

Estudio experimental de abolladura en almas esbeltas de pilares metálicos

ESTHER REAL (*); ENRIQUE MIRAMBELL (**); ALFREDO ARNEDO (***)

RESUMEN Con el fin de analizar el comportamiento de pilares armados metálicos sometidos a compresión frente a cargas concentradas y evaluar su capacidad resistente, se ha llevado a cabo una campaña de ensayos experimentales sobre pilares metálicos con sección en doble T, variando el ancho de las alas. Previamente se midieron las imperfecciones reales de las placas que constituían el alma y alas de cada pilar, para poder evaluar la influencia de las imperfecciones en la respuesta estructural y en la capacidad resistente de los pilares metálicos ensayados. La instrumentación mediante galgas extensométricas y transductores de desplazamiento permitió realizar un seguimiento exhaustivo de la respuesta tenso-deformacional de los elementos ensayados durante el desarrollo de los experimentos. Los resultados derivados de la experimentación permiten extraer conclusiones relativas a la distribución de tensiones en el alma en fase postcrítica (ancho eficaz), a la influencia de la rigidez de las alas sobre el fenómeno de la abolladura y sobre la capacidad resistente de los pilares y al modo de rotura que tiene lugar en este tipo de estructuras frente a cargas concentradas ("patch loading").

EXPERIMENTAL ANALYSIS OF LOCAL BUCKLING IN SLENDER WEBS OF STEEL PLATED COLUMNS

ABSTRACT In order to analyse the behaviour of slender webs in steel plated columns subjected to concentrated loads and to evaluate the ultimate load bearing capacity, a serie of experimental tests over five steel plated columns with double T cross-section is carried out. Previously, initial geometric imperfections of the steel plates are measured experimentally. Strain gages and transducers are placed on the external surfaces of the tested columns to determine their structural response under the concentrated load effects. The results derived from the experimental tests allow for conclusions to be reached about the stress distribution in the postcritical range of these steel plated columns, the ultimate load bearing capacity and the local mechanism of collapse of the tested steel columns

Palabras clave: Estructuras esbeltas de chapa; Imperfecciones iniciales; Abolladura; Resistencia postcrítica; Ensayos experimentales.

1. INTRODUCCIÓN

En la construcción metálica se presentan, con mucha frecuencia, casos de paneles o chapas solicitadas en su plano (almas de vigas armadas sometidas a flexocompresión y/o cortante, alas de vigas armadas sometidas a compresión, elementos planos pertenecientes a pilares armados sometidos a compresión,...) siendo la abolladura de dichos elementos estructurales el fenómeno que condiciona, en gran medida, su dimensionamiento. Ello es así debido a que dichos elementos presentan una significativa esbeltez, alcanzándose una relación canto/peso adecuada. Una chapa sometida a estados tensionales contenidos en su plano se deforma

abollándose, es decir, sufriendo corrimientos normales a su plano medio. La diferencia fundamental entre el pandeo de barras y la abolladura de placas es que éstas últimas pueden presentar una reserva de resistencia después de abollar (resistencia postcrítica) que, dependiendo de la geometría de la chapa, de las condiciones de vinculación de la misma y del estado tensional al que se ven sometidas, puede ser ciertamente significativa (Roca et al., 1996). Con el objetivo de profundizar en estos aspectos se ha desarrollado una campaña de ensayos experimentales sobre diferentes pilares metálicos armados con sección transversal en doble T constituidos por chapas de acero y sometidos a compresión. Los pilares metálicos ensayados se han dimensionado de tal manera que la chapa de acero susceptible de verse sometida a los efectos de la inestabilidad local y de la carga concentrada ("patch loading") es la chapa que constituye el alma de los pilares.

La figura 1 muestra una caracterización del fenómeno de inestabilidad local en chapas de acero a través de una curva genérica carga-desplazamiento normal de un punto perteneciente al plano medio de la chapa (Mirambell y Roca, 1993).

En dicha curva se observa una primera rama lineal, existiendo proporcionalidad entre la carga aplicada y el desplazamiento nodal perpendicular al plano medio de la placa. La placa contemplada pretende ser una placa real, no exenta de

(*) Ingeniero de Caminos, Departamento de Ingeniería de la Construcción. UPC Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona.

(**) Dr. Ingeniero de Caminos, Departamento de Ingeniería de la Construcción. UPC Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona.

(***) Dr. Ingeniero de Caminos, Departamento de Ingeniería de la Construcción. UPC Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona. INYPSA.

FIGURA 1. Caracterización generalizada del fenómeno de la abolladura (Mirambell y Roca, 1992).



imperfecciones geométricas iniciales. Así, el concepto de carga crítica de abolladura obtenida de acuerdo con la teoría clásica pierde su relevancia; no obstante, a partir de un cierto valor de la carga, próximo al de la carga crítica, se pierde la proporcionalidad entre carga y desplazamiento. Alcanzado este punto, y suponiendo que se está en presencia de una chapa esbelta capaz de ofrecer resistencia postcrítica, se entra en una zona de la curva de pendiente más o menos constante, menor que la inicial, hecho éste que se corresponde con el proceso de rigidización en el dominio postcrítico.

Un análisis estructural considerando la no linealidad del material permite determinar la extensión del rango postcrítico, es decir, permite controlar el valor de la carga para el cual entra en juego en la respuesta tenso-deformacional de la placa el comportamiento no lineal del material acero. A partir de ese punto, la curva carga-desplazamiento normal cambia de pendiente claramente, tomando de forma general un valor positivo inicialmente para después adoptar un valor próximo a cero, alcanzándose el agotamiento.

La investigación experimental que se presenta en este artículo tiene como objetivo reproducir esta respuesta tenso-deformacional de las placas de acero, observando y analizando los fenómenos de carácter no lineal que introducen, por una parte, la ecuación constitutiva del acero y, por otra, el proceso de rigidización postcrítica mediante la aparición de esfuerzos de membrana y de la consecuente redistribución de tensiones (ancho eficaz).

Asimismo, los pilares metálicos ensayados se ven sometidos a una carga concentrada local, lo cual condujo a que los pilares agotaran desarrollando un mecanismo de rotura muy similar a los ya encontrados en la experimentación y utilizados para la verificación y dimensionamiento de vigas armadas sometidas a cargas concentradas aplicadas en una pequeña longitud ("patch loading") (Roberts y Newark, 1997; Lagerqvist, 1994). El seguimiento de los experimentos, los cuales se llevaron a cabo mediante control de desplazamiento, permiten observar la evolución de las deformadas abolladas de los pilares y su transición hacia el mecanismo de colapso ocasionado por la introducción de la carga concentrada local.

2. DESCRIPCIÓN DE LOS ENSAYOS EXPERIMENTALES

Con el objetivo de poder analizar el comportamiento de pilares armados sometidos a compresión frente a cargas concentradas, y evaluar su capacidad resistente, se ha realizado una campaña de ensayos sobre cinco pilares metálicos armados en los que solamente varía el ancho de las alas, y cuya geometría es la que se presenta en la figura 2. Las dimensiones de los pilares se presentan en la tabla 1.

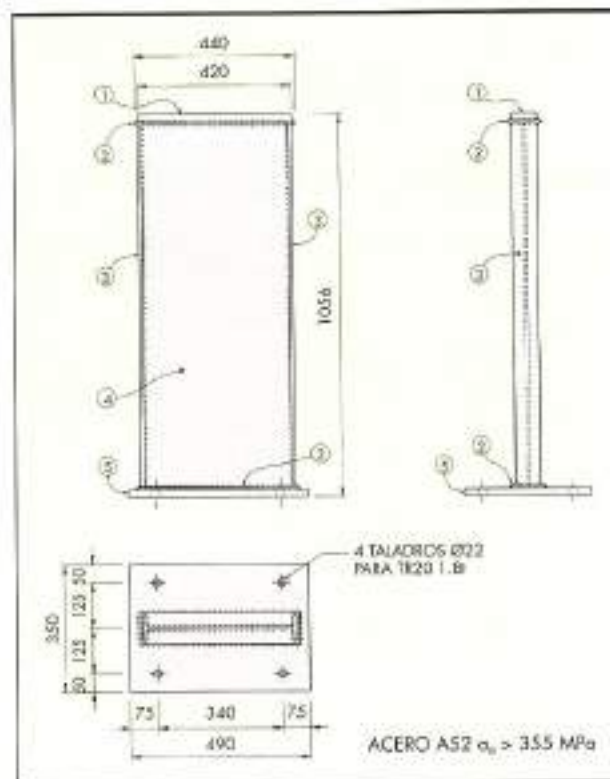


FIGURA 2. Geometría de los pilares metálicos armados ensayados.

DIMENSIONES DE LAS PIEZAS DE LOS PILARES (mm)						
PIEZA	Nº	PILAR 1	PILAR 2	PILAR 3	PILAR 4	PILAR 5
1	1	420.120.20	420.100.20	420.80.20	420.70.20	420.60.20
2	2	440.140.8	440.120.8	440.100.8	440.90.8	440.80.8
3	2	1000.120.8	1000.100.8	1000.80.8	1000.70.8	1000.60.8
4	1	1000.400.3	1000.400.3	1000.400.3	1000.400.3	1000.400.3
5	1	490.350.20	490.350.20	490.350.20	490.350.20	490.350.20

TABLA 1. Dimensiones de los pilares armados metálicos ensayados.

La esbeltez global de los pilares ensayados es tal que no se produce el pandeo por flexión de los mismos previamente a la aparición de los fenómenos de inestabilidad ocasionados por el efecto de la abolladura. Los espesores de las distintas chapas que constituyen los pilares son adecuados para que se desencadenen los fenómenos de abolladura y de mecanismo de colapso local sin tener que llegar a cargas excesivamente altas, permitiéndose así una perfecta adaptación de los elementos ensayados a las prestaciones de la prensa utilizada y asegurando un adecuado control de la misma durante los experimentos.

En la parte inferior de los pilares ensayados se dispone una placa que confiere al pilar un empotramiento en la base y que además permite posicionarlo en la prensa empleada en los ensayos. En la parte superior del pilar se dispone otra placa gruesa para asegurar, en la medida de lo posible, un reparto uniforme de la carga en el alma del pilar metálico; más adelante se verá que para estados elevados de carga influye, de forma muy notable, el efecto local de introducción de la carga obteniéndose deformadas en rotura muy similares a los mecanismos de colapso de "patch loading". El acero utilizado en la confección de los pilares metálicos armados es acero A52 de límite elástico $\sigma_e > 355$ Mpa.

2.1. INFLUENCIA DE LAS IMPERFECCIONES GEOMÉTRICAS INICIALES

Con el objetivo de poder evaluar mediante modelos numéricos el comportamiento real del alma frente al fenómeno de

la abolladura y poder contrastar los resultados numéricos con los derivados de la experimentación se hace absolutamente imprescindible el conocer la geometría inicial de las chapas de los pilares metálicos a ensayar; tales chapas no son perfectamente planas, debido a los propios procesos de fabricación. El perfil y la magnitud de las imperfecciones pueden influir de forma considerable en los resultados obtenidos en los ensayos experimentales y, evidentemente, deben ser contemplados a la hora de llevar a cabo una futura contrastación numérica de dichos resultados.

Por lo tanto, antes de ensayar los pilares se miden las deformadas reales de las chapas que forman el alma de cada pilar, con el fin de evaluar posteriormente la influencia de las imperfecciones en su respuesta estructural. Estas deformaciones se miden con unos dispositivos especialmente ideados para tal fin, que basan su funcionamiento en transductores de desplazamiento inductivos, los cuales convierten la variación de posición en una señal eléctrica recogida por un plotter para así reproducir la deformación medida. Cada uno de los medidores está formado por dos transductores de desplazamiento (LVDT), uno en sentido longitudinal, de mayor recorrido, el cual permite conocer la posición en la que se encuentra el dispositivo, y otro en sentido transversal, de menor recorrido, que sirve para determinar la deformación fuera del plano del alma. En la figura 3 puede verse una fotografía de los dos dispositivos juntos sobre un pilar a ensayar.

El esquema de funcionamiento de estos dispositivos de medida de imperfecciones es el siguiente. En primer lugar



FIGURA 3. Medidor de imperfecciones geométricas iniciales.

se coloca el pilar sobre una mesa, apoyado sobre unos niveladores, de manera que esté perfectamente horizontal. A continuación se hace pasar el dispositivo menor por cada una de las líneas horizontales, de ala a ala, pintadas previamente sobre el alma del pilar, y se recogen los resultados en el plotter. Seguidamente se repite la operación con el medidor más largo y en sentido vertical (de placa de carga a placa base). En el plotter se obtiene una curva recorrido-desplazamiento perpendicular para cada pasada del dispositivo y las escalas vertical y horizontal por las que se tiene que multiplicar cada una de las curvas vienen determinadas por la sensibilidad del LVDT correspondiente y los rangos de escala que se hayan dado al plotter en cada dirección.

Una vez obtenidas todas las gráficas, se tienen las coordenadas de los puntos de las placas que están sobre las líneas por las que ha discurrido el medidor. Los datos correspondientes a los puntos de intersección de las líneas verticales con las horizontales se introducen en un fichero y a partir de éste, mediante un programa de tratamiento gráfico, pueden representarse las coordenadas de todos los puntos de las placas de acero de las almas de los pilares me-

diantes la definición de las pertinentes curvas de nivel, obteniéndose perspectivas de tales deformadas en tres dimensiones. A continuación, en la figura 4 se muestran, a modo de ejemplo, las deformadas reales iniciales obtenidas para las almas de los pilares 4 y 5 (imperfecciones geométricas iniciales).

Las deformadas reales iniciales de las placas pueden introducirse posteriormente en un modelo de análisis numérico, basado en el método de los elementos finitos, que tenga en cuenta la no linealidad geométrica y la no linealidad del material y poder así evaluar la influencia de las imperfecciones en el desarrollo del fenómeno de la abolladura y del posterior mecanismo de colapso.

2.2. INSTRUMENTACIÓN UTILIZADA EN LOS ENSAYOS EXPERIMENTALES

Una vez medidas las imperfecciones geométricas iniciales de las almas de los pilares, se dispone a continuación la instrumentación idónea para poder conocer con suficiente precisión el estado tenso-deformacional de los pilares a lo largo del desarrollo del experimento. Dicha instrumentación consta, en grandes líneas, de un conjunto de galgas extensométricas, en roseta y unidireccionales, para medir las deformaciones del acero en las alas y almas de los pilares, de un conjunto de transductores LVDT que permiten conocer los desplazamientos del alma fuera de su plano durante el ensayo y de un reloj comparador ubicado en la zona superior del alma, el cual proporciona información sobre las deformaciones y movimientos asociados a los mecanismos de colapso locales, muy próximos a la zona de introducción de la carga ("patch loading").

Tal como se ha comentado con anterioridad, uno de los objetivos que se persiguen a lo largo de este trabajo de investigación, y que será presentado en futuros artículos, es contrastar los resultados derivados de la experimentación con los obtenidos mediante el empleo de modelos numéricos de análisis avanzado de estructuras que contemplen la no linealidad geométrica y reproduzcan el comportamiento post-crítico de este tipo de estructuras así como los posibles mecanismos de colapso que en ellas puedan aparecer. Por consiguiente, la instrumentación se dispone de tal manera que la ubicación de las galgas extensométricas coincide con la localización de los puntos de integración de la malla de elementos finitos en los que se discretizan las placas; ello permitirá una contrastación directa de las deformaciones obtenidas numérica y experimentalmente. Por la misma razón, los transductores de desplazamiento LVDT se colocan sobre los nodos de la malla de elementos finitos que se utilizará posteriormente en la simulación numérica de los ensayos (figura 5).

El número de galgas y de transductores de desplazamiento a disponer y su localización en las chapas de acero que constituyen los pilares a ensayar persiguen los siguientes objetivos:

- Para poder conocer la carga vertical que entra en el pilar por el alma (galgas 1-6) y por las alas (galgas 33, 34, 39 y 40), se colocan en su parte superior galgas unidireccionales dispuestas verticalmente.
- Para evaluar la tensión de membrana, se disponen cinco galgas a cada lado del alma (galgas 17-26) según un eje vertical y orientadas en dirección transversal.
- Las galgas 7-16, dispuestas en una sección transversal horizontal del alma a dos tercios de la altura del pilar, permiten conocer las tensiones longitudinales (en la

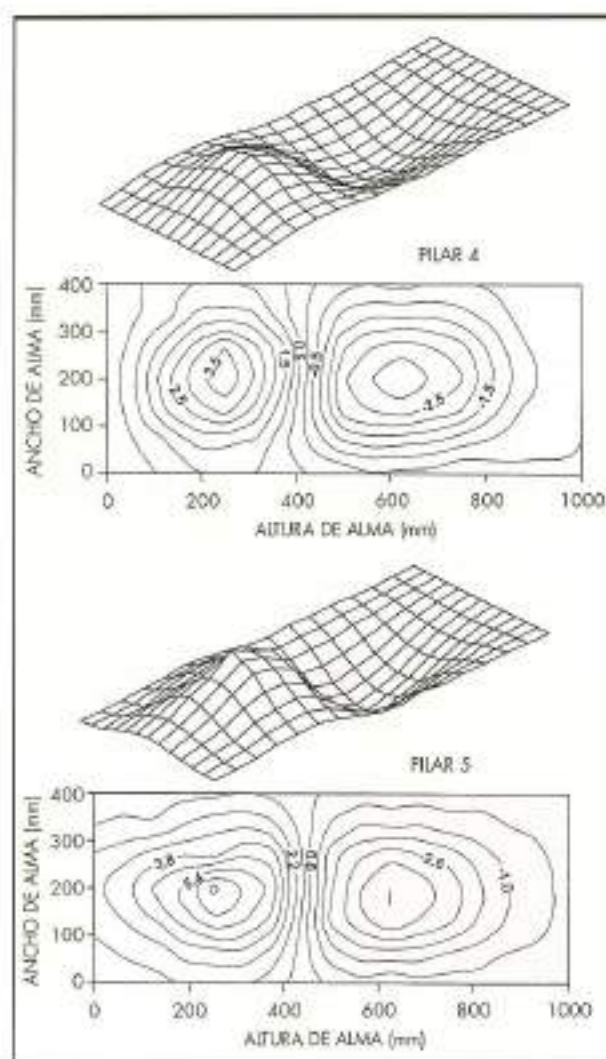


FIGURA 4. Imperfecciones geométricas iniciales. Deformada inicial y curvas de nivel del alma de los pilares 4 y 5.

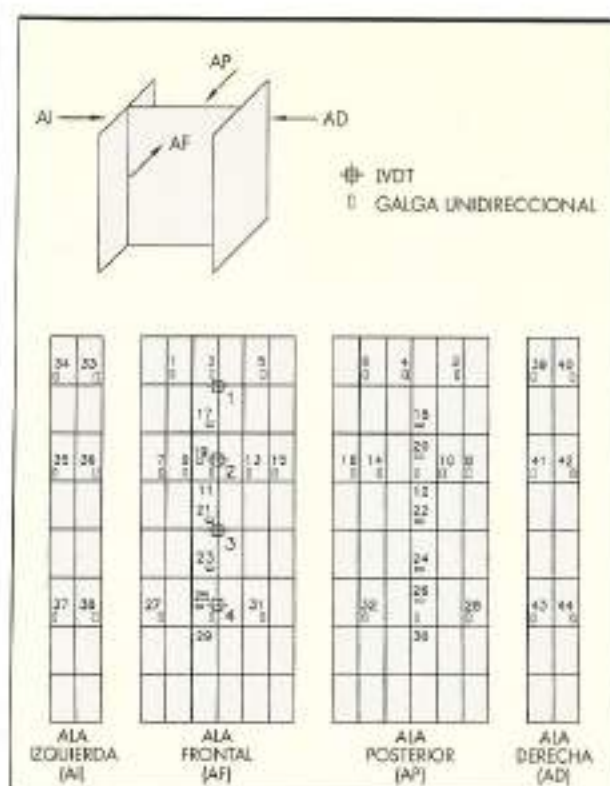


FIGURA 5. Instrumentación utilizada en los ensayos.

dirección de aplicación de la carga) en dicha sección, a lo largo del desarrollo del ensayo. En esta misma sección transversal del pilar se ubican cuatro galgas en las alas (galgas 35, 36, 41 y 42) para averiguar qué porcentaje de la carga introducida se canaliza a través de ellas.

- Finalmente se disponen tres galgas verticales a cada lado del alma en la parte inferior (galgas 27-32) y dos en cada ala (galgas 37, 38, 43 y 44) para poder conocer cuál es el reparto de carga en la zona del pilar próxima a su placa base.
- Los transductores de desplazamiento LVDT se colocan a lo largo del eje vertical de simetría del alma del pilar, pudiendo así determinar el recorrido de las ondas que se forman durante el proceso de carga hasta que se desencadena el mecanismo de colapso del pilar ensayado.

2.3. PUESTA EN CARGA Y ADQUISICIÓN DE DATOS

Los ensayos experimentales se realizan en una prensa que funciona como pórtico de carga autoportante que, mediante un pistón móvil, puede aplicar una carga máxima de 1000 kN sobre la probeta a ensayar (en este caso, los pilares metálicos). La carga se introduce mediante control de desplazamiento del pistón, permitiendo reproducir respuestas estructurales dúctiles y ramas de reblandecimiento.

La prensa posee un panel de control al que se le dan las instrucciones oportunas y en el que aparece, en todo momento, la carga y desplazamiento vertical que está siendo introducido sobre la probeta. En este panel de control se introduce el desplazamiento que se quiere dar a la prensa en cada paso de carga y la velocidad con la que se aplica dicho desplazamiento impuesto; el panel está conectado a un orde-

nador personal mediante dos salidas analógicas, una de las cuales permite archivar las lecturas de carga actuante y otra las lecturas de desplazamiento introducido.

Por otra parte, las galgas y los transductores de desplazamiento se conectan a un módulo de conexión que manda las señales recogidas de una en una al sistema de adquisición de datos, en donde la señal analógica emitida se transforma en digital; esta señal puede ser leída por el ordenador personal, el cual, mediante el programa pertinente, recoge el valor del voltaje y lo transforma en deformación de la galga o en desplazamiento de los LVDT. En la figura 6 se muestra uno de los pilares ensayados, posicionado en la prensa.

3. RESULTADOS EXPERIMENTALES

En este apartado se presentan algunos de los resultados obtenidos en los ensayos experimentales; un análisis de los mismos permite conocer la respuesta estructural de los pilares armados metálicos ensayados. El conjunto de todos los resultados experimentales pueden consultarse en Real (1995).

3.1. CURVAS CARGA-ACORTAMIENTO AXIAL

En primer lugar se muestran las gráficas correspondientes a las curvas carga-acortamiento axial para cada uno de los pilares ensayados (figura 7). Del análisis de estas curvas, las cuales facilitan un seguimiento del comportamiento estruc-

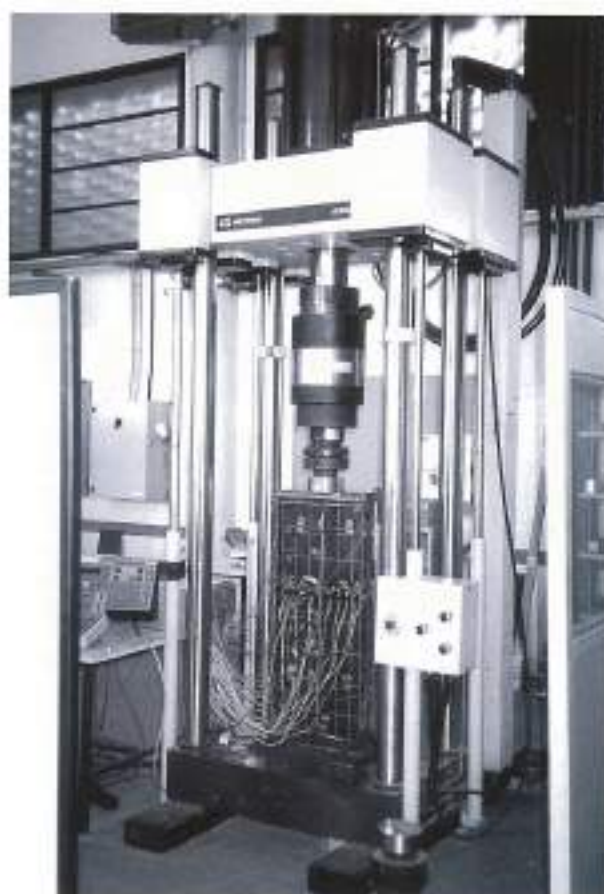


FIGURA 6. Pilar dispuesto en prensa antes de llevar a cabo el ensayo. Conexiones al sistema de adquisición de datos.

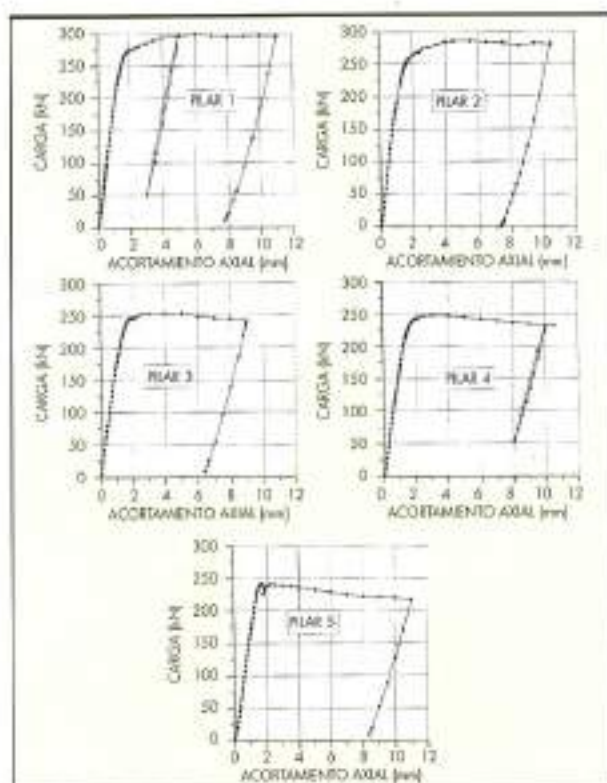


FIGURA 7. Curvas carga-acortamiento axial de los pilares ensayados.

tural global de los pilares a medida que se incrementa la carga, pueden extraerse algunas conclusiones parciales:

- En una primera fase, el pilar va absorbiendo carga y su curva carga-acortamiento axial es lineal.
- A medida que aumenta la carga, la rama se va curvando debido a que entran en juego la no linealidad geométrica y la no linealidad del material. Esta zona de la curva en la que se pierde la linealidad, de no gran extensión, marca la aparición del fenómeno de "patch loading", apreciándose, de forma clara, la geometría del mecanismo de colapso asociado.
- Finalmente el pilar alcanza su carga máxima y a partir de ese momento ya no es capaz de absorber más carga, aumentando su deformación de forma significativa, y apreciándose ramas de la curva de pendiente negativa.
- En los ensayos en los que se han realizado ramas de carga y descarga, las pendientes de las ramas correspondientes coinciden con la pendiente de la rama lineal de carga inicial y una vez alcanzada la carga de partida, el pilar se sigue comportando con la misma tendencia que la que mostraba antes de la descarga.

En la tabla 2 que se presenta a continuación, pueden verse los valores de la carga a partir de los cuales se empieza a formar el mecanismo local de colapso en la zona del alma próxima a la de introducción de la carga, correspondiente a cada uno de los cinco pilares. Para estos valores de la carga, las curvas carga-acortamiento axial pierden de forma muy clara su linealidad.

De los resultados de la tabla se desprende que a medida que aumenta el ancho de ala del pilar, éste es capaz de ab-

PILAR	1	2	3	4	5
Ancho ala (mm)	120	100	80	70	60
Carga (kN)	270	265	250	244	240

TABLA 2. Valores de la carga, a partir de los cuales se desencadena el mecanismo de colapso local de los pilares armados metálicos ensayados ("patch loading").

sorber una carga ligeramente mayor con lo que el fenómeno de mecanismo local se desencadena más tarde. No obstante, en base a los resultados, puede concluirse que el ancho de alas no es un factor ciertamente relevante a la hora de cuantificar la carga de colapso de estos pilares armados. Un mayor ancho de ala supone un mayor grado de empotramiento del alma en las alas, lo cual se traduce en un incremento de la carga de colapso de estos pilares. Pero es evidente que el mecanismo de rotura y la carga de colapso vienen controlados por otros parámetros de los pilares, ya sea relativos al tipo de acero o a la propia geometría ensayada.

3.2. CURVAS CARGA-DESPLAZAMIENTO NORMAL AL PLANO MEDIO DE LA CHAPA DE ALMA

En este apartado se muestran las gráficas correspondientes a los desplazamientos normales de la chapa del alma fuera de su plano, determinados mediante los cuatro transductores de desplazamiento dispuestos en el eje de simetría del alma de los pilares ensayados (figura 8). La ubicación de dichos transductores (LVDT) queda recogida en la figura 6.

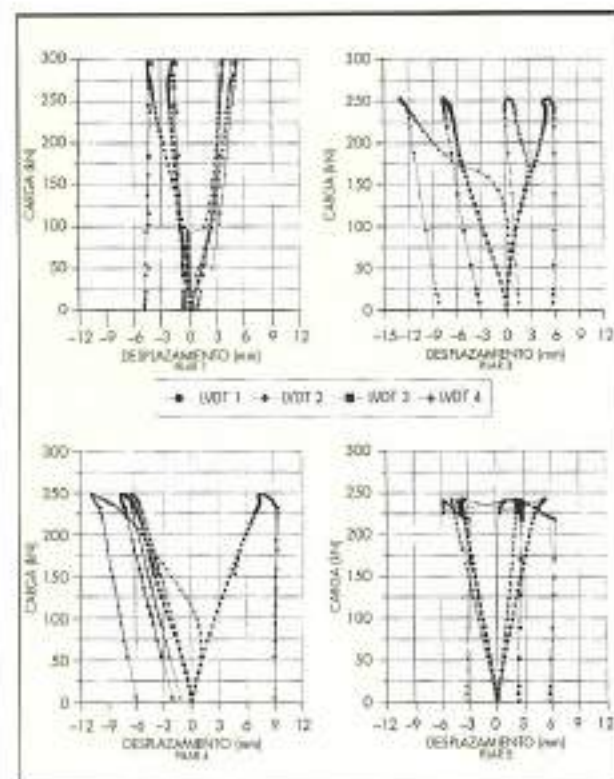


FIGURA 8. Curvas carga-desplazamiento normal al plano medio del alma (LVDT) de los pilares ensayados.

Analizando con detalle las curvas carga-desplazamiento normal puede apreciarse que el LVDT 1 tiene un recorrido creciente para los cinco pilares ensayados, marcando así la evolución del mecanismo de colapso local en la zona cercana a la de introducción de la carga. El transductor LVDT 2 muestra un cambio de comportamiento en lo que se refiere a su desplazamiento, a medida que se incrementa el valor de la carga introducida; ello no es sino reflejo de la evolución de la deformada abollada del alma del pilar en función del nivel de carga al que se ve sometido el pilar. Los LVDT 3 y 4 registran corrimientos en dirección opuesta a los experimentados por el alma del pilar en su zona superior, siendo la magnitud de los mismos significativamente menor. Al llevar a cabo la descarga definitiva de los pilares puede apreciarse que éstos quedan con una deformación remanente importante, lo cual muestra el alto grado de plastificación que se localiza en la zona de colapso de los pilares ensayados. Este efecto ocurre para todos los pilares y tiene su reflejo en las curvas carga-desplazamiento registradas por los transductores y es tanto más apreciable cuanto más cerca estén de la zona de introducción de la carga (LVDT 1 y 2). Cabe indicar aquí que para el pilar 2 no se pudieron registrar las gráficas correspondientes a los LVDT, debido a un fallo de alimentación en el sistema de adquisición de datos.

Por último, conviene centrar el análisis de resultados en lo obtenido para el pilar 5. En todas las gráficas correspondientes al ensayo de este pilar (figura 8), puede apreciarse un cambio brusco de comportamiento para un valor de la carga próximo a su carga última de 240 kN. Los cambios repentinos en las curvas que relacionan los desplazamientos de los LVDT con el nivel de carga reflejan el fenómeno de "snap through" que tuvo lugar durante el experimento. Las medidas experimentales registradas durante el ensayo (galgas y transductores) confirmaban el hecho de que el pilar fue absorbiendo carga adoptando una configuración deformada inestable, hasta el instante en el que éste cambia de forma brusca e instantánea su deformada, adquiriendo una configuración estable. Debe señalarse que una vez producido el fenómeno de "snap through", se mantuvo la tendencia observada para el resto de pilares ensayados; es decir, la configuración deformada del pilar era diferente, pero también se podía observar el recorrido ascendente de las ondas de deformación hacia la parte superior de los pilares, para luego concentrarse las ondas en la zona superior del alma en donde se localiza el mecanismo de colapso local.

3.3. CURVAS CARGA-DEFORMACIÓN

En este apartado se procede a analizar el estado tensional de los pilares ensayados en base a la información obtenida mediante las galgas dispuestas en los mismos. Su designación y ubicación puede verse en la figura 5.

Analizando los resultados de una pareja de galgas ubicadas en el mismo punto del pilar, pero a ambos lados del panel de alma, se puede conocer la componente de membrana y de flexión desarrollada en ese punto. La deformación de membrana se obtiene haciendo la media de las deformaciones registradas por cada una de las galgas, mientras que la deformación por flexión se obtiene restando las deformaciones de cada galga y dividiendo por dos. Por lo tanto, gráficas carga-deformación de una pareja de galgas con perfil aproximadamente simétrico respecto al eje de deformación nula representarán comportamientos tensionales en donde la componente de membrana es muy pequeña en la zona del panel en la que se ubican dichas galgas. Tal comportamiento se corresponde con esquemas resistentes en donde prepon-

deran los mecanismos de flexión. La importancia relativa de dicha componente de flexión aumenta a medida que aumenta la deformación relativa de una galga con respecto a la otra. Las siguientes expresiones permiten determinar, para las dos galgas ubicadas en las caras externas del panel y dispuestas simétricamente respecto a su plano medio, las deformaciones de membrana y flexión:

$$\varepsilon_m = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{2} \text{ deformación de membrana} \quad [1]$$

$$\varepsilon_f = \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{2} \text{ deformación de flexión} \quad [2]$$

Las gráficas que se presentan a continuación representan curvas carga-deformación obtenidas en base a la información derivada de la instrumentación. Conociendo la deformación de un punto perteneciente a una superficie cualquiera de los paneles de alas y alma de los pilares, en la dirección de la galga (galga unidireccional) y en la dirección perpendicular a la misma, puede obtenerse, mediante la siguiente expresión [3], la tensión en ese punto según la dirección de la galga. Por consiguiente, se está en condiciones de poder obtener de forma precisa el estado tensional al que se ven sometidos los pilares en función del nivel de carga aplicada sobre los mismos.

$$\sigma_G = \frac{E}{(1-\nu^2)} (\varepsilon_G + \nu \varepsilon_{\perp G}) \quad [3]$$

En esta ecuación, E y ν son respectivamente el módulo de elasticidad y el coeficiente de Poisson del acero, ε_G y $\varepsilon_{\perp G}$ son las deformaciones medidas experimentalmente en la dirección de la galga y en la dirección perpendicular, respectivamente, y σ_G es la tensión según la dirección de la galga.

Con objeto de no hacer farragosa la presentación de los resultados obtenidos en los ensayos experimentales, solamente se analizan aquí los resultados relativos al ensayo del pilar 4. Los resultados experimentales correspondientes a los demás pilares no ofrecen, por otra parte, diferencias significativas que necesiten de un análisis particular más detallado y pueden encontrarse en Real (1985).

Para determinar de forma precisa la distribución de tensiones en base a la cual el pilar absorbe la carga introducida, basta con analizar las gráficas carga-deformación de las galgas situadas a lo largo de diferentes secciones transversales (galgas de la 1 a la 6 en la sección transversal superior y galgas de la 7 a la 16 en la sección transversal situada aproximadamente a dos tercios de la altura del pilar) (ver figura 5). La figura 9.a muestra las curvas carga-deformación correspondientes a las galgas 11 y 12 del pilar 4, situadas en las caras externas del alma en el eje de simetría del pilar, y, aproximadamente, a dos tercios de la altura medidos desde la base; dichas galgas miden la deformación en la dirección vertical, en el sentido de la entrada de carga. En esta figura puede observarse que la deformación de membrana es muy pequeña a lo largo de todo el ensayo y que la deformación de flexión aumenta a medida que va incrementándose la carga aplicada. Este significativo incremento del mecanismo de flexión es debido a que las galgas 11 y 12 se encuentran en una zona del pilar en la que la deformada abollada presenta desplazamientos normales al plano medio del alma importantes.

Analizando los resultados correspondientes a las galgas 15 y 16, más cercanas a las alas y, por lo tanto, alejadas del eje de simetría (ver figura 9.b), puede apreciarse que la componente de membrana va adquiriendo mayor importancia.

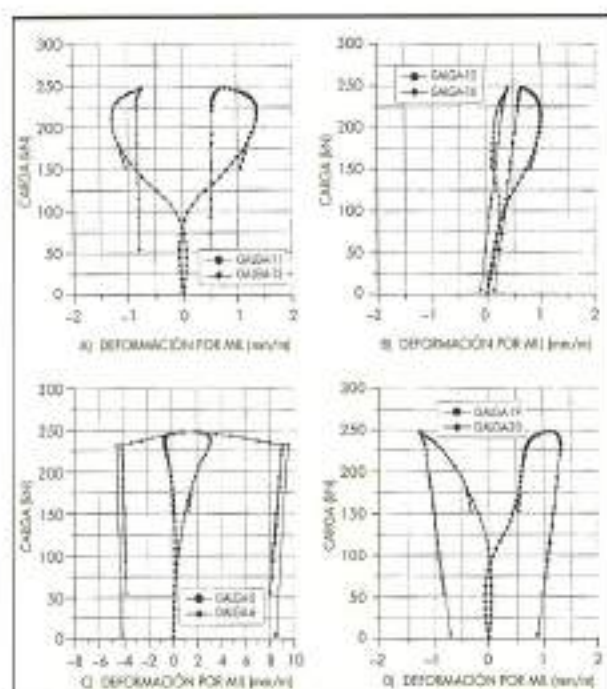


FIGURA 9. Curvas carga-deformación correspondientes a distintas parejas de galgas (pilar 4).

Tal como puede verse en la figura 5, las galgas 1-6 se encuentran situadas en la parte superior del alma del pilar, cerca de la zona de aplicación de la carga. En estas galgas se midieron deformaciones verticales en la dirección de entrada de la carga superiores a la deformación correspondiente al límite elástico del acero estructural, lo cual apunta a la localización de una determinada zona del pilar (pilar 4) que se encuentra en estado de plastificación (la deformación correspondiente al límite elástico es $355/205000=0.0017$, es decir, 1.7 mm/ml). En la figura 9.c se muestran también las gráficas correspondientes a las galgas 5 y 6.

Las galgas 17-26 están orientadas para medir deformaciones en dirección transversal (horizontal), perpendicular a la de entrada de carga. Las tensiones de membrana, tanto de compresión como de tracción, que puedan obtenerse en estas posiciones de las galgas representan tensiones que llevan la dirección horizontal; dichas tensiones de membrana son poco significativas si las comparamos con las que aparecen en la dirección perpendicular (vertical). La figura 9.d muestra las gráficas carga-deformación correspondientes a las galgas 19 y 20. Dichas galgas se sitúan a, aproximadamente, dos tercios de la altura del pilar en una zona fuertemente flectada. Su deformación de membrana, tal como se observa en la figura, es poco relevante, hasta incluso para valores altos de la carga aplicada.

Por otra parte, los registros de las galgas dispuestas en las alas nos permiten conocer si la carga en el pilar está entrando centrada según ambas direcciones longitudinal y transversal y poder cuantificar, en su caso, los efectos tensionales que tales excentricidades pueden ocasionar sobre el comportamiento global del pilar. Observando las curvas carga-deformación correspondientes a las galgas 33 y 34, mostradas en la figura 10, puede apreciarse que la entrada de la carga no es simétrica respecto al plano de simetría que contiene al alma del pilar ensayado, obteniéndose mayores

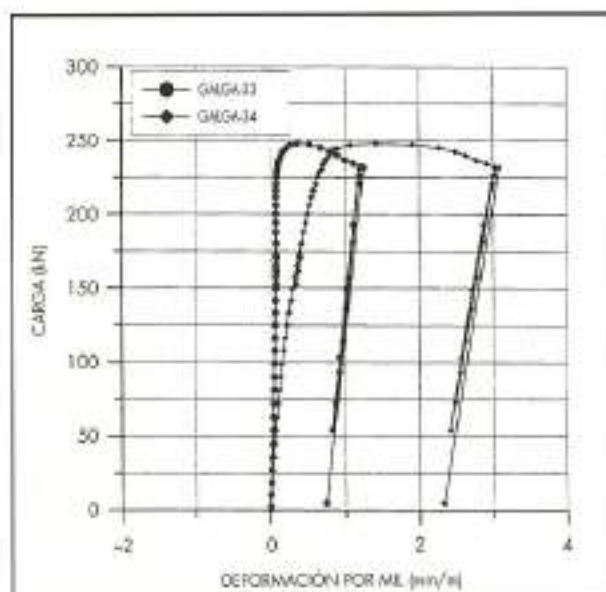


FIGURA 10. Curva carga-deformación correspondientes a los galgas 33 y 34, ubicados en las alas (pilar 4).

deformaciones para la galga 34 (ver figura 5). Idénticos resultados cualitativos y cuantitativos se obtienen para las galgas 39 y 40. Por lo tanto, puede concluirse que la excentricidad de la carga en la dirección del alma del pilar es prácticamente nula, mientras que en la dirección perpendicular al alma se tiene una pequeña excentricidad.

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS EXPERIMENTALES

4.1. PROGRESO DEL FENÓMENO DE ABOLLADURA HACIA EL MECANISMO LOCAL DE COLAPSO

En todos los pilares ensayados se ha podido constatar que la respuesta estructural de los mismos viene controlada, en un principio, por el desarrollo del fenómeno de la abolladura en el alma de los mismos, tal como se perseguía en los objetivos de la investigación experimental. El alma del pilar va amplificando su deformación inicial en forma de ondas. A medida que se avanza en el proceso incremental de carga las ondas correspondientes a la deformada abollada del panel de alma se van concentrando en la zona superior del pilar. Tal concentración marca la aparición del mecanismo local de colapso del pilar, obteniéndose así su carga de agotamiento (ver tabla 2). Dicha evolución desde la abolladura local hacia la aparición del mecanismo de colapso en la zona de introducción de la carga tuvo lugar de igual manera para los cinco pilares ensayados. A medida que aumenta el ancho de las alas de los pilares ensayados experimentalmente, la carga para la cual se desarrolla el mecanismo de colapso es ligeramente superior, lo que demuestra el mayor grado de empotramiento del alma del pilar en las alas a medida que se aumenta el ancho de las mismas. La carga de agotamiento del pilar 1, con un ancho de ala de 120 mm., fue de 270 kN, mientras que la del pilar 5, con un ancho de ala de 60 mm., fue de 240 kN.

La figura 11 muestra el mecanismo de colapso, con sus bandas de plastificación, correspondiente al ensayo del pilar 4. Asimismo, en la figura 12 se presentan diferentes deformadas según el eje vertical de simetría del alma (registro de los transductores LVDT 1, 2, 3 y 4) del pilar 4, correspon-



FIGURA 11. Mecanismo de colapso en el ensayo del pilar 4.

dientes a diferentes valores de la carga aplicada. En esta figura puede apreciarse la concentración de ondas en la parte superior del alma del pilar, apuntando al progreso existente de la respuesta estructural del pilar desde la deformada abollada hacia el mecanismo de colapso.

4.2. DISTRIBUCIÓN DE TENSIONES LONGITUDINALES EN EL ALMA DEL PILAR

Presentadas y analizadas las gráficas carga-deformación de las galgas de los pilares ensayados, puede determinarse las distribuciones de tensiones longitudinales (en la dirección de la entrada de carga) existentes en cualquier sección transversal (horizontal) del alma del pilar, las cuales dependerán del nivel de carga aplicada sobre el pilar. El perfil y magnitud de las distribuciones de tensiones reflejará el estado tensional al que se ve sometido el alma del pilar en esa sección y atenderá a un esquema en el que, dependiendo del nivel de carga, las tensiones longitudinales de compresión se concentrarán en la zona cercana a la unión ala-alma, poniéndose en evidencia el fenómeno de ancho eficaz (reparto de tensiones) que tiene lugar cuando la pieza en cuestión ya ha abollado y se entra en el rango de la resistencia postcrítica de la chapa. De nuevo, al igual que en anteriores apartados, se analizarán solamente los resultados experimentales correspondientes al ensayo del pilar 4. La sección transversal que se contempla para determinar las distribuciones de tensiones longitudinales es la sección situada, aproximadamente, a un tercio de la altura desde el punto de aplicación de la carga. En dicha sección se dispone de una abundante información, puesto que se encuentra instrumentada con galgas unidireccionales según ambas direcciones, vertical (longitudinal) y horizontal (transversal), y en ambas caras externas del alma. Asimismo, próximo a esa sección transversal se dispone el transductor de desplazamiento LVDT 1, el cual nos permite conocer cuál es el aspecto de la deformada transversal y saber cuándo aparecerán cambios de curvatura en esa dirección.

Registrada la deformación en cada galga de la sección, pueden calcularse mediante las expresiones [1] y [2] las deformaciones de membrana y de flexión correspondien-

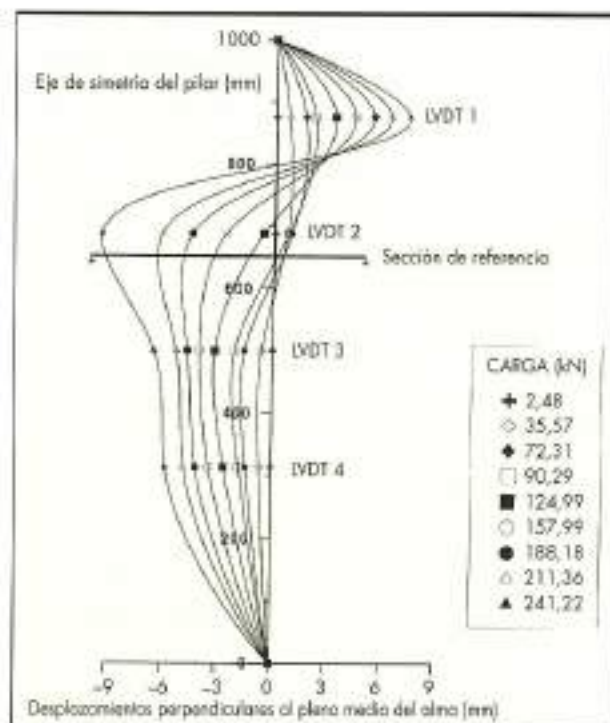


FIGURA 12. Evolución de la sección longitudinal deformada del alma del pilar, por su eje de simetría, con el nivel de carga (pilar 4).

tes a cada pareja de galgas situadas a cada lado del alma del pilar. En las alas sólo se disponen galgas en sus caras externas; por lo tanto, no se puede conocer la deformación de flexión, aunque en cualquier caso será pequeña y puede considerarse que toda la deformación es de membrana.

Por otra parte, conociendo las deformaciones en un punto cualquiera según la dirección de una galga genérica y según

TABLA 3. Deformaciones registradas en las galgas de la sección transversal analizada del alma del pilar 4: deformaciones en cara frontal y en cara posterior.

DEFORMACIONES E CARA FRONTAL (mm/m)						
CARGA (kN)	G-7	G-9	G-11	G-13	G-15	G-19
2.482	0.004	-0.001	-0.004	-0.011	0.005	-0.007
35.566	0.078	-0.005	-0.053	-0.05	0.082	-0.076
72.306	0.18	0.044	-0.035	-0.03	0.187	-0.047
90.286	0.249	0.113	0.029	0.046	0.257	0.021
124.99	0.481	0.47	0.406	0.419	0.495	0.271
157.587	0.738	0.946	0.908	0.917	0.775	0.478
188.185	0.887	1.244	1.224	1.278	0.945	0.58
211.365	0.913	1.338	1.35	1.398	0.995	0.63
241.223	0.748	1.069	1.124	1.209	0.832	0.816
DEFORMACIONES E CARA POSTERIOR (mm/m)						
CARGA (kN)	G-8	G-10	G-12	G-14	G-16	G-20
2.482	0.009	0.008	0.006	0.007	0.007	0.003
35.566	0.124	0.099	0.063	0.099	0.111	0.028
72.306	0.227	0.122	0.03	0.131	0.206	0.032
90.286	0.255	0.071	-0.058	0.088	0.233	0.019
124.99	0.218	-0.245	-0.475	-0.229	0.195	-0.061
157.587	0.14	-0.625	-0.952	-0.644	0.121	-0.242
188.185	0.127	-0.818	-1.218	-0.868	0.118	-0.454
211.365	0.157	-0.846	-1.293	-0.915	0.162	-0.679
241.223	0.312	-0.317	-0.969	-0.583	0.346	-1.129

la dirección perpendicular, a través de la expresión [3] puede obtenerse la tensión en la dirección de la galga. A continuación en la tabla 3 se recogen las deformaciones registradas por las galgas dispuestas en dirección vertical y horizontal en la sección transversal del alma del pilar 4, y para diferentes niveles de carga aplicada. La notación seguida en esta tabla es la misma que la que se presenta en la figura 5. Tales deformaciones se obtienen experimentalmente para ambas caras externas del alma (cara frontal y cara posterior).

A partir de los resultados presentados en la tabla 3 y haciendo uso de la expresión [3], se obtienen las tensiones longitudinales (verticales), según la dirección de la carga. Los resultados obtenidos se muestran a continuación en la tabla 4.

Observando los valores presentados en esta tabla, puede concluirse que, para valores bajos de la carga aplicada, inferiores a 124 kN, las tensiones obtenidas en ambas caras del alma para la misma posición (pares de galgas) son similares entre sí; las discrepancias encontradas son debidas, por una parte, a la existencia de una cierta excentricidad de la carga, en la dirección perpendicular al plano medio del alma, y, por otra, a la existencia de una deformada previa no despreciable (existencia de imperfecciones geométricas iniciales) y desde luego no simétrica respecto a ese plano medio (compárense, por ejemplo, las tensiones en las galgas 7 y 8). Por otra parte, puede apreciarse que los valores de las ten-

siones para aquellas galgas dispuestas simétricamente respecto al eje vertical de simetría del alma son ciertamente muy parecidos, lo que demuestra que la entrada de la carga según la dirección que contiene al alma se hace de forma centrada y que la deformada abollada del panel del alma durante el ensayo es aproximadamente simétrica respecto del eje vertical de simetría del alma.

A partir de niveles de carga superiores a los 124 kN es cuando se aprecia una clara discrepancia entre los valores de las tensiones existentes en la cara frontal del alma del pilar y su cara posterior (compárense entre sí, por ejemplo, las tensiones en las galgas 7 y 8, o las tensiones en las galgas 11 y 12). Es a partir de este instante cuando los desplazamientos fuera del plano medio del alma inducidos por la abolladura en dirección longitudinal (vertical) son especialmente significativos, desarrollándose los mecanismos resistentes de flexión. Realizando la media de las tensiones longitudinales existentes para una misma posición en ambas caras externas del alma, se obtienen las tensiones longitudinales medias contenidas en el plano medio del alma. Los valores de las tensiones medias recogidas en esta tabla 4 ponen de manifiesto que las tensiones longitudinales medias de membrana se concentran en la zona del alma próxima a la unión ala-alma, y ello ocurre de forma más acentuada a medida que se avanza en el proceso incremental de carga (ancho eficaz). Así, por ejemplo, para un valor de la carga de 241.2 kN, próximo al valor de la carga de agotamiento del pilar

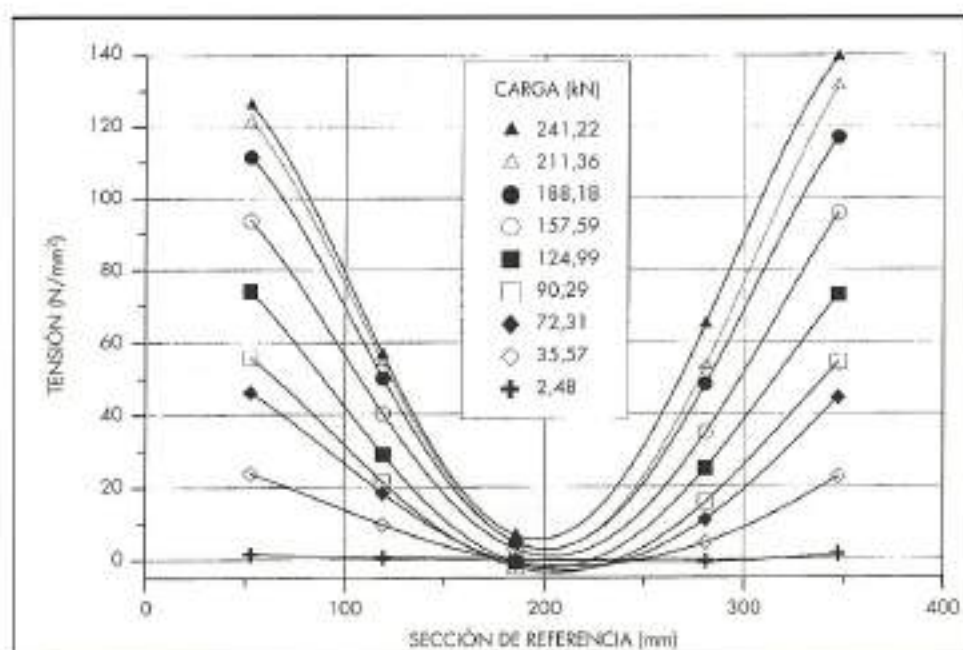
TENSIONES σ CARA FRONTAL (N/mm ²)					
CARGA (kN)	G-7	G-9	G-11	G-13	G-15
2.482	1.204	-0.471	-1.374	-2.723	1.429
35.566	20.837	-3.789	-17.076	-13.927	21.758
72.306	42.581	8.265	-11.061	-8.405	44.158
90.286	55.185	26.192	7.952	11.098	56.988
124.99	96.641	115.375	109.776	103.886	99.794
157.587	145.587	229.859	236.854	223.326	153.922
188.185	174.743	300.564	314.934	308.224	187.808
211.365	178.438	323.492	346.698	337.009	196.910
241.223	133.226	269.411	308.356	300.949	152.149
TENSIONES σ CARA POSTERIOR (N/mm ²)					
CARGA (kN)	G-8	G-10	G-12	G-14	G-16
2.482	1.898	1.907	1.554	1.682	1.447
35.566	26.723	23.283	16.085	23.283	23.795
72.306	49.754	28.605	8.921	30.632	45.023
90.286	56.624	16.660	-11.782	20.490	51.668
124.99	51.747	-57.330	-111.128	-53.725	46.566
157.587	42.001	-149.276	230.816	-153.556	37.721
188.185	48.238	-200.183	-305.067	-211.446	46.211
211.365	64.725	214.374	-337.169	-229.918	65.851
241.223	119.098	-156.026	-294.592	-170.894	126.757
TENSIONES MEDIAS σ EN EL PLANO MEDIO (N/mm ²)					
CARGA (kN)	G-7, 8	G-9, 10	G-11, 12	G-13, 14	G-15, 16
2.482	1.551	0.718	0.090	-0.521	1.438
35.566	23.790	9.747	-0.496	4.678	22.777
72.306	46.168	18.435	-1.070	11.114	44.591
90.286	55.905	21.426	-1.915	15.794	54.328
124.99	74.194	29.023	-0.676	25.080	73.180
157.587	93.794	40.291	3.019	34.885	95.821
188.185	111.490	50.191	4.934	48.389	117.010
211.365	121.581	54.559	4.765	53.545	131.381
241.223	126.162	56.692	6.882	65.027	139.453

TABLA 4. Tensiones longitudinales (verticales) en las galgas de la sección transversal analizada del alma del pilar 4: tensiones en cara frontal, en cara posterior y tensiones medias en el plano medio (tensiones de membrana en el alma).

ensayado, la tensión media de membrana en la posición correspondiente al par de galgas 11-12 es de 6.8 N/mm², mientras que para el par de galgas 15-16 la tensión longitudinal media es de 139.4 N/mm². Cabe señalar que esta sección no se ve sometida a tensiones que plastifiquen el acero estructural durante el ensayo; previamente, se alcanza la plastificación en las líneas o bandas que definen el mecanismo local de colapso de los pilares, las cuales se localizan en la zona superior de los mismos, muy próxima a la zona de introducción de la carga.

En la figura 13 se representan gráficamente las distribuciones de tensiones medias longitudinales obtenidas experimentalmente en la sección transversal del alma del pilar 4, contemplada en el análisis. El perfil y magnitud de dichas distribuciones tensionales dependen del nivel de carga aplicada; no obstante, para valores de la carga no excesivamente elevados, ya se tiene una respuesta tensional tal que las tensiones longitudinales se concentran hacia las zonas rígidas, es decir, hacia la zona de unión del alma con las alas del pilar, evidenciándose, de forma más clara, si cabe, el fenómeno del ancho eficaz.

FIGURA 13. Distribuciones de tensiones longitudinales (verticales) en una sección transversal del alma para diferentes valores de la carga aplicada [pilar 4].



5. CONCLUSIONES

En este artículo se han presentado los resultados obtenidos en una campaña experimental relativa al estudio de inestabilidad local y agotamiento en pilares armados metálicos sometidos a compresión. Dichos pilares atienden a una geometría común exceptuando el ancho de las alas, el cual varía de forma progresiva para los cinco pilares ensayados.

Con el objetivo de poder contrastar, en un futuro, los resultados experimentales con los derivados de modelos numéricos de análisis avanzado, es necesario determinar de forma precisa las condiciones iniciales de las que se parte en el instante de comenzar los ensayos. A tal fin se hace obligado conocer la geometría inicial de los pilares ensayados. Para ello, se ideó un dispositivo que permitía conocer las imperfecciones geométricas iniciales de la chapa de alma de los pilares.

A partir de los resultados obtenidos en los ensayos experimentales se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- La respuesta estructural de los pilares ensayados a compresión viene determinada por el desarrollo del fenómeno de la abolladura del alma. No se desencadena ningún fenómeno de inestabilidad global y ello ocurre así para los cinco pilares ensayados. En cuanto empieza a entrar la carga de compresión, se amplifica la deformación del alma del pilar formándose ondas que se corresponden con su deformada abollada. A medida que se avanza en el proceso incremental de carga a lo largo del ensayo, las ondas sufren un recorrido ascendente hacia la zona de introducción de la carga. Posteriormente, la deformada abollada se concentra en la zona superior del pilar, dando lugar a un mecanismo local de colapso cuyas líneas o bandas de plastificación son muy similares a las que se presentan en los mecanismos de rotura de "patch loading".
- A medida que aumenta el ancho de las alas de los pilares ensayados experimentalmente, la carga para la cual se desarrolla el mecanismo de colapso es ligeramente superior, lo que demuestra el mayor grado de empotramiento del alma del pilar en las alas a medida que se aumenta el ancho de las mismas. No obstante, en base a los resultados, puede concluirse que el ancho de alas no es un factor ciertamente relevante a la hora de cuantificar la carga de

colapso de estos pilares armados. Parece evidente que el mecanismo de rotura y la carga de colapso vienen controlados por otros parámetros de los pilares, ya sea relativos al tipo de acero o a la propia geometría ensayada.

- Los desplazamientos registrados por los transductores dispuestos en los pilares ensayados muestran de forma muy reveladora la evolución de la deformada del panel del alma en función del nivel de carga introducida, permitiendo un control y seguimiento preciso de la deformada del pilar desde la fase lineal elástica, pasando por la fase de deformación controlada por el fenómeno de abolladura, hasta la fase de agotamiento definida por una deformada que es respuesta de la existencia de bandas de plastificación del material acero. La existencia de tales bandas es fácilmente observable si se procede a la descarga del pilar, puesto que se detecta una deformación remanente en los mismos, tanto más significativa cuanto más próximos nos situemos a la zona de introducción de la carga, ya que es allí donde se produce la plastificación.
- Del análisis de las gráficas obtenidas para cada una de las galgas dispuestas sobre los pilares se desprende que, al principio del ensayo, cuando aún no se ha desencadenado el fenómeno de la abolladura, la carga entra de forma uniformemente repartida sobre la sección transversal. A medida que se avanza en el proceso de aplicación de carga creciente, las galgas extensométricas ofrecen toda la información necesaria para poder determinar con un cierto rigor y de forma más o menos precisa cómo evoluciona la distribución de tensiones en las superficies externas de los paneles de alas y alma de los pilares ensayados con el nivel de carga. Así, puede observarse que, habiendo ya abollado el panel de alma, las tensiones longitudinales de compresión que discurren por la misma se concentran en las zonas de unión ala-alma, visualizándose de forma muy clara el fenómeno de ancho eficaz. Este efecto es más significativo cuanto mayor sea la deformada abollada del panel, es decir cuanto mayor sea el valor de la carga introducida. Por otra parte, la distribución de tensiones longitudinales obtenida experimentalmente en la zona inferior del alma del pilar es bastante uniforme puesto que

en esa zona del pilar el fenómeno de abolladura no es en absoluto relevante.

Todos los resultados obtenidos en esta campaña experimental servirán para contrastar diferentes modelos numéricos que contemplan los fenómenos de no linealidad geométrica y del material que tiene lugar en este tipo de estructuras de chapa de acero. En cualquier caso, si lo que se persigue es realizar un seguimiento del comportamiento tenso-deformacional de estos pilares metálicos armados a lo largo de todo el proceso incremental de carga hasta la aparición de un posible mecanismo de colapso, es necesario conocer con suficiente precisión la deformada inicial de estas estructuras, máxime cuando los procesos de fabricación pueden incidir notablemente en las imperfecciones geométricas iniciales y en la distribución inicial de tensiones residuales, y éstas, a su vez, en la respuesta en servicio de la estructura (Costa et al, 1996). Asimismo, debe prestarse especial atención a la modelización numérica de las condiciones de vinculación existentes en los ensayos experimentales; para ello, es de gran interés el llevar a cabo una amplia instrumentación que nos permita conocer cómo está trabajando la estructura ensayada.

AGRADECIMIENTOS

El artículo presentado es parte de los trabajos realizados en el desarrollo del Proyecto de Investigación PB90-0604, subvencionado por la Dirección General de Investigación Científica y Técnica del Ministerio de Educación y Ciencia. Estos trabajos también se consideran parte de la investigación que se está desarrollando en el Proyecto de Investigación PB95-0772,

subvencionado por la Dirección General de Enseñanza Superior del Ministerio de Educación y Cultura. Asimismo, el primer autor de este artículo disfruta de una beca de Formación de Personal Investigador para la realización de su tesis doctoral, concedida por el Ministerio de Educación y Cultura.

REFERENCIAS

- MIRAMBELL, E.; ROCA, P. (1993). "Estudio numérico de abolladura de chapas de acero considerando su resistencia postéctica". *Revista Sercometal. Construcciones Metálicas y Calderería*. Año 7, No. 29., págs. 5-21.
- REAL, E. (1995). "Abolladura en almas esbeltas de pilares metálicos armados sometidos a compresión. Estudio de efectos locales". Tesis de especialidad. Ed. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona. UPC. Septiembre.
- ROCA, P.; MIRAMBELL, E.; COSTA, J. (1996). "Geometric and Material Nonlinearities in Steel Plates". *Journal of Structural Engineering ASCE*. Vol. 122, No. 12, págs. 1427-1436.
- COSTA, J.; MIRAMBELL, E.; ROBERTS, T. M. (1996). "Numerical Studies of Fatigue Induced by Breathing of Slender Web Plates". *Engineering Systems Design and Analysis*. ASME. Vol. 1, págs. 79-86. Montpellier.
- ROBERTS, T. M.; NEWARK, A. C. B. (1997). "Strength of Webs Subjected to Compressive Edge Loading". *Journal of Structural Engineering ASCE*. Vol. 123, No. 2, págs. 176-183.
- LAGERQVIST, O. (1994). "Patch Loading: Resistance of Steel Girders Subjected to Concentrated Forces". Doctoral Thesis. Lulea University of Technology. Division of Steel Structures. December.



GEOTEYCO, S.A.

- **ASISTENCIA TÉCNICA**
- **ESTUDIOS GEOTÉCNICOS**
- **CONTROL DE CALIDAD**

ENSAYOS DE CAMPO

- Sondeos Geotécnicos
- Ensayos con Piezocono
- Vano test
- Ensayo con Presiómetro
- Permeabilidad "in situ"
- Determinaciones inclinométricas

ENSAYOS DE LABORATORIO

- Hormigones
- Cementos y Aditivos
- Aceros
- Materiales bituminosos



1995: Urbanización Interior del Plan Parcial II-5 del Ensanche Este - Pavones



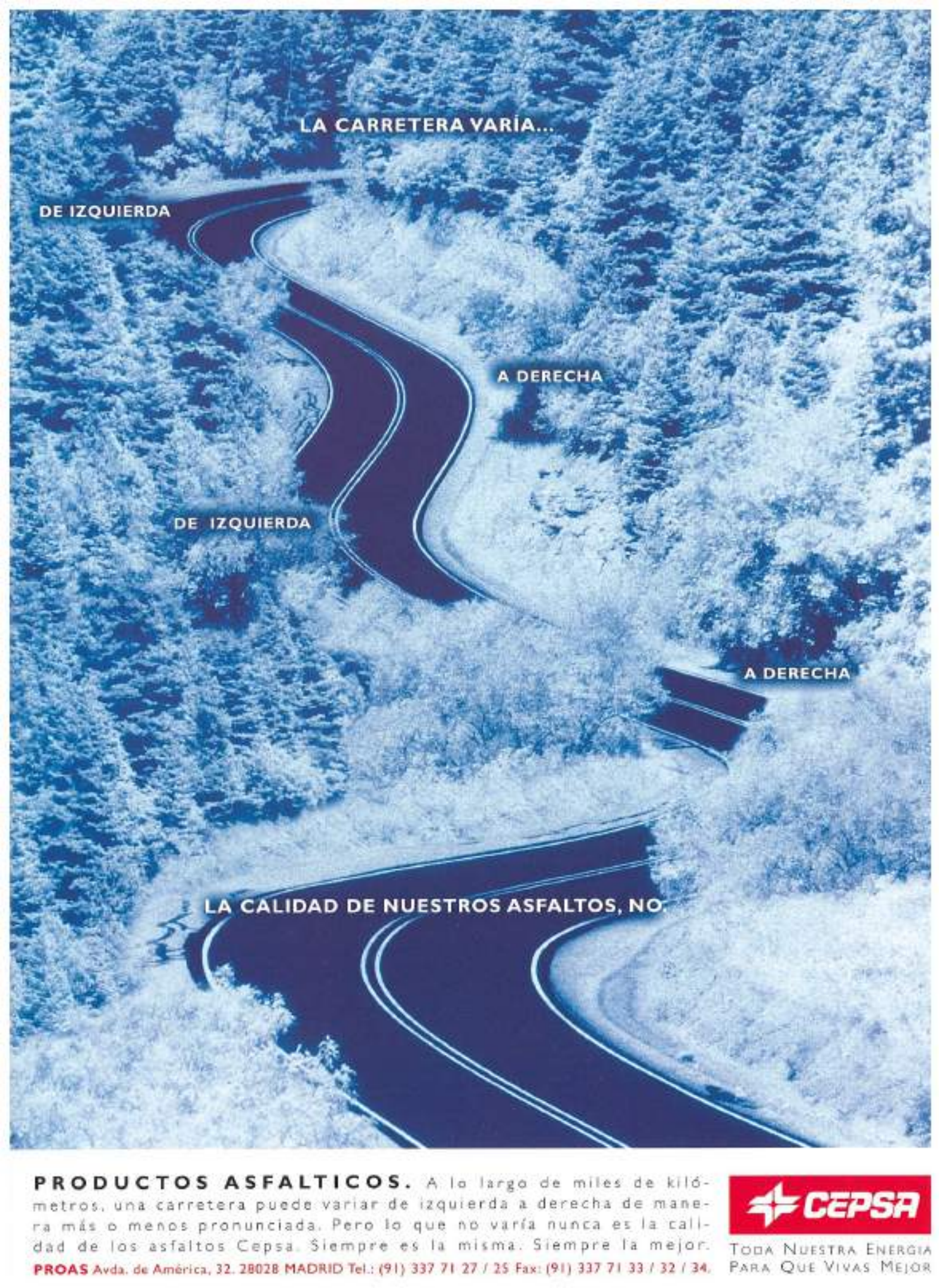
Oficina Central:

Pº de La Habana, 81
28036 Madrid
Tel.: (91) 457 06 28
Fax: (91) 457 43 33
e-mail: geotec@CTV.es

Laboratorio Central:

Pol. Ind. Valdonaire
28960 Humanes (Madrid)
Tel.: (91) 690 11 80
Fax: (91) 690 24 62

Delegaciones Nacionales: Córdoba, Galicia, Vitoria.
Delegaciones Internacionales: Bélgica, Irlanda, Portugal, Grecia.



LA CARRETERA VARÍA...

DE IZQUIERDA

A DERECHA

DE IZQUIERDA

A DERECHA

LA CALIDAD DE NUESTROS ASFALTOS, NO

PRODUCTOS ASFALTICOS. A lo largo de miles de kilómetros, una carretera puede variar de izquierda a derecha de manera más o menos pronunciada. Pero lo que no varía nunca es la calidad de los asfaltos Cepsa. Siempre es la misma. Siempre la mejor.

PROAS Avda. de América, 32. 28028 MADRID Tel.: (91) 337 71 27 / 25 Fax: (91) 337 71 33 / 32 / 34.



TODA NUESTRA ENERGÍA
PARA QUE VIVAS MEJOR