

# Diseño de un ensayo para el estudio experimental del anclaje de armaduras pasivas en nudos C-C-T

## *Design of a test for experimental analysis of passive reinforcement anchorage in C-C-T joints*

◆  
Pedro F. Miguel Sosa

◆  
José R. Martí Vargas

◆  
Miguel Ángel Fernández Prada

◆  
M<sup>a</sup> Carmen Castro Bugallo

◆  
José Luis Bonet Senach

◆  
Pedro Serna Ros

Departamento de Ingeniería de la Construcción y Proyectos de Ingeniería Civil.  
Univesidad Politécnica de Valencia

◆  
Manuel L. Romero García  
Departamento de Tecnología  
Universitat Jaume I

### RESUMEN

En este artículo se presenta el prototipo diseñado para desarrollar el proyecto de investigación que se está desarrollando en el Departamento de Ingeniería de la Construcción y Proyectos de Ingeniería Civil de la Universidad Politécnica de Valencia para el estudio del comportamiento del sistema anclaje-nudo en regiones D, con la finalidad de proporcionar al proyectista una herramienta o fórmula de diseño que le permita cuantificar la longitud necesaria para el anclaje de la armadura en nudos C-C-T en función del ángulo de inclinación de la biela.

Para ello se ha previsto un programa de ensayos de laboratorio que reproduzcan las condiciones de este tipo de nudos y permitan determinar el esfuerzo equilibrado en el nudo y el transferido por anclaje.

Se describe el ensayo diseñado incluyendo la definición geométrica de la probeta tipo, el sistema de carga y apoyo, los dispositivos de medida, así como el programa de ensayos previsto.

### SUMMARY

*In this paper the prototype designed for the research project about the analysis of the anchorage-joint system behaviour in D regions which is being developed in the Dept. of Construction Engineering and Civil Engineer Projects is presented. The main objective in this experimental investigation is the*

*development of an easy tool or a practical design formula to evaluate the necessary anchorage length of passive reinforcement in C-C-T joints as a function of the strut orientation.*

*So that, it has been planned a laboratory test program to reproduce the conditions of these kind of joints where is possible the evaluation of the force equilibrated in the joint and the effort transmitted directly to the anchorage.*

*It is described the experimental program including the geometry of a typical specimen, the load support system, the measurement device, and the test program scheduled.*

### 1. INTRODUCCIÓN

La actual instrucción EHE (4), siguiendo al Código Modelo CEB-FIP 90(3), ha adoptado el método de las bielas y tirantes como método general para el proyecto y cálculo de las llamadas regiones D. Este método fue propuesto como un método general para el diseño y cálculo de estructuras de hormigón por Schlaich (11) y se ha ido incorporando paulatinamente a las diferentes normas nacionales e internacionales por su racionalidad y sencillez conceptual. En consecuencia, la EHE incorpora en el articulado fórmulas de diseño basadas en este método para proyectar los elementos estructurales más comunes sometidos a las cargas usuales (ménsulas cortas vigas de gran canto, zapatas rígidas, zonas en el entorno de cargas concentradas, etc.).

Pero el método de las bielas y tirantes no sólo constituye una herramienta muy útil para el buen diseño y dimensionamiento de las armaduras sino que permite describir los aspectos fundamentales del comportamiento estructural de las regiones D. Con este método se puede determinar la cuantía de las armaduras así como su adecuada posición, distribución y anclaje. Por consiguiente, resulta adecuado para diseñar las zonas de unión entre elementos de hormigón, sobre las que actúan normalmente cargas concentradas. El conocimiento con mayor nivel de detalle del comportamiento resistente puede evitar fallos o patologías que provengan, por ejemplo, de algún error de diseño en los anclajes y permite, además, un más adecuado y optimizado diseño de la geometría y armado de estos elementos.

Las investigaciones más recientes relativas al método de las bielas y tirantes tienen tres vertientes fundamentales:

- por un lado, se están desarrollando modelos que simulen el comportamiento de bielas y tirantes generando el esquema resistente interno óptimo usando procesos evolutivos (8, 9),
- por otro lado, se analiza el complejo comportamiento de las zonas nodales de encuentro entre las bielas o entre éstas y los tirantes (5, 6, 7, 10, 12 14),
- y, finalmente, se utiliza el método de bielas y tirantes para explicar los resultados obtenidos en elementos o regiones ensayadas experimentalmente (1, 2, 13).

Una de las situaciones habituales de aplicación del método de las bielas y tirantes es en el entorno de las reacciones de las vigas o en el caso de la existencia de cargas puntuales aplicadas, como sucede en los apoyos a media madera o ménsulas cortas (Figura 1).

En algunos casos, la longitud de resguardo o las dimensiones geométricas de estos elementos puede no ser suficiente para anclar eficazmente la armadura traccionada mediante alguno de los dispositivos de anclaje normalizados. No obs-

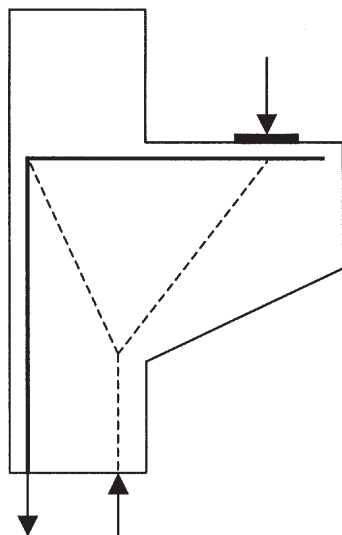


Figura 1. Anclaje en punta de una ménsula corta. Esquema resistente de bielas y tirantes.

tante, las condiciones de adherencia mejoran notablemente en presencia de fuertes compresiones transversales a la armadura, debidas a la actuación de cargas concentradas o reacciones. Por ello, sería interesante verificar en qué medida puede reducirse la longitud de anclaje en estas circunstancias.

Por ese motivo, se solicitó y fue concedido el proyecto de investigación titulado “Estudio teórico-experimental del comportamiento de regiones D aplicado a apoyos a media madera para elementos prefabricados de hormigón”, código GV-01-301, dentro del Plan Valenciano de I+D de la Generalitat Valenciana, 2001. En el contexto de este Proyecto se ha desarrollado el trabajo experimental que se describe en este artículo.

## 2. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

El objetivo general de esta investigación es el estudio del comportamiento del sistema anclaje-nudo en regiones D, con la finalidad de proporcionar al proyectista una herramienta o fórmula de diseño que le permita cuantificar la longitud necesaria para el anclaje de la armadura en nudos C-C-T, considerando la tracción que se equilibra en el nudo, en función del ángulo de inclinación de la biela.

Para ello, se ha diseñado un programa de ensayos de laboratorio que reproduzcan las condiciones de este tipo de nudos y permitan determinar el esfuerzo equilibrado en el nudo y el transferido por anclaje, de acuerdo con el esquema de fuerzas que se observa en las Figuras 2 y 3.

De acuerdo con los objetivos planteados, el principal resultado será la obtención de la distribución de esfuerzo en la armadura a lo largo del conjunto Nudo-Anclaje. (Figura 4).

## 3. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

En este apartado se describe el ensayo diseñado incluyendo la definición geométrica de la probeta tipo, el sistema de carga y apoyo, los dispositivos de medida, así como el programa de ensayos previsto, que en este momento está en fase de desarrollo.

### 3.1. Diseño del ensayo

Para la materialización del ensayo se plantearon distintas alternativas. Después de una fase de evaluación y análisis de la viabilidad de las mismas, se optó por emplear una probeta tipo cuyas características se definen en este apartado y como soporte del ensayo un marco metálico autoportante (Fotografía 1 (d)).

#### • Probeta tipo

Las probetas utilizadas para estos ensayos están formadas por dos bloques paralelepípedicos de hormigón, unidos en su parte inferior por la armadura objeto del estudio y en su parte superior por una rótula de acero (Fotografía 1(e)). En los bloques de hormigón no existe ninguna otra armadura, sólo la

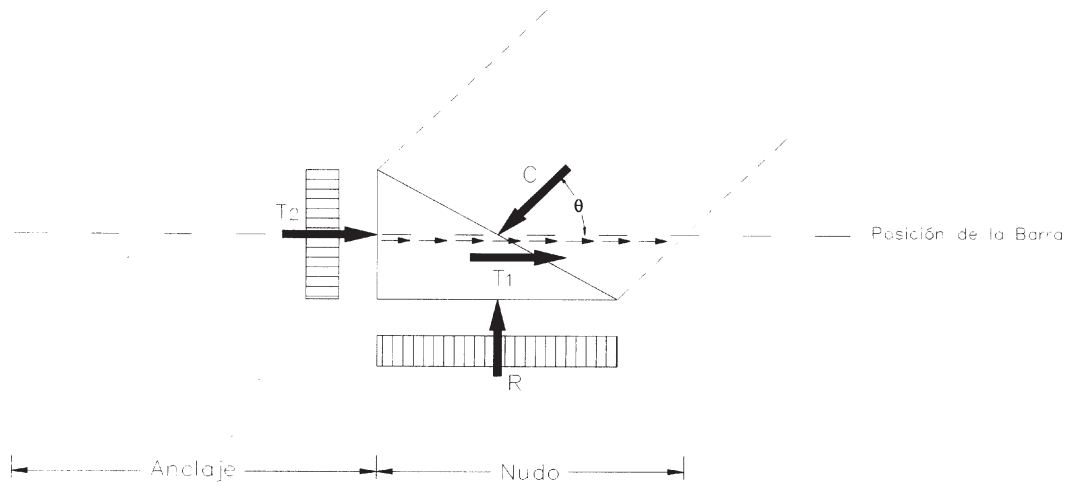


Figura 2. Distribución de esfuerzos en el hormigón.

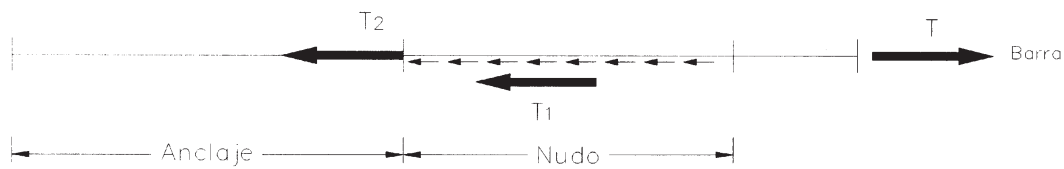


Figura 3. Distribución de esfuerzos en el acero.

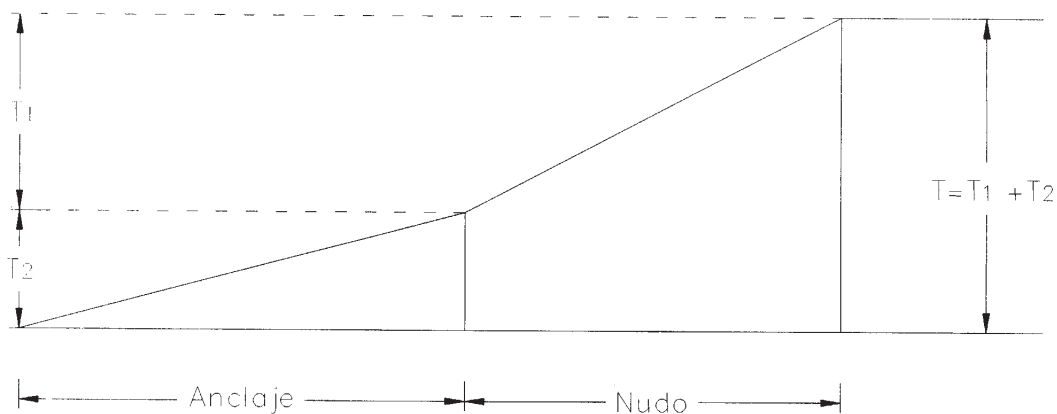


Figura 4. Variación de la fuerza en la armadura en el conjunto Nudo-Anclaje.

barra a ensayar. La probeta tiene sección rectangular de dimensiones 15 x 24 cm y longitud variable, con características geométricas que se indican en la Figura 5. La longitud de cada bloque de la probeta ( $L_i$ ) se compone de un tramo con adherencia entre la armadura y el hormigón (a) y dos tramos sin adherencia (d y e). Para eliminar la adherencia entre la armadura y el hormigón se utilizan manguitos de PVC de un diámetro ligeramente superior al de la barra a ensayar. El recubrimiento mecánico de la barra es de 5 cm.

La armadura se mecaniza en sus extremos para permitir su anclaje mediante tuerca y placa de apoyo. Entre la tuerca y la placa de apoyo se dispone, además, una célula de carga anular (Figura 6 y Fotografía 4).

• Sistema de carga

El mecanismo de aplicación de la carga está compuesto por un gato hidráulico de 500 kN (Fotografía 1 (1)), sujeto al marco autoportante y que se apoya en una placa de carga en la que se ha mecanizado una hendidura para el correcto centrado del gato. La placa de carga (Fotografía 1 (b)) de 60 mm de espesor distribuye la fuerza aplicada por el gato mediante dos rodillos de 30 mm de diámetro que se apoyan en unas chapas de acero de dimensiones 100 x 150 x 10 mm.

La probeta apoya a través de sendas chapas de acero de dimensiones 150 x 150 x 10 mm sobre dos rodillos montados en placas independientes de 30 mm de espesor (Fotografía 1 (c)),

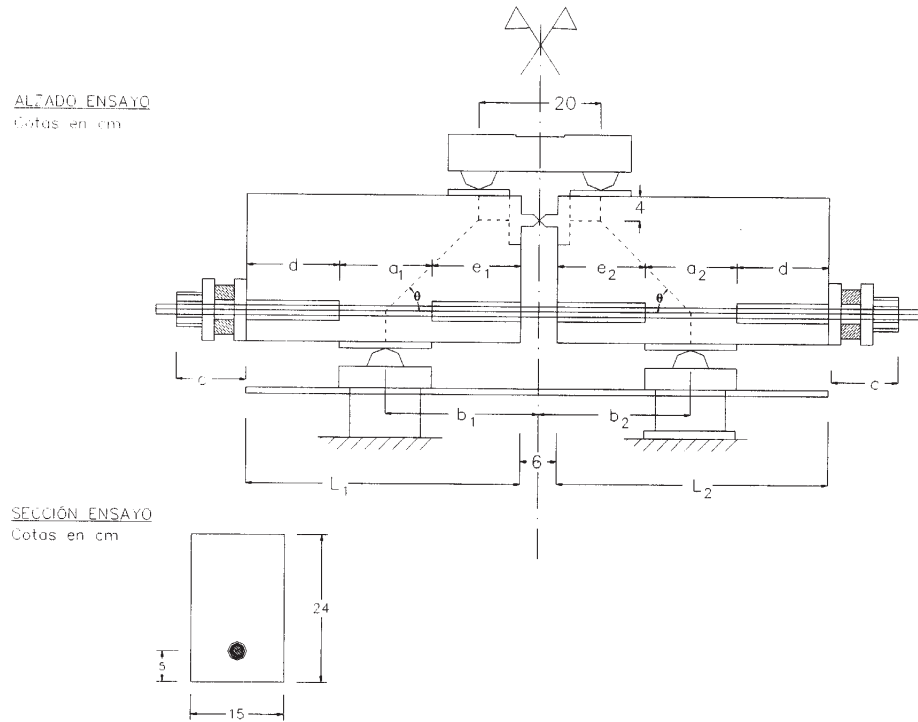


Figura 5. Croquis de la probeta a ensayar.

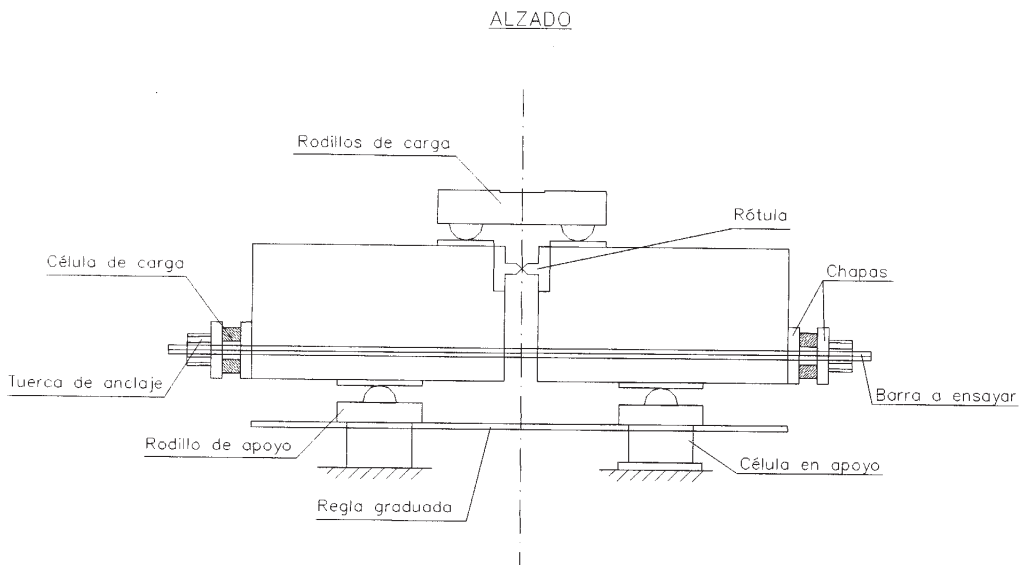


Figura 6. Croquis de sistema de apoyo y carga de la probeta.

sujetos ambos por una regla de acero que permite la modificación de las distancias entre apoyos (fotografía 2 (c)). Todo el sistema de apoyo descansa, a su vez, sobre cuatro células de carga (Fotografía 2 (d)), dos por apoyo, fijadas mediante tornillos.

El contacto de la probeta con los rodillos, tanto de carga como de apoyo, se encuentra perfectamente lubricado mediante MoS<sub>2</sub> Graphite Assembly Paste.

En la Figura 6 se incluye un croquis con los elementos auxiliares para realizar la aplicación de las cargas y apoyo de la probeta a ensayar.

• Instrumentación

Se emplean distintos dispositivos de medida, todos ellos externos a los elementos a ensayar para no distorsionar el fenómeno de adherencia.

Para la adquisición automática de mediciones en tiempo real se dispone de un sistema compuesto por un PC Pentium III y un equipo de adquisición de datos, gestionado mediante software propio (Figura 7) elaborado en el Departamento de Ingeniería de la Construcción y Proyecto de Ingeniería Civil de la Universidad Politécnica de Valencia.

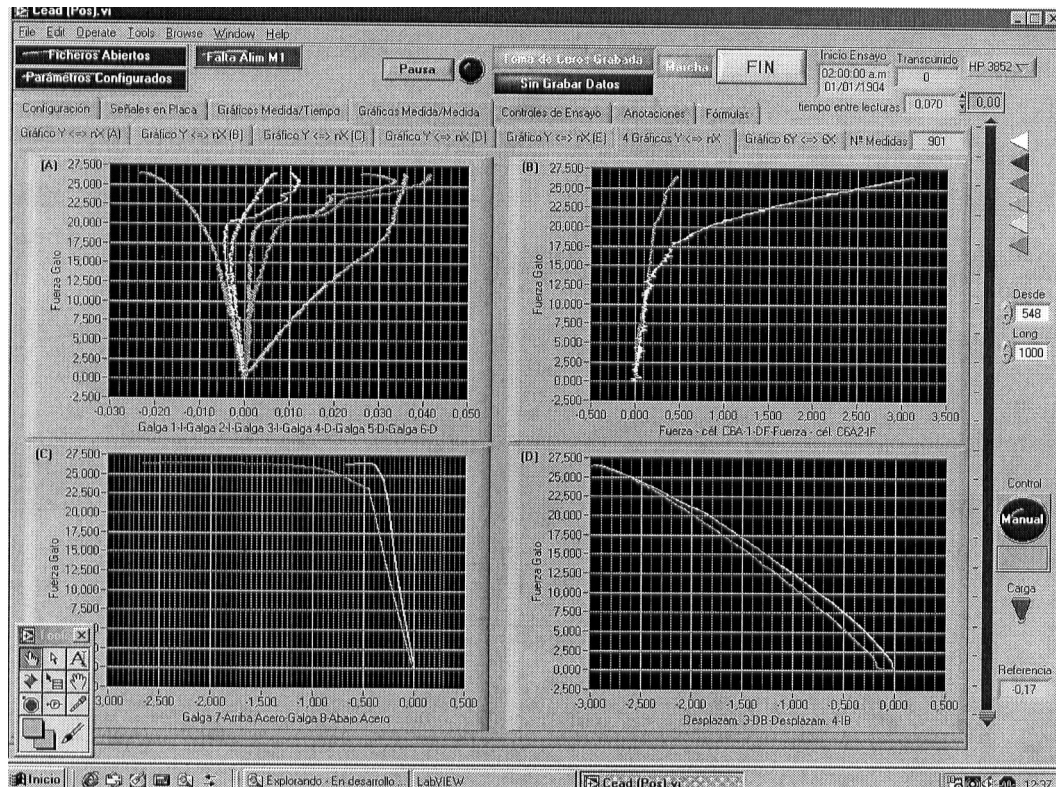


Figura 7. Pantalla de software para adquisición automática de datos en tiempo real.

- Dispositivos de medición de fuerza en ambos extremos de la armadura: se han empleado dos transductores de fuerzas anulares (Fotografía 4 (a)), del tipo HBM C6-A de 200 kN, en los extremos donde se ancla la armadura a ensayar.
- Dispositivos de medición de fuerza en los apoyos del elemento a ensayar: se han utilizado tres transductores de fuerza, del tipo LEBOW 3187 y un transductor de fuerza del tipo HBM C2, todos ellos de 100 kN de capacidad (Fotografía 2 (d)).
- Dispositivo para medición de deformaciones longitudinales en la armadura mediante extensometría: se han empleado dos bandas extensométricas, de tipo LY41-3/120, centradas en la probeta y situadas diametralmente opuestas en la armadura a ensayar (Fotografía 5(c)) y Figura 8 (núms. 7 y 8)).
- Dispositivo para medición de deformaciones longitudinales en el hormigón mediante extensometría: se han empleado bandas extensométricas, de tipo LY42-5-/120. Tres de las bandas se disponen en cada bloque en forma de roseta (Fotografía 2 (a) y Figura 8 (núms. 1, 2, 3, 4, 5 y 6)) y dos bandas adicionales situadas transversalmente en la parte inferior (Fotografía 6 a)) y Figura 8 (núms. 15 y 16)).
- Dispositivo para medición de desplazamientos: se han utilizado cuatro transductores potenciométricos de desplazamientos, del tipo Penny Giles SLS190/50, en el extremo interior de cada semiprobeta y en las partes anterior y posterior de cada una de ellas. (Fotografía 2 (b)).

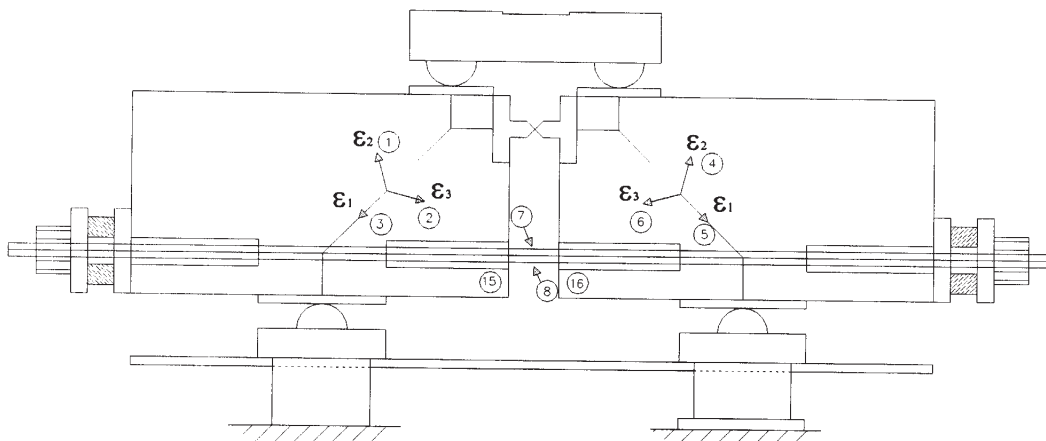


Figura 8. Croquis de posición de las bandas extensométricas del hormigón y acero.

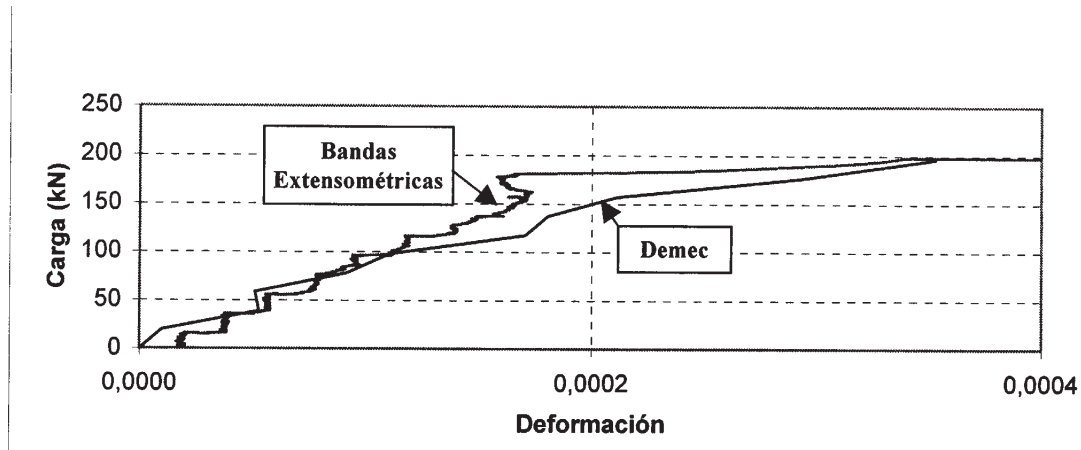


Figura 9. Relación Carga-Deformación Principal obtenida mediante Demec y Banda extensométrica.

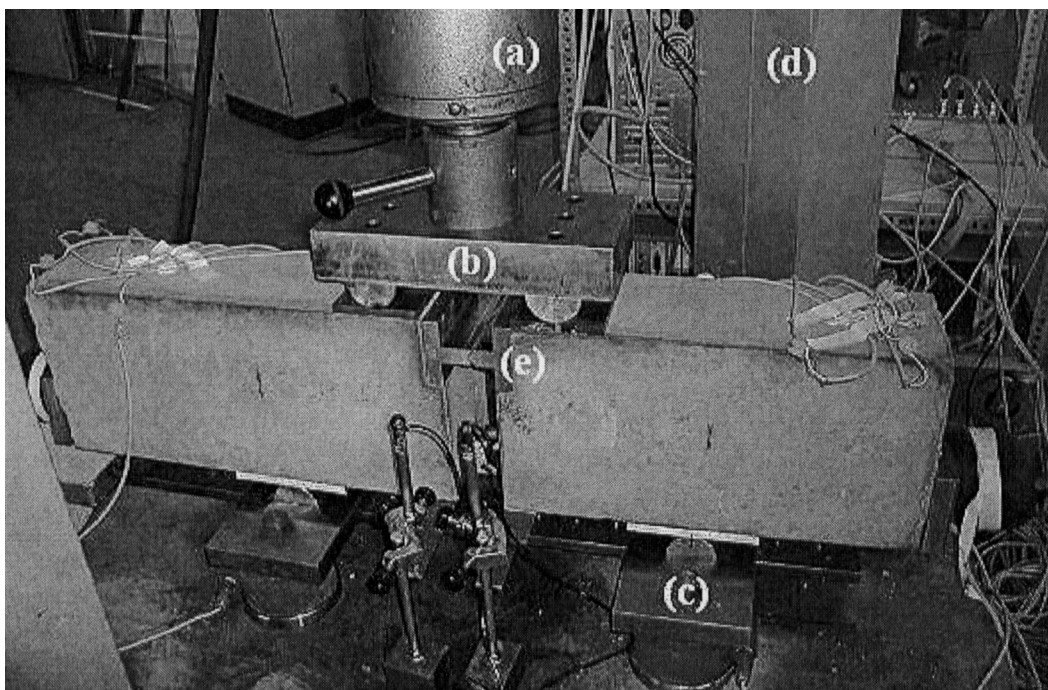
Ante la posibilidad de que la aparición de fisuras invalidara las medidas de deformaciones en el hormigón realizadas mediante bandas extensométricas, durante los primeros ensayos se realizó la medición de las deformaciones del hormigón combinando el sistema de extensometría mediante bandas con uno de extensometría mecánica mediante un micrómetro digital tipo Demec. Se dispusieron los discos de medida en los vértices de un hexágono de 100 mm de diagonal (Fotografía 3). En la Figura 9 se puede observar la comparación de las deformaciones principales en el hormigón obtenidas mediante ambos sistemas.

Finalmente se decidió eliminar el sistema de medición de extensometría mecánica por los siguientes motivos:

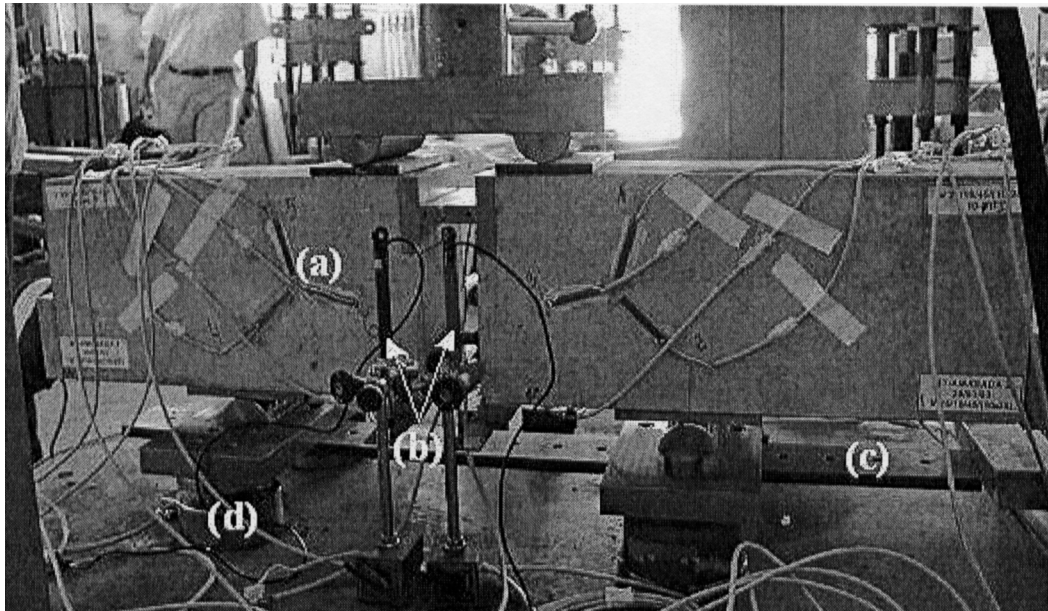
- Los resultados obtenidos por ambos sistemas son similares, como se puede apreciar en la Figura 9.

- La aparición de la fisura diagonal en la probeta, que se observa en la fotografía 3, no se produce hasta que la armadura objeto del ensayo alcanza el límite elástico, lo que permite establecer con total fiabilidad el estado tensional del hormigón antes de que las galgas dejen de medir.
- La utilización exclusiva de galgas extensométricas permite una aplicación de la carga a velocidad constante al no tener que detener el ensayo para realizar la toma manual de mediciones mediante Demec.

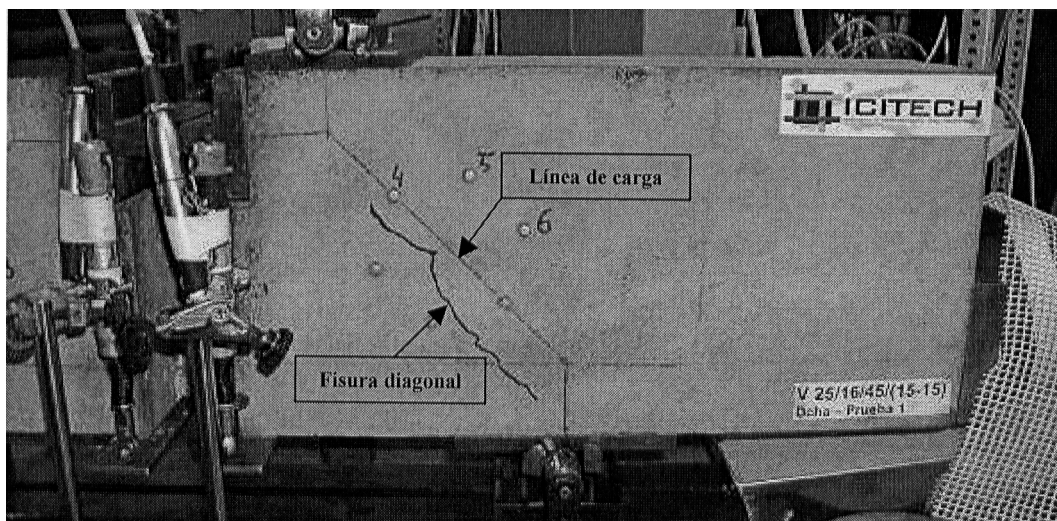
Por otra parte, durante los ensayos previos, realizados para verificación del diseño del ensayo, se observó la aparición de una fisura longitudinal que divide verticalmente en dos a la probeta (Fotografías 5 y 6 (b)), que es debida a las tracciones circunferenciales que se generan en el entorno de la armadura. Esta fisura, que se inicia en la zona adherente, se propaga, posteriormente, en dirección longitudinal.



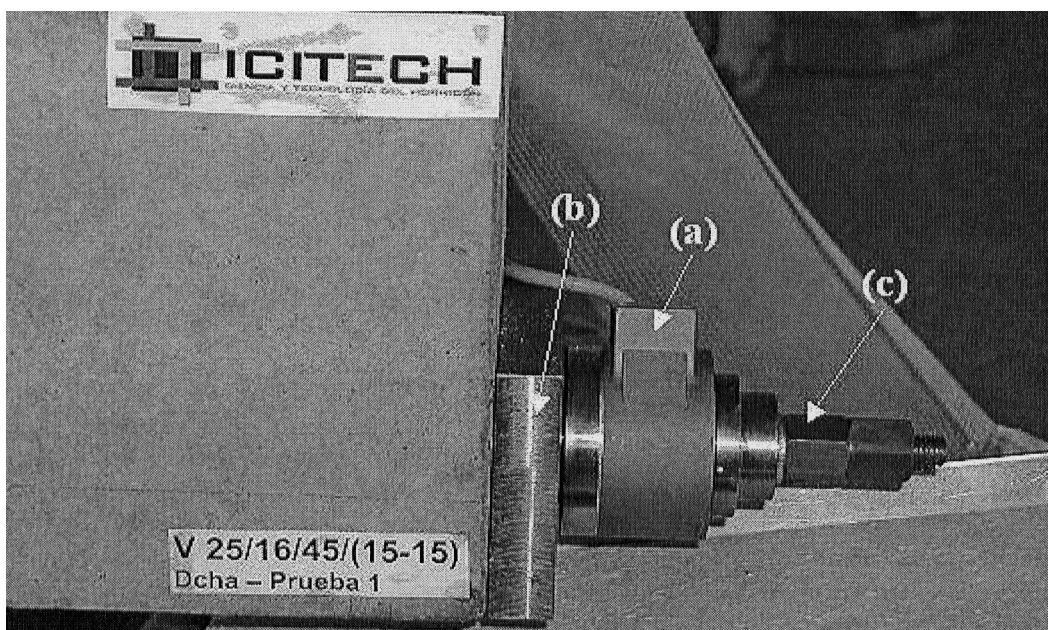
Fotografía 1. a) Sistema hidráulico, b) Chapa con rótula de carga, c) Chapa con rótula de apoyo sobre regla, d) Marco metálico autoportante, e) Rótula de acero



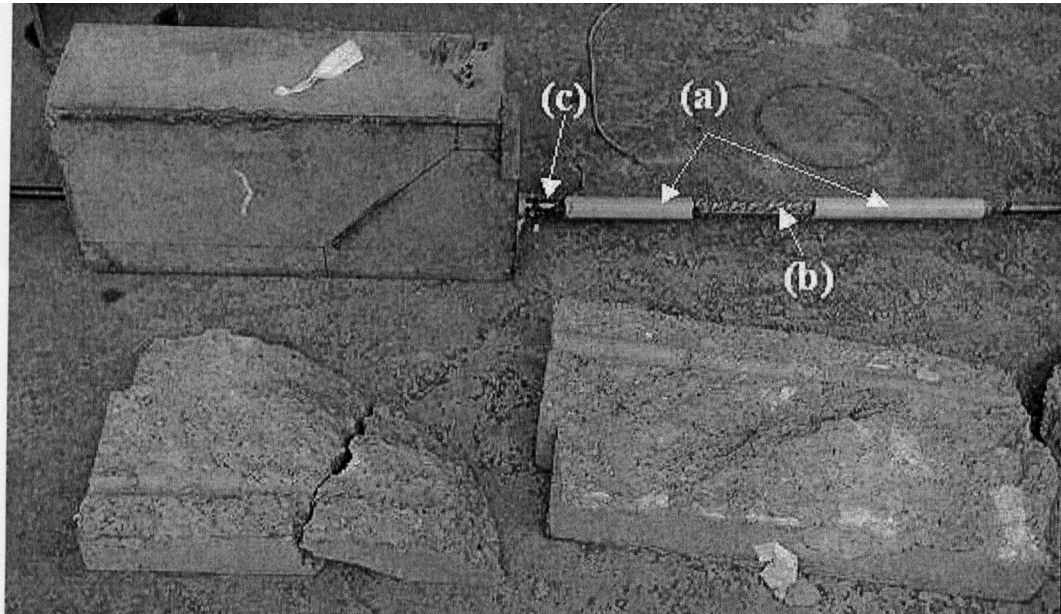
Fotografía 2. a) Bandas extensométricas, b) Captadores de desplazamiento, c) Regla graduada d) Célula de carga en apoyo.



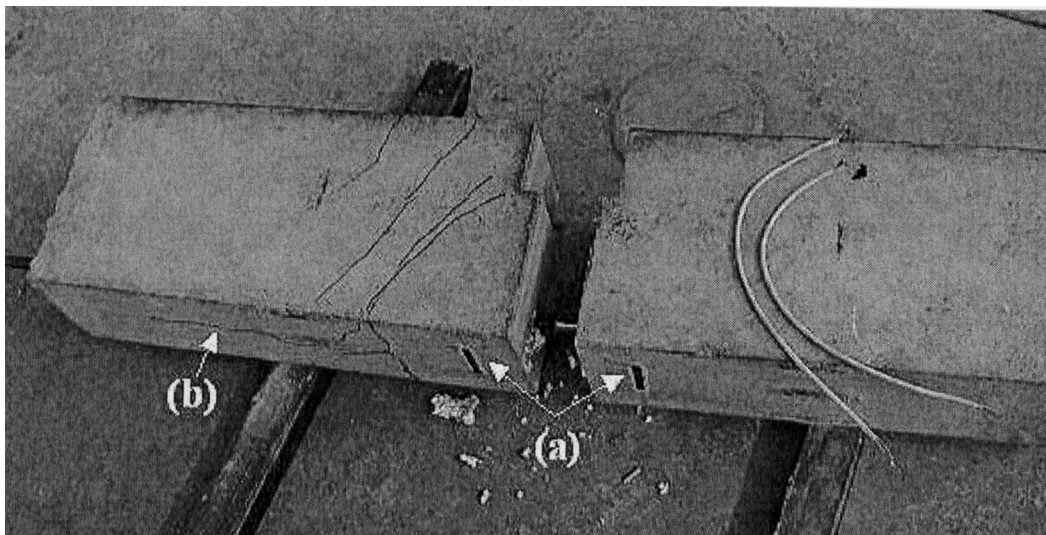
Fotografía 3. Discos de medida para la toma de datos mediante extensometría mecánica.



Fotografía 4. Discos de medida para la toma de datos mediante extensometría mecánica.



Fotografía 5. a) Manguitos de PVC, b) Zona adherida entre hormigón y acero, c) Bandas extensométricas en la armadura.



Fotografía 6. a) Bandas extensométricas en la parte inferior de la probeta, b) Fisuración longitudinal.

Evidentemente, la aparición de este tipo de fisuras indica el comienzo del agotamiento del mecanismo de transmisión de esfuerzos por adherencia, los cuales pueden mantener el nivel alcanzado, o incluso experimentar un ligero aumento, debido al efecto de zunchado que ejerce la placa de apoyo. Con el fin de determinar el momento exacto de la aparición de esta fisura se dispusieron las dos bandas extensométricas reseñadas en la relación de instrumentación indicada anteriormente. Los primeros resultados obtenidos han mostrado que, para las condiciones geométricas del ensayo, la aparición de esta fisura se produce ligeramente antes de alcanzar la plastificación de la armadura. Por este motivo, y para evitar introducir un efecto añadido de confinamiento, se ha decidido no disponer armadura secundaria (estribos) en el prototipo.

### 3.2. Programa de ensayos

La campaña de ensayos que se está llevando a cabo contempla los parámetros y valores de los mismos y que se resumen en la siguiente tabla:

<b>Tipo de hormigón (<math>f_c</math> en Mpa)</b>	<b>25-50-80</b>
<b>Diámetro de la armadura (mm)</b>	<b>12-16-20</b>
<b>Ángulo de inclinación de la biela</b>	<b>27°-45°-63°</b>
<b>Longitud adherente (cm)</b>	<b>5-10-15-20-25</b>

El desarrollo del programa experimental supone la realización de 81 ensayos. En cada ensayo se utiliza un tipo de hormigón, un diámetro de armadura ( $\phi$ ), un ángulo de inclinación de la biela ( $\theta$ ) y dos longitudes adherentes ( $a_i$ ) distintas en cada una de las semiprobetas.

## 4. RESULTADOS

Como ejemplo de los resultados obtenidos en los ensayos, se muestra a continuación el correspondiente a la probeta V-25/16/45/(10-25), realizado sobre una probeta fabricada con



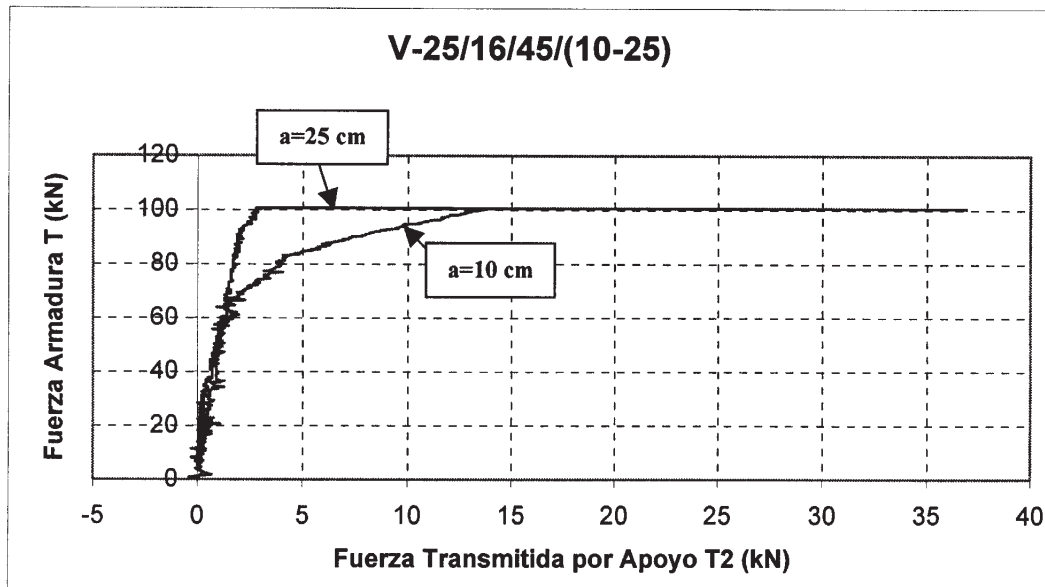


Figura 10. Relación entre el esfuerzo de tracción en la armadura y la fuerza transmitida en el apoyo.

hormigón HA-25, diámetro de barra  $\phi 16$ , ángulo de inclinación de la biela  $45^\circ$  y longitudes de 10 y 25 cm en cada una de las dos semiprobetas objeto del ensayo.

En la Figura 10 se representa la fuerza de tracción en la armadura (T) frente a la fuerza (T2) medida en la célula de carga dispuesta en la placa de anclaje por apoyo, para dos longitudes adherentes: 10 y 25 cm.

Inicialmente, para niveles de fuerza en la armadura de hasta 60 kN (correspondiente a una tensión de aproximadamente 300 MPa), ésta se transmite prácticamente en su totalidad en la zona adherente del nudo, ya que la fuerza transmitida por apoyo es prácticamente despreciable.

En el caso de la probeta con 10 cm de longitud adherente, a partir de ese nivel se observa un progresivo aumento de la fuerza transmitida por apoyo, lo que pone de manifiesto que se están alcanzando niveles próximos a la tensión tangencial máxima de adherencia. A pesar de ello, para el nivel de plastificación de la armadura (poco más de 100 kN) la fuerza transmitida por adherencia sigue siendo muy importante en relación con la transmitida por apoyo:

Fuerza transmitida por apoyo:  $\cong 13$  kN

Fuerza transmitida por adherencia:  $\cong 100 - 13 = 87$  kN

En la probeta de 25 cm de longitud adherente, se alcanza el nivel de plastificación de la armadura sin que se observe la fase de agotamiento de las tensiones tangenciales de adherencia, ya que no se miden apenas fuerzas transmitidas por apoyo (aproximadamente 3 kN de los 100 aplicados).

## 5. CONCLUSIONES

- Se ha diseñado un ensayo que permite analizar el comportamiento adherente en los nudos C-C-T. La principal

aportación de este ensayo, en relación con otros en los que se introduce presión lateral, es que en éste, dicha presión lateral es proporcional a la fuerza de tracción de la armadura, manteniendo constante un determinado ángulo de inclinación de la biela, como realmente ocurre en el anclaje de las armaduras principales en regiones D como apoyos a media madera, extremos de vigas o anclajes en punta en ménsulas cortas.

- La instrumentación empleada permite cuantificar adecuadamente las magnitudes necesarias para caracterizar el fenómeno objeto de estudio. Fundamentalmente, este ensayo capta con total precisión la fuerza transferida en la longitud adherente en el nudo, con lo que es posible determinar, en agotamiento, la proporción de fuerza que es necesario anclar por prolongación recta de la armadura.
- En los ensayos efectuados hasta ahora, se ha alcanzado un nivel de carga con el que se llega a plastificar la armadura aunque hayan aparecido fisuras, tanto diagonales como longitudinales. Este hecho ha llevado a la decisión de no incluir armadura transversal en la probeta, para poder estudiar el comportamiento adherente de la armadura en el nudo sin la posible influencia del confinamiento aportada por estas armaduras.
- El diseño de la probeta y los equipos de medida dispuestos permiten realizar dos determinaciones en cada ensayo, ya que aunque falle completamente la adherencia en una, o incluso en las dos semi-probetas, debido a la existencia del sistema de anclaje por apoyo siempre es posible continuar el ensayo hasta la plastificación en las armaduras.

## Agradecimientos

El contenido del presente artículo se enmarca en una línea de investigación que está llevando a cabo el Grupo de Investigación de Análisis, Diseño y Tecnología de la Construcción (ADITEC) en el Departamento de Ingeniería de la Construc-

ción y de Proyectos de Ingeniería Civil de la Universidad Politécnica de Valencia. Este trabajo cuenta con la financiación de la Generalitat Valenciana (Referencia GV-01-301).

## 6. REFERENCIAS

1. Adebar, P., Kuckma, D. and Collins, M. "Strut-and-Tie Models for Design of Pile Caps: An Experimental Study". *ACI Structural Journal*. V. 87, Núm. 1, Enero-febrero, 1990.
2. Brian, S. Maxwell, Jhon E. Breen. "Experimental Evaluation of Strut-And-Tie-Model Applied to Deep Beam with Opening". *ACI Structural Journal*, enero-febrero, 2000.
3. Código Modelo CEB-FIB 1990 para Hormigón Estructural.
4. E.H.E. Instrucción de Hormigón Estructural. Ministerio de Fomento.
5. Hong, S.G. "Truss Model for Tension Bars in Reinforced Concrete Beams: Tension-Tension-Compression REgions". *ACI Structural Journal*. V. 93, núm. 6, noviembre-diciembre, 1996.
6. Hong, S.G. "Strut-and-Tie Models and Failure Mechanisms for Bar Development in Tension-Tension-Compression Nodal Zone. *ACI Structural Journal*. Vol. 97, núm. 1, enero-febrero, 2000.
7. Hong, S.G. and Mueller, P. "Truss Model and Failure Mechanism for Bar Development In C-C-T Nodes". *ACI Structural Journal*. V. 93, núm. 5, septiembre-octubre, 1996.
8. Johansson, M. "Nonlinear Finite-Element Analysis of Concrete Frame Corners". *Journal of Structural Engineering*. Enero-febrero, 2000.
9. Liang, Q.Q., Xie, Y.M. and Steven, G.P. "Optimal Topology Selection of Continuum Structures with Displacement Constraints". *Computer and Structures*, 77. Pergamon, 2000.
10. Martínez Martínez, A. "Sistematización numérica del Método Biela - Tirante". Tesina presentado como Trabajo Final de Carrera en la E.T.S.I.C.C.P. de Valencia. Director: Pedro F. Miguel Sosa. U.P.V., 1998.
11. Schlaich, J.; Schäfer, k. y Jennewein, M. "Toward a Consistent Design of Structural Concrete". *PCI Journal*, V. 32, núm. 3, mayo-junio, 1987.
12. Schlaich, M. Anagnostou, G. "Stress Fields for Nodes of Strut and Tie Models"., *Journal of Structural Engineering*, Enero, 1990.
13. Siao, W.B. "Shear Strength of Short Reinforced Concrete Walls, Corbels and Deep Beams". *ACI Structural Journal*. V. 91, núm. 2, marzo-abril, 1994.
14. Yun, Y.M. and Ramírez, J.A. "Strength of Struts and Nodes in Srut Tie Models". *Journal of Structural Engineering*. Vol. 122, núm. 1, enero, 1996.