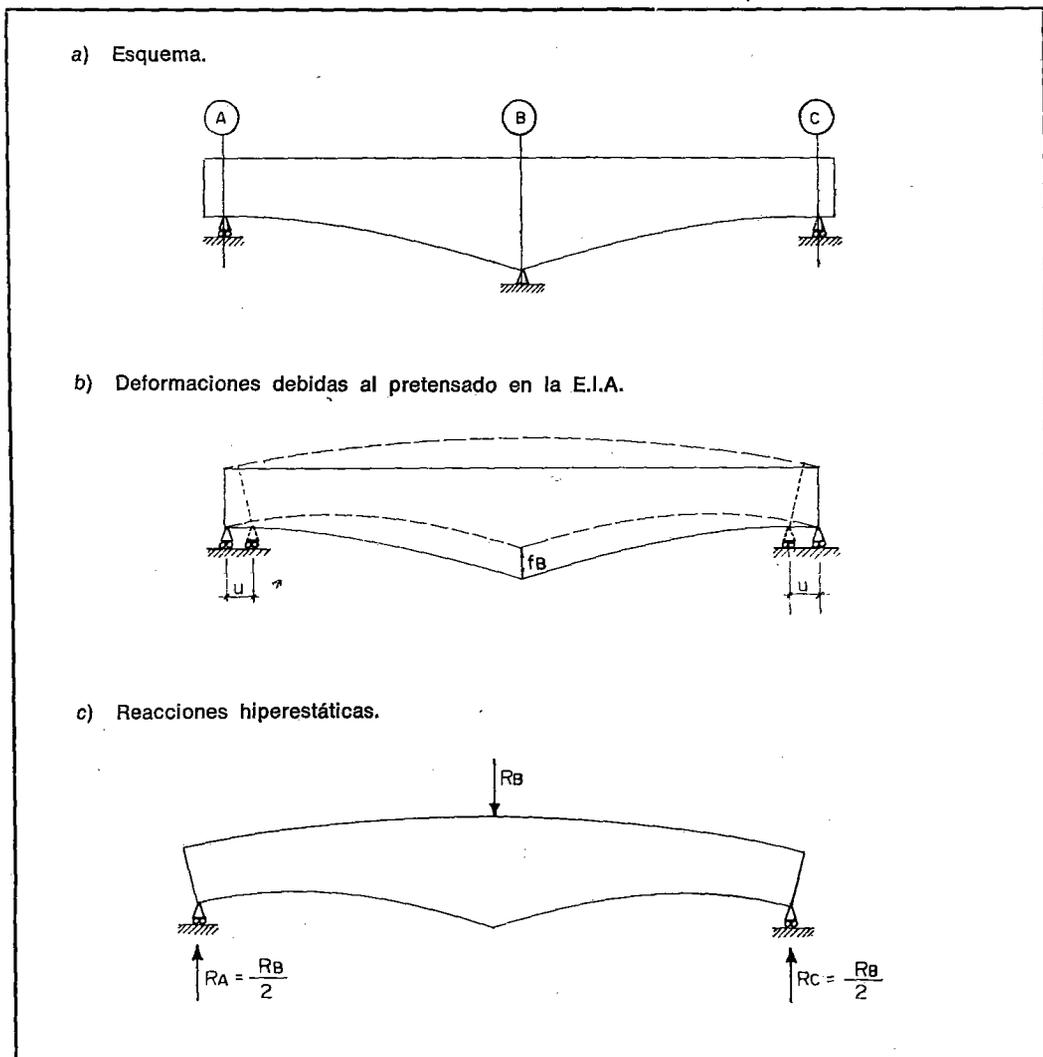


Figura 5.

R_B será precisamente aquella fuerza capaz de provocar en la sección B de la estructura isostática asociada una flecha ($-f_B$), estable-

ciendo la compatibilidad del vínculo de apoyo. Si ahora consideramos una estructura de tipo pórtico (fig. 6) veremos que:

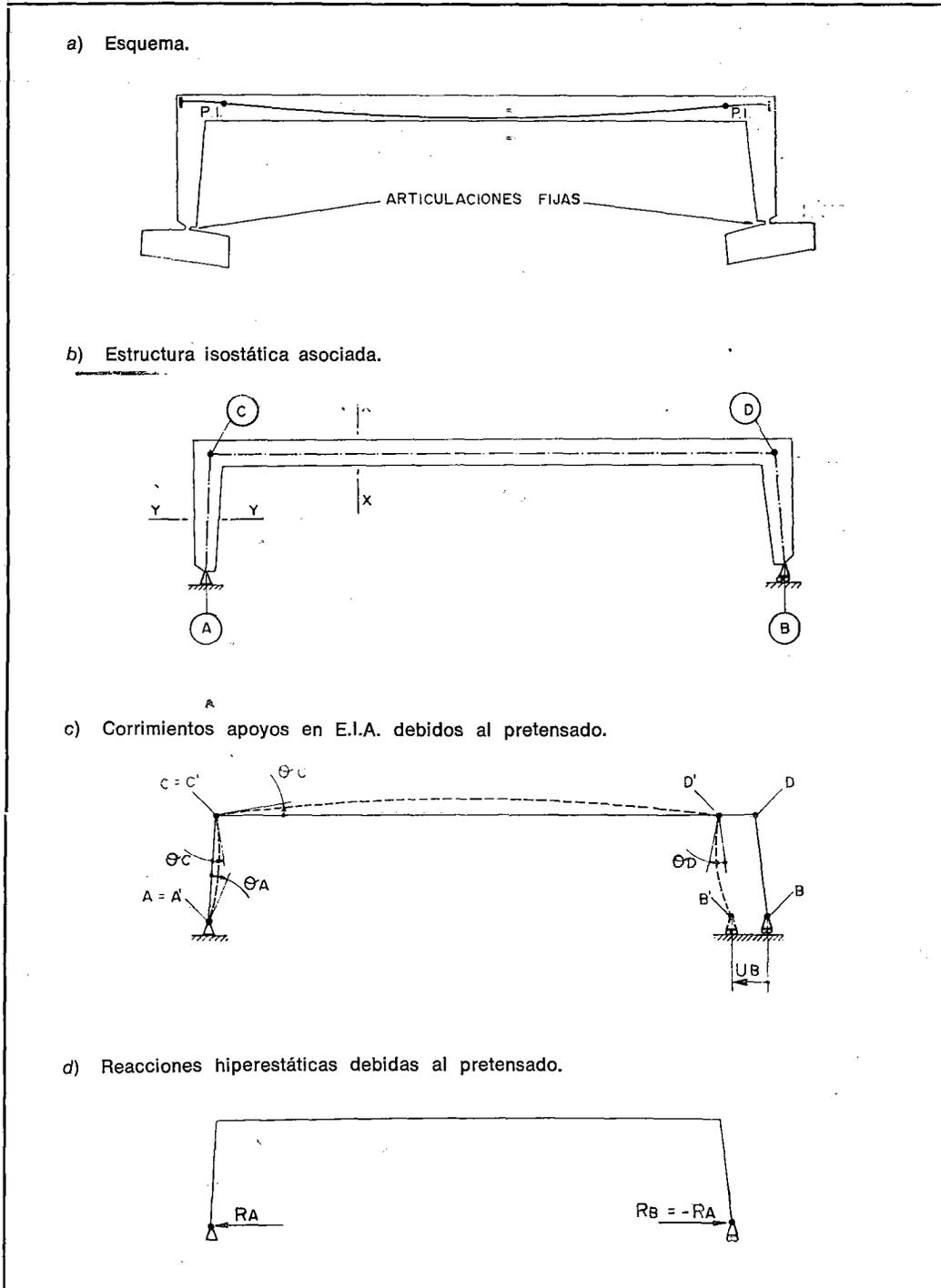


Figura 6.

Como se aprecia en la figura 6-c, el único corrimiento de apoyo de la EIA no compatible con los vínculos de la estructura real es el corrimiento horizontal u_B .

Las reacciones hiperestáticas de pretensado serán (fig. 6-d) R_A y $R_B = -R_A$, tales que provoquen en la EIA una separación entre A y B igual a $(-u_B)$.

La consecuencia es que en la sección genérica (x) del dintel la acción resultante del pretensado se compone de:

a) Esfuerzo axial:

$$N = F_{xh} - R_{Ah} = F_{xh} - R_A$$

b) Esfuerzo cortante:

$$T = F_{xv} + R_{Av} = F_{xv}$$

c) Momento flector:

$$M = F_{xh} \cdot e_0 + M_{xhip}$$

Indicando los subíndices h y v componentes horizontal y vertical de las fuerzas, e_0 la excentricidad del cable y M_{xhip} el momento flector provocado en la sección (x) por las reacciones hiperestáticas.

Como puede verse, la sollicitación de pretensado no coincide en este caso con la fuerza del cable, ni con su excentricidad ni dirección.

Obsérvese que en una estructura hiperestática existe acción de pretensado en cualquier sección, y no sólo en aquellas que atraviesa el cable.

Por ejemplo, en la sección genérica (Y) de los soportes, no atravesada por ningún cable, existe una acción de pretensado que aproximadamente consiste en:

Axil: $N \simeq 0$.

Cortante: $T \simeq R_A$.

Flector: $M = R_A y$.

Siendo y la cota de dicha sección sobre las articulaciones de base.

4. Y consecuentemente, reacciones y esfuerzos hiperestáticos en las estructuras que lo sean.

Sin embargo, llegados a este punto, parece conveniente reflexionar un instante y preguntarnos por qué la distinción entre acción isostática e hiperestática del pretensado se lleva tan lejos habitualmente.

Si está claro que pretensar una estructura es aplicar un conjunto de fuerzas sobre la misma, las disquisiciones anteriores, demostrando la existencia de reacciones y esfuerzos hiperestáticos en las estructuras que lo sean, pueden calificarse fundadamente de perogrulladas. Bastaría ver que una carga repartida vertical descendente como el propio peso, aplicada a la estructura de la figura 4, producirá en su EIA (figura 4-b) una rotación θ_B que no es compatible con la continuidad en el apoyo, y que da lugar a un momento M_B , precisamente el flector del apoyo que iguala rotaciones a ambos lados del mismo.

Queremos decir que no parece razonable tratar la acción del pretensado con tantas distinciones, y que sería más lógico aplicar pura y simplemente la teoría general de estructuras para obtener las sollicitaciones que introduce en cada sección (4).

Ahora bien, podemos preguntarnos cuáles han sido y son las causas por las que en este campo se ha procedido pasando de lo particular a lo general, en lugar de lo contrario. Creemos poder anotar las siguientes:

1. El hecho de que históricamente el pretensado comenzara aplicándose a obras isostáticas. Al coincidir en éstas la acción (fuerza) con el cable en cada sección, se produjo una fuerte mentalización asociando sollicitación del pretensado igual a fuerza dispuesta en el cable. Y al mismo tiempo pretensado igual a pretensado isostático.

(4) La acción directa o isostática del pretensado sobre una estructura dada puede contemplarse como se hace en el apartado 2, y también como una acción consistente en una ley de momentos flectores aplicados externamente, variables en intensidad a lo largo de la pieza, más una ley de axiles de compresión, también variables.

Este sistema engloba las fuerzas finales concentradas en anclajes, así como las repartidas de desviación y rozamiento, y se presta mejor a la mecanización del cálculo, pero parece quizá menos intuitivo que el método seguido en la exposición.

Las ventajas de la consideración del pretensado como ley variable de momentos flectores, radican en que se parte no de una ley de cargas cuya correspondiente ley de flectores isostáticos hay que deducir para posteriormente calcular giros isostáticos de arranques de piezas, sino precisamente de dicha ley de flectores isostáticos. De modo que *a priori*, y en igualdad de condiciones, la acción hiperestática del pretensado presenta menos complicación de cálculo que la de cargas exteriores verticales. La situación cambia por la existencia de formularios para el cálculo de las rotaciones de arranques o de los momentos de empotramiento rígido correspondientes a cargas verticales.

2. Quizá ninguna otra acción como el pretensado permite visualizar tanto la sollicitación que provoca en cada sección.

En efecto, en el dintel de un pórtico sabemos que por efecto de las cargas exteriores aparecen un axil, un cortante y un flector. Pero a primera vista y sin descender al análisis numérico, ignoramos el punto de paso de la resultante así como su inclinación en dicha sección.

En cambio, si tenemos un cable de pretensado y la estructura es isostática sabemos que subimos, bajamos o inclinamos la resultante con sólo subir, bajar o inclinar el cable.

Y si la estructura es hiperestática, el cable siempre representa una base de referencia para la resultante, a modificar en mayor o menor medida por la sollicitación hiperestática.

3. Finalmente, no hay que perder de vista el doble papel que desempeña el cable, de sollicitación elástica en servicio, por un lado, y armadura adherente hasta el agotamiento por otro.

Este segundo aspecto confiere una importancia extrema a la posición real del cable dentro de la sección, pues es el canto real de la misma el que nos da la seguridad frente a la rotura, ocupando las acciones hiperestáticas un lugar secundario en la misma.

El hecho de que cada vez los reglamentos de hormigón armado-pretensado confieran más importancia a la seguridad frente al agotamiento, y sean en cambio más liberales en lo que a tensiones de servicio se refiere (obras de clases II y III), acentuará más la idea del cable-armadura en detrimento de la idea de "cable-

deformaciones, etc.). Así, por ejemplo, el pretensado que normalmente aplicamos a las vigas continuas supone (además del esfuerzo axil que corresponda) flexión de continuidad positiva en apoyos, y flexión negativa en vanos, al revés que las cargas exteriores.

Pensemos que efectos contrarios no equivale siempre a efectos favorables. Por ejemplo, en un puente pórtico, la flexión isostática positiva del dintel debida a cargas exteriores se ve reducida por la componente horizontal de las reacciones.

Entonces, si pretensamos el dintel obtendremos una flexión negativa en el vano, pero inferior en valor absoluto a la que el mismo pretensado produciría en un dintel isostático. El mismo efecto de reducción de flexión que se aplicaba a las cargas exteriores se reproduce en el caso del pretensado con unas reacciones hiperestáticas horizontales que ahora provocan flexión positiva en el dintel.

5. Trazado intuitivo de cables en función de las acciones exteriores a compensar.

Desde el momento en que entendemos el pretensado como un cable funicular de las acciones exteriores anclado en la propia estructura, podemos intuir los trazados deseables en cada caso concreto.

Por ejemplo, en el caso de una viga simple, sometida tan sólo a una carga concentrada, dispondríamos un cable poligonal, con el punto de quiebro bajo la carga (fig. 7).

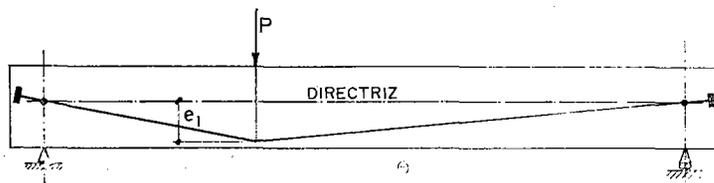


Figura 7.

sollicitación elástica que elimina totalmente las tracciones en servicio".

La idea básica, resumen del tema, es que el pretensado es fundamentalmente una acción contraria a las cargas exteriores, que, lógicamente, provoca efectos contrarios en cuantos aspectos se contemplan (esfuerzos, tensiones,

En cambio, si además de la carga P hubiéramos de considerar el propio peso de la viga (carga repartida uniforme), los segmentos rectos del trazado se convertirían en parabólicos, ambos con la misma curvatura (fig. 8).

Obsérvese que el trazado teórico de las figuras 7 y 8 comporta un punto anguloso. Co-

responde ello a la existencia de una fuerza concentrada en un punto, lo que no es físicamente posible. La rigidez del cable y de la vaina impone un radio de doblado mínimo, lo que

ascendente en los vanos, enlazadas por contracurvas sobre los apoyos (fig. 10).

La zona de contracurva (DE) obedece a idénticos motivos que la de la figura 9. El tra-

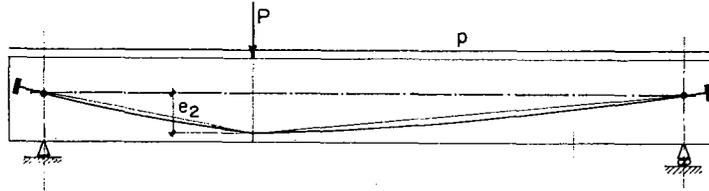


Figura 8.

también conduce a la existencia de una zona redondeada en aquél (fig. 9).

Las fuerzas de desviación (\vec{p}) existentes en la zona curva (DE) son las que en conjunto se oponen o "recogen" la acción exterior \vec{P} . La

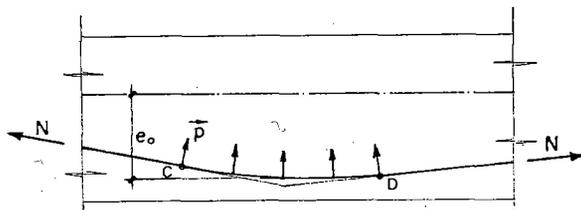


Figura 9.

excentricidad (e_0) y la fuerza (N) de pretensado se elegirán de modo que:

$$R = \frac{1}{2} (P \text{ mín} + P \text{ máx}),$$

siendo R la resultante de las (\vec{p}).

En el caso de una viga continua sometida a cargas repartidas o móviles equivalentes, el trazado se compondrá de parábolas de empuje

zado ideal tendría un punto anguloso sobre el eje de apoyo, si la reacción en B estuviera infinitamente concentrada en un punto, y si el canto de la viga fuera muy pequeño y no existiera una zona de reparto de dicha reacción. Al no ser así, se impone la zona de contracurva (DE), que suele venir limitada por el radio mínimo que exigen el cable y la vaina, pero se ve clara la conveniencia de que las distancias \overline{DB} , \overline{BE} sean pequeñas, de tal modo que las acciones descendentes que el cable provoca vayan directamente al apoyo por bielas inclinadas de compresión, sin reducir la compensación de esfuerzo cortante que el cable ejerce en (D) y (E) (5). Y aunque alcancemos otra vez el nivel de perogrullada, conviene dejar constancia de que los puntos de inflexión del trazado del cable nada tiene que ver con los puntos de inflexión de la ley de momentos flectores. La equivalencia deberá establecerse entre puntos de inflexión de la ley de Mf y puntos de excentricidad nula en la línea de acción resultante (isostática + hiperestática) del pretensado.

El cable representado en la figura 10 es tan sólo una posible solución, pero no se afirma

(5) Leonhardt recomienda que estas distancias no superen el 0,7 del canto de la viga.

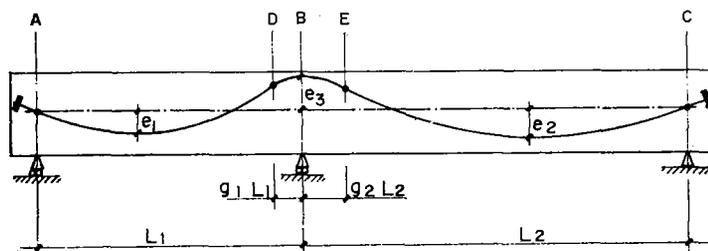


Figura 10.

que que sea la única ni la mejor. Sería preciso concretar mucho más el problema planteado para entrar a discutir este aspecto.

Lo que se desea subrayar es la conveniencia clara e intuitiva de que (e_1) sea menor que (e_2) , puesto que las flexiones positivas del vano (1) serán menores que las de (2). O yendo a la compensación de cargas, al ser la carga exterior similar en ambos vanos, buscamos una acción ascendente del pretensado también equivalente. Si las fuerzas de pretensado son parecidas, también deben serlo las curvaturas de las parábolas, lo que conduce a $e_1 < e_2$, dado que $L_1 < L_2$.

6. Efectos de la continuidad en la seguridad frente a la rotura de una obra pretensada.

Todos somos conscientes de que pasar, como habitualmente hacemos, de las sollicitaciones de servicio a las de agotamiento mediante un coeficiente de mayoración, carece, generalmente, de sentido físico en una obra hiperestática, y nos deja del lado de la seguridad.

Si se trata de una obra pretensada, la falta de correspondencia con la realidad física es todavía mayor. La razón es clara: siempre que tenemos un vano con continuidad en uno o en sus dos apoyos cabe la posibilidad de redistribuir flexiones aumentando las de apoyos y reduciendo las positivas o viceversa. Desde el momento en que el sistema de cargas, pésimo para la flexión del vano, no coincide, generalmente, con el que corresponde a las flexiones pésimas de apoyos, ocurre que podemos llegar a tener una zona de centro de vano fisurada, mientras los

apoyos del mismo permanecen sin tracciones (clase I) o con tracciones moderadas (clase II). En tal situación, las reservas de energía elástica de las zonas no fisuradas llevan lógicamente a unas grandes posibilidades de redistribución de flexiones, aumentando la seguridad real a rotura de la zona central del vano.

El hecho de calcular la seguridad frente al agotamiento de una obra pretensada, contando con los momentos hiperestáticos de fase elástica debidos al pretensado, mayorándolos o minorándolos según sean o no desfavorables, no debe conducir lógicamente más que a un aumento de dicha seguridad (6).

7. El pretensado, como acción contraria a las exteriores, compensa todos los efectos producidos por éstas.

Aunque a una estructura se la pretensa normalmente, pensando en solucionar principalmente problemas de tracción o de flexión y esfuerzo cortante, ocurre que en las estructuras complejas (que cada vez van siendo más corrientes), en las que aparecen fenómenos nuevos a considerar, el pretensado, de acuerdo con la filosofía básica expresada en el esquema de la figura 1, sigue comportando grandes ventajas.

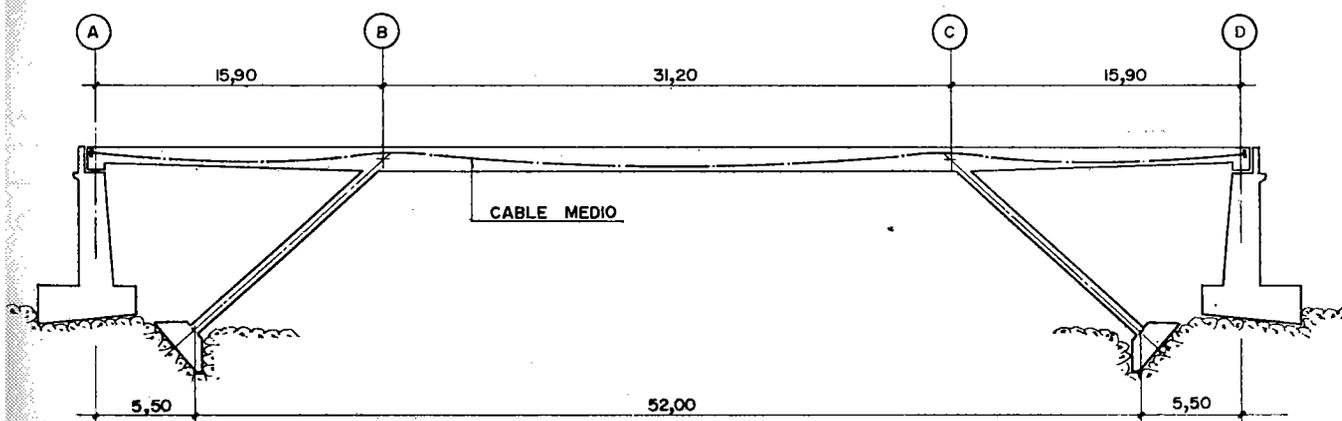
Presentamos a continuación algunos casos reales.

A) Estructuras planas.

A.1. Puente pórtico de patas inclinadas (figura 11).

(6) Los coeficientes de mayoración o minoración no alcanzan a los que afectan a las cargas exteriores. 0,9 y 1,1 parecen valores razonables y usuales.

Figura 11.



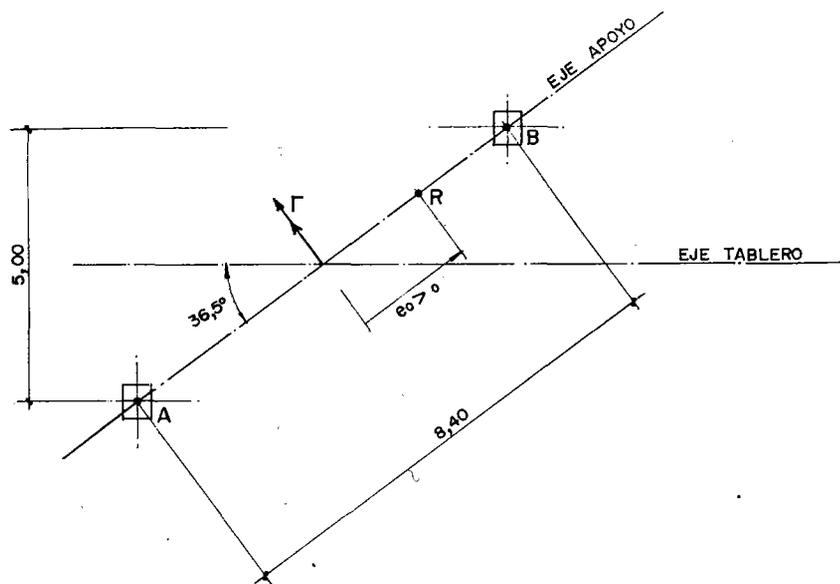


Figura 15.

La estabilidad exige que el punto (R) permanezca dentro del segmento \overline{AB} definido por las placas de apoyo (9).

La separación entre placas se tomó igual a 5 m, superior a la distancia entre almas del tablero (3,24 m), pero hubiera debido ser aún mayor de no haber contado con la reducción de T originada por el pretensado longitudinal.

Así, teníamos:

Acción	R parcial	T parcial
(1) Peso propio.	+ 250,3 Tm	+ 951,1 m · Tm
(2) Pretensado inicial.	+ 11,0 Tm	— 1.709,2 m · Tm
(3) Carga permanente.	+ 42,5 Tm	+ 164,7 m · Tm
(4) Δ pretensado.	— 2,0 Tm	+ 308,2 m · Tm
(5) Sobrecarga pésima.	+ 162,8 Tm	+ 909,6 m · Tm

Solicitaciones resultantes:

Estado	R (Tm)	T (m · Tm)	e_0 (m)
(1) + (2) = inicial.	+ 261,3	— 758,1	— 2,90
(1) + (2) + (3) + (4) = permanente.	+ 301,8	— 285,2	— 0,94
(1) + (2) + (3) + (4) + (5) = servicio.	+ 464,6	+ 624,4	+ 1,34

Vemos que la resultante (R) se pasea sobre la línea de eje de apoyo desde (— 2,90 m) hasta (+ 1,34 m).

(9) Se entiende en el sentido de provocar el despegue del tablero en el apoyo del ángulo agudo.

De no haber existido pretensado longitudinal, el "paseo" hubiera andado entre un mínimo de $e_0 = (3,79 \text{ m})$ y un máximo de $e_0 = (4,44 \text{ m})$, y hubiéramos tenido que recurrir para tener estabilidad a separar más las placas de apoyo (lo que crea serios problemas en la traviesa), o a anclar el tablero en el ángulo agudo.

La filosofía básica del esquema de la figura 1 podría haber sido sacada de este ejemplo.

8. Conclusión.

El pretensado ha supuesto la posibilidad de emplear armadura de alto límite elástico, y ello mejorando extraordinariamente las condiciones de una estructura en servicio, y proporcionando una seguridad a rotura análoga a la que daría una armadura dulce o semidura mecánicamente equivalente.

Pero más allá de estas considerables ventajas, el pretensado supone una actitud nueva, de acción previa, frente a la pasividad del hormigón armado: La filosofía representada por la traslación voluntaria del origen.



Salto de Alcántara