

Capítulo 6

CAMPAÑA EXPERIMENTAL DE VIGAS ARMADAS DE ACERO INOXIDABLE A FLEXIÓN. AGOTAMIENTO POR CORTANTE

6.1.- INTRODUCCIÓN.

En construcción metálica es común abordar el diseño de vigas de luces importantes sobre las que actúan cargas elevadas. Es en estos casos, en los que las secciones transversales de las vigas se encuentran sometidas a grandes esfuerzos, cuando se debe recurrir al empleo de vigas armadas puesto que no se encuentran en el mercado perfiles comerciales capaces de resistir dichos esfuerzos. Tendencia más acusada, si cabe, en la industria del acero inoxidable, ya que la disponibilidad de perfiles comerciales es menor que en acero al carbono.

Al contrario que en las vigas laminadas, el alma de las vigas armadas suele ser muy esbelta, y por tanto susceptible de verse afectada por fenómenos de inestabilidad, incluso para valores reducidos del cortante.

Hasta finales de los años sesenta, las vigas de acero al carbono compuestas por paneles rectangulares se diseñaban con la teoría lineal de abolladura. Sin embargo, ensayos experimentales demostraban que la capacidad última del elemento era mucho mayor, lo cual impulsó el desarrollo de modelos prácticos que permitieran conocer la capacidad real del alma. Cuando el panel de alma de una viga abolla, el elemento sigue teniendo capacidad resistente, denominada resistencia postcrítica, gracias a la formación de un nuevo mecanismo resistente, el campo diagonal de tracciones.

Sin embargo, si bien este tema ha sido ampliamente estudiado en el campo del acero al carbono no ocurre lo mismo en el caso del acero inoxidable. El tratamiento dado por la mayoría de normas y en concreto por Eurocódigo 3, Parte 1-4 (1996) consiste en adaptar el método postcrítico simple, sin estudiar la formación del campo diagonal de tracciones ni el mecanismo de colapso de las vigas armadas de acero inoxidable.

El objeto de este capítulo, de carácter fundamentalmente experimental, es contribuir al estudio del comportamiento en servicio y evolución hasta el agotamiento de estructuras formadas por

chapas de acero inoxidable integradas en vigas. En concreto, se profundizará en el comportamiento de vigas armadas sometidas esencialmente a sollicitaciones de cortante hasta llegar a desencadenar, en algunos casos, fenómenos de abolladura, de manera que ello permita desarrollar un método de dimensionamiento basado en el método del campo diagonal de tracciones para acero inoxidable y que sea más ajustado que el método postcrítico simple propuesto por la normativa actual.

En este capítulo se presenta una campaña experimental realizada en el Laboratorio de Tecnología de Estructuras de la ETS de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona, con el objetivo principal de estudiar el comportamiento de vigas armadas de acero inoxidable sometidas a cortante.

Se describen los ensayos realizados sobre doce vigas armadas, con diferentes esbelteces y relaciones de aspecto, y se presentan los resultados de mayor interés derivados de la campaña experimental. En el capítulo siguiente se realizará un análisis detallado de los resultados que permitirá extraer conclusiones de relevancia de cara a poder evaluar el comportamiento de estas vigas armadas de acero inoxidable frente a esfuerzos cortantes.

6.2.- PLANTEAMIENTO DE LA CAMPAÑA EXPERIMENTAL.

6.2.1.- Descripción del fenómeno.

Antes de empezar una campaña experimental es preciso realizar un estudio preliminar del problema que se desea investigar para comprender su comportamiento y poder delimitar los parámetros que gobiernan el fenómeno que nos disponemos a evaluar. Es necesario determinar la geometría y las dimensiones de los prototipos a ensayar y conocer de forma aproximada los resultados que se obtendrán de los ensayos (cargas máximas, reacciones, deformaciones máximas o estados tensionales singulares) para poder diseñar el esquema de instrumentación más adecuado en cada prototipo.

Este estudio preliminar se lleva a cabo mediante la utilización de un modelo numérico que considere todas las variables que intervienen en el problema. El modelo utilizado es el código Abaqus, basado en el método de los elementos finitos, tal y como se ha explicado en el capítulo 3.

Una vez presentadas las bases de la teoría necesaria para la comprensión del fenómeno de la abolladura por cortante (Capítulo 2) y las bases del modelo numérico utilizado, a continuación se realiza una descripción cualitativa de la evolución de las tensiones durante el proceso de carga al que van a estar sometidas las vigas durante los ensayos. En principio es de esperar un comportamiento de la pieza de acero inoxidable similar al de la misma pieza de acero al carbono, si bien, al tener aquél una curva tensión-deformación no lineal, los resultados serán diferentes.

En la Figura 6-1 puede observarse la modelización de la geometría de las vigas, la malla de elementos finitos utilizada y las condiciones de contorno previstas para el ensayo.

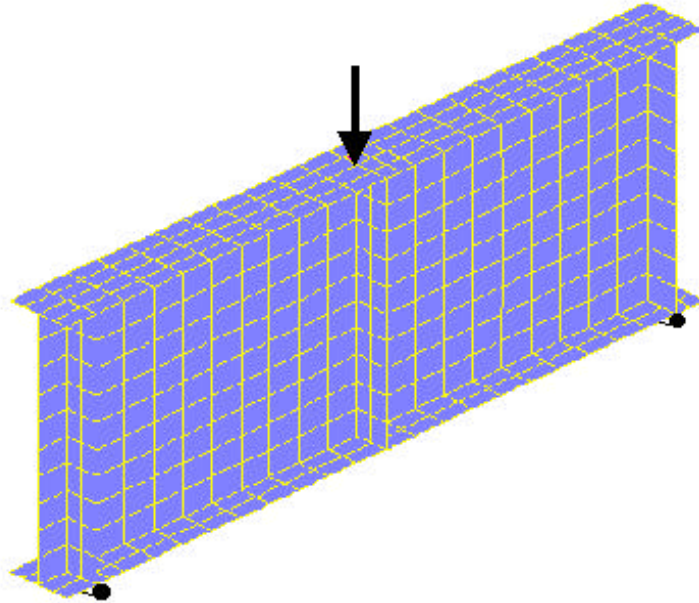


Figura 6-1. Malla de elementos finitos y condiciones de contorno.

Para niveles bajos de carga, el alma de la viga está sometida a un estado de corte puro. En este momento, las tensiones principales de tracción y compresión (σ_1 y σ_2), son iguales, de signo contrario y del mismo valor que la tensión tangencial. En la Figura 6-2, se presenta, cualitativamente y a modo de ejemplo, la distribución de tensiones de comparación en el alma de una viga para niveles de carga. En dicha figura se observa que la distribución de tensiones es prácticamente uniforme en toda el alma.

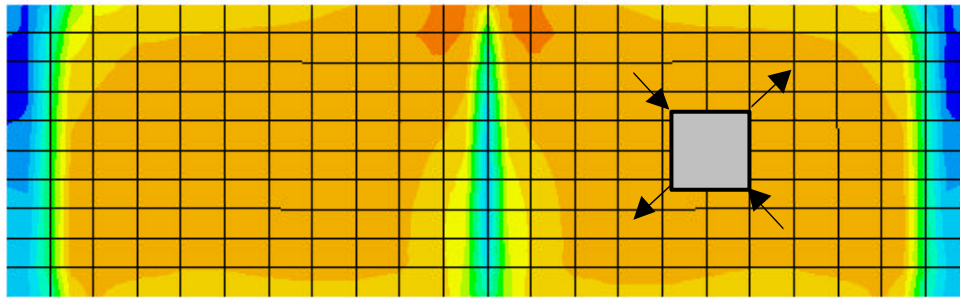


Figura 6-2. Tensión de comparación durante el estado de corte puro.

A medida que aumenta la carga aplicada sobre la viga, las tensiones principales σ_1 y σ_2 crecen hasta que, favorecida por la introducción de la imperfección geométrica inicial, la tensión principal de compresión produce una desestabilización del alma haciendo que ésta deforme abollándose, es decir experimentando corrimientos perpendiculares al plano medio del alma. En este momento decimos que se ha producido la abolladura y el valor de la tensión tangencial ($\sigma_1 = -\sigma_2 = \tau_{cri}$) toma el nombre de tensión crítica de abolladura.

Al ser el límite de proporcionalidad del acero inoxidable muy bajo, el comportamiento no lineal del material influye decisivamente sobre la respuesta de la pieza, influencia que se hace

más relevante a medida que disminuye la esbeltez del alma, por lo que ya no se puede hablar de una tensión de abolladura ideal. A medida que disminuye la esbeltez, la tensión de abolladura real disminuye respecto a la tensión crítica ideal proporcionada por la teoría clásica de abolladura para acero al carbono.

Una vez producida la abolladura del alma y continuando con la aplicación de carga en la viga, se observa el desarrollo de un nuevo mecanismo resistente: el campo diagonal de tracciones ("tension field"). La carga es resistida por un incremento de la componente de tracción, mientras que la tensión de compresión apenas sufre variaciones. En la Figura 6-3, se presenta la distribución de las tensiones principales de tracción en el alma de la viga después de abollar.

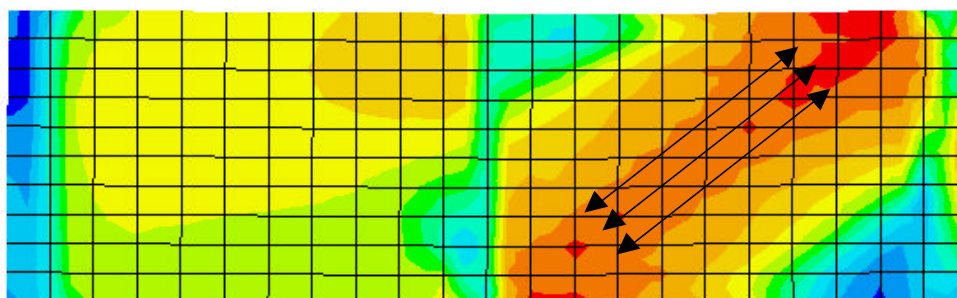


Figura 6-3. Formación del campo diagonal de tracciones.

Mediante este mecanismo resistente, la viga es capaz de seguir absorbiendo carga aumentando los niveles de tensión de la banda diagonal de tracción hasta producirse la plastificación de ésta.

Una vez iniciada la plastificación, ésta se irá extendiendo por el alma incrementándose el ancho de la banda diagonal, de forma que la viga podrá seguir soportando un incremento de carga. Este comportamiento tendrá lugar mientras la geometría de la pieza permita el aumento de magnitud en la banda o mientras los elementos de anclaje de las tensiones diagonales, es decir las alas y los rigidizadores, lo permitan.

De este modo, en el momento de la rotura de la pieza, la banda diagonal se ha extendido por el alma y se han formado rótulas plásticas en las alas, impidiendo el anclaje del campo diagonal de tracciones y provocando el colapso de la viga (Figura 6-4). El mecanismo de colapso que se produce, según la modelización de la viga, es análogo al propuesto en el modelo del campo diagonal de tensiones de Cardiff basado en los estudios desarrollados por Rockey y sus colaboradores en la Universidad de Cardiff para vigas de acero al carbono.

Los resultados del modelo numérico permiten concluir que, a diferencia de las vigas de acero al carbono, en almas de acero inoxidable, con una ecuación constitutiva monótona creciente, se producen dos fenómenos simultáneos en la banda diagonal de tracciones: un aumento del ancho de banda y un incremento ininterrumpido del valor de las tensiones en la zona plastificada.

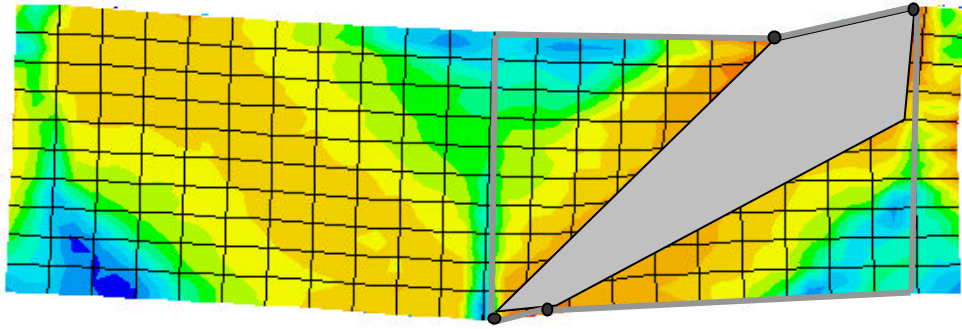


Figura 6-4. Mecanismo de colapso.

6.2.2.- Geometría de las vigas.

La geometría elegida para las vigas está directamente relacionada con el objetivo de la campaña experimental destinada a estudiar el comportamiento de almas de vigas de acero inoxidable bajo solicitaciones de cortante, con lo que las vigas deben ser de luz reducida y canto grande, de manera que se minimicen los efectos de la flexión para conseguir que sean los fenómenos relacionados con el esfuerzo cortante los que gobiernen el problema.

Otros factores determinantes en la elección de la geometría son el tipo de acero a ensayar y las dimensiones y capacidades de los elementos del laboratorio. El acero elegido fue, según recomendaciones de la empresa suministradora, un acero S220 (AISI 304).

Para establecer la geometría de las vigas se procuró adaptarse a los espesores de chapa disponibles en el mercado y conseguir una máxima homogeneidad dimensional, procurando cubrir un amplio campo de relaciones de aspecto a/d y esbelteces mecánicas ($\bar{\lambda}_w$).

El predimensionamiento de las vigas y el cálculo de las cargas últimas a cortante se realizó según el método postcrítico simple propuesto en Eurocódigo 3, Parte 1-4 (1996) y según una adaptación para el acero inoxidable del método del campo diagonal de tracciones expuesto en Eurocódigo 3, Parte 1-1 (1993). Esta adaptación sigue la formulación para acero al carbono considerando el límite elástico y la tensión crítica inicial de abolladura del acero inoxidable.

Las relaciones a/d escogidas fueron 0.5, 1.0, 1.5 y 2.0. Las esbelteces mecánicas adoptadas en un principio estaban comprendidas entre 0.2 y 1.0 según recomendaciones de Eurocódigo 3, Parte 1-4 (1996). Tras el estudio preliminar con el modelo numérico se constató que para vigas con esbelteces mecánicas menores de 0.6 el alma plastifica antes de abollar. Una vez analizados los resultados, y considerando que Eurocódigo 3, Parte 1-4 parecía demasiado conservador, se decidió aumentar la esbeltez de las almas de las vigas a ensayar adoptando valores de $\bar{\lambda}_w$ entre 0.6 y 1.2.

La carga para la que se produce el fenómeno de abolladura y la resistencia final de la viga dependen de varios factores, entre ellos las dimensiones de las placas y sus espesores y las propias características mecánicas del acero inoxidable. Con el fin de realizar una campaña experimental que contemplara la casuística que puede presentarse en estructuras de acero inoxidable, y tras un estudio de los resultados obtenidos del predimensionamiento y del modelo numérico, se escogieron las dimensiones de chapas que se presentan a continuación:

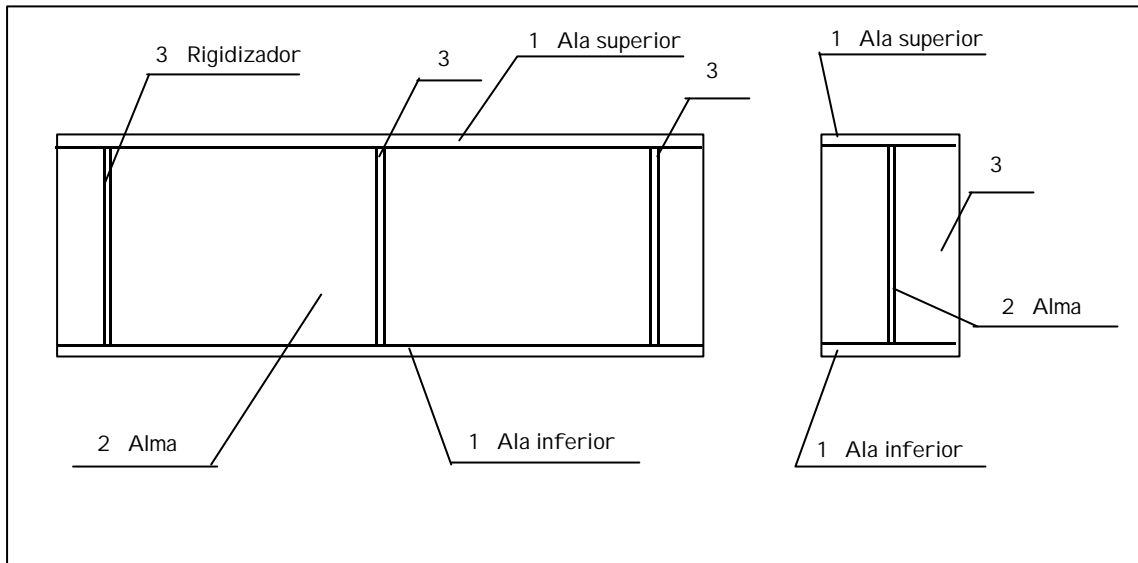


Figura 6-5. Geometría de las vigas.

Cabe comentar que, previamente a la realización de los ensayos de cada una de las vigas, se tomaron medidas de las dimensiones más características, obteniendo diferencias máximas respecto de los valores nominales del orden del 3% en longitudes y anchos, y del 5% en espesores.

Tabla 6-1. Geometría vigas.

VIGA	Dimensiones (mm)			Peso (Kg)
	Alas	Alma	Rigidizadores	
ad2w4	2200.200.20	2200.500.4	500.95.20	217.445
ad2w6	2200.200.20	2200.500.6	500.95.20	234.715
ad2w8	2200.200.20	2200.500.8	500.95.20	251.985
ad15w4	1700.200.20	1700.500.4	500.95.20	178.195
ad15w6	1700.200.20	1700.500.6	500.95.20	191.540
ad15w8	1700.200.20	1700.500.8	500.95.20	204.885
ad1w4	1200.200.20	1200.500.4	500.95.20	138.945
ad1w6	1200.200.20	1200.500.6	500.95.20	148.365
ad1w8	1200.200.20	1200.500.8	500.95.20	157.785
ad05w4	1200.200.20	1200.1000.4	1000.95.20	202.530
ad05w6	1200.200.20	1200.1000.6	1000.95.20	221.370
ad05w8	1200.200.30	1200.1000.8	1000.95.30	322.635

6.2.3.- Caracterización del material.

Para poder estudiar el comportamiento de las vigas frente a las solicitaciones de cortante mediante el análisis y comparación de los resultados del modelo con los resultados experimentales, es básico conocer con detalle las características del material con el que se va a trabajar. Por este motivo se realizaron ensayos de caracterización de cada una de las chapas

que componen las vigas armadas en el Laboratorio Metalúrgico de Acerinox, obteniéndose los resultados que se presentan a continuación.

Se mecanizaron probetas de las chapas de 4, 6, 8 y 20 mm según la norma ASTM-A370 (1990). Todas las chapas eran de acero inoxidable de la categoría AISI 304 y los ensayos se realizaron siguiendo las instrucciones de la norma ASTM – A 370 (1990) para el ensayo de tracción, ASTM – E 111 (1990) para el módulo de Young y ASTM – E 132 (1990) para el coeficiente de Poisson. En la Tabla 6-2 se resumen los resultados de los ensayos donde se presentan los valores de las características más relevantes del material.

Tabla 6-2. Resultados de los ensayos de caracterización del material.

Chapa	So (mm ²)	E (kN/mm ²)	s _{0.2} (N/mm ²)	s ₁ (N/mm ²)	s _m (N/mm ²)	Ag (%)	A (%)
4	48.42	197.24	301.44	359.58	630.32	41.4	51.0
6	77.64	177.10	323.38	375.76	637.61	43.61	48.07
8	105.8	190.94	323.29	370.37	604.33	44.36	50.91
20	829.31	187.34	266.75	316.11	602.16	47.1	55.8

donde So es el área de la sección transversal de la probeta, E el módulo de deformación longitudinal inicial, $\sigma_{0.2}$ la tensión correspondiente a una deformación remanente del 0.2%, σ_1 la tensión correspondiente a una deformación remanente del 1%, σ_m la tensión máxima, calculada con el área inicial, Ag el alargamiento uniforme antes de la estricción y A el alargamiento en rotura.

Puede observarse que algunos valores de características del material obtenidos en estos ensayos se alejan de los valores que se adoptan en la normativa y que fueron los empleados en el dimensionamiento de las vigas de la campaña. Este hecho ha influido en la ejecución de la campaña ya que ésta se programó en función de los valores establecidos en la normativa y propuestos por la empresa suministradora. En cualquier caso, para el análisis comparativo de resultados se modelizaron de nuevo las vigas en el código Abaqus con los datos reales del material.

Las curvas tensión-deformación obtenidas de los ensayos de cada una de las probetas se ajustaron mediante la curva teórica de Ramberg-Osgood hasta una tensión de 400 MPa, valor hasta el cual tiene sentido el estudio tenso-deformacional del material para aplicaciones estructurales. Los valores de las constantes obtenidas de la aproximación y las curvas σ - ϵ correspondientes se presentan respectivamente en la Tabla 6-3 en las Figuras 6-6, 6-7, 6-8 y 6-9.

Tabla 6-3. Valores del ensayo para la representación de la ecuación de Ramberg-Osgood.

Chapa	E ₀ (MPa)	s _{0.2} (MPa)	n
4	197240	301.44	9
6	177100	323.38	9
8	190940	323.29	9
20	187340	266.75	9

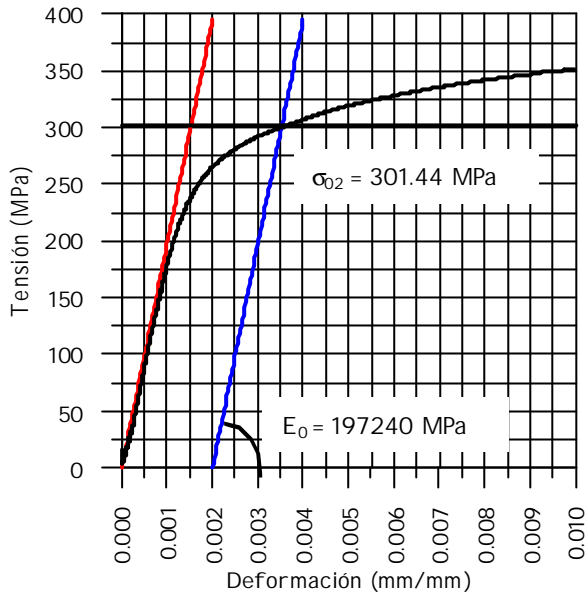


Figura 6-6. Curva **s-e** chapa 4 mm.

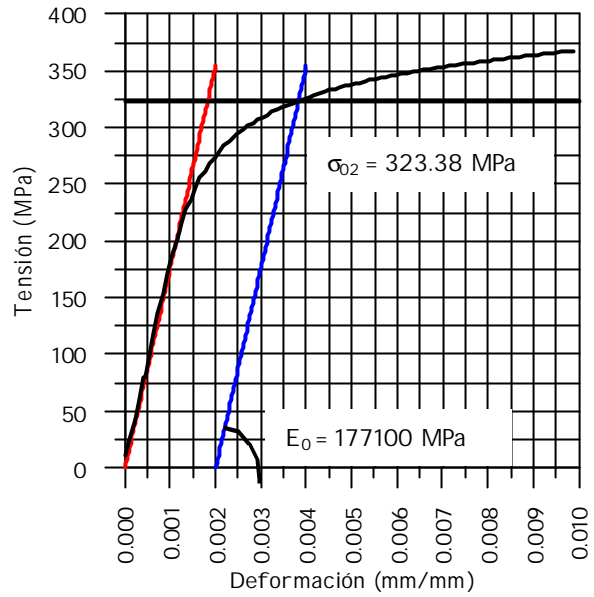


Figura 6-7. Curva **s-e** chapa 6 mm.

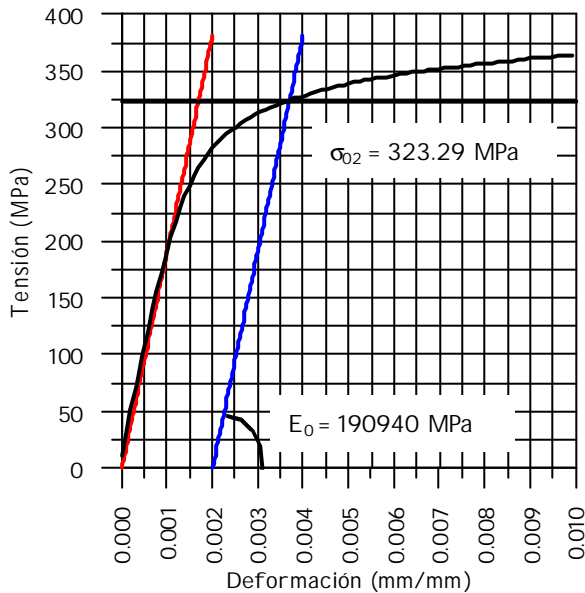


Figura 6-8. Curva **s-e** chapa 8 mm.

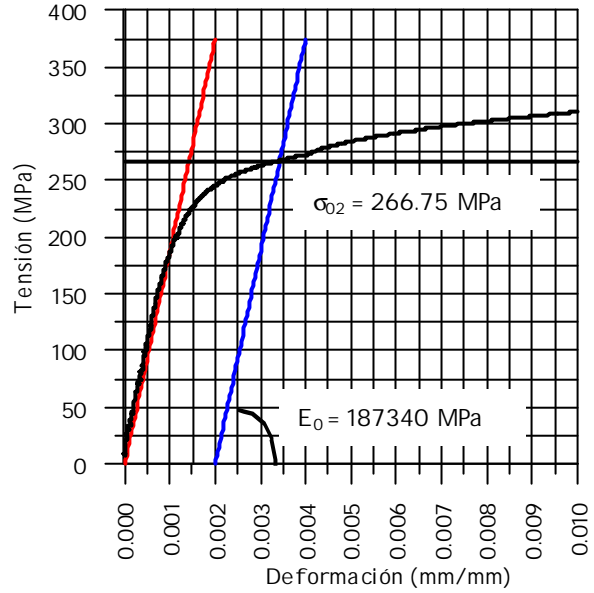


Figura 6-9. Curva **s-e** chapa 20 mm.

6.3.- INSTRUMENTACIÓN, EQUIPOS Y MATERIAL.

6.3.1.- Instrumentación de las vigas.

La instrumentación de las vigas en esta campaña experimental se basa en una serie de galgas extensométricas unidireccionales y rosetas y una serie de transductores de desplazamiento que permiten conocer, respectivamente, las deformaciones y los desplazamientos en diferentes puntos de la viga.

La elección del número de galgas y de su disposición en cada uno de los ensayos deriva directamente del análisis preliminar del estado tensional de cada viga, resultado del modelo

numérico tal y como se ha comentado en el apartado anterior. Con el fin de poder comparar de manera adecuada los resultados numéricos y experimentales, la posición de las galgas y los transductores de desplazamiento se hace coincidir con los nodos de la malla de elementos finitos utilizada para la modelización.

Galgas extensométricas

Durante la realización de los ensayos se presentarán diferentes situaciones en cuanto a las deformaciones a medir. Para situaciones en las que se conozca la dirección de las tensiones principales y sólo interese la deformación en una de estas direcciones, se utilizarán galgas unidireccionales. En los casos en los que la distribución de tensiones sea compleja y se pretenda conocer el estado tensional del punto se dispondrán rosetas triaxiales.

En la Tabla 6-4 se presentan las características de las galgas extensométricas utilizadas en los ensayos.

Tabla 6-4. Principales características de las galgas elegidas.

Tipo	Resistencia W	Factor de galga	Sensibilidad transversal	Deformación límite
YFLA-5 unidireccional	120±0.3	2.12±2 %	0.2 %	±20,0 %
YFRA-5 roseta	120±0.5	2.10±2 %	0.1 %	±20,0 %

El tipo de adhesivo escogido fue, según recomendaciones del fabricante de las galgas, un cianocrilato (CN).

Transductores de desplazamiento

En estos ensayos se utilizan dos tipos de transductores. Por un lado, para medir los desplazamientos en el plano perpendicular al alma, se han dispuesto a lo largo de la línea media del panel tres lvdts. Se designa con estas siglas (Linear Variable Differential Transformer) al transductor de desplazamiento cuyo funcionamiento se basa en una transformación diferencial de la variación lineal de la inductancia entre un devanado primario y dos secundarios puestos en oposición. El desplazamiento máximo que pueden medir los transductores elegidos es 15 mm.

Por otro lado se dispuso un transductor del tipo ldt (Linear Displacement Transducer) en la sección centro luz de la viga, el cual permite medir flechas máximas. Un transductor de esta clase basa su funcionamiento en medidas magnostrictivas. El rango de medida del transductor utilizado en este caso era de 0 a 100 mm de desplazamiento.

Disposición de la instrumentación

La disposición de la instrumentación es distinta para cada una de las vigas y se presenta de forma detallada en el Anejo 2 de resultados obtenidos en la campaña experimental de agotamiento por cortante. Pero, en líneas generales, todos los modos de localización de la instrumentación responden a las siguientes premisas:

- Con el fin de evaluar el nivel de tensiones durante el estado de corte puro y su evolución en magnitud y dirección en el período de formación del campo diagonal de tracciones, se coloca una roseta en el centro del panel. Ésta se dispone juntamente con otras galgas unidireccionales, situadas a ambos lados de la roseta y orientadas en función del estado tensional que se prevé que alcance durante el ensayo en función de los resultados obtenidos del análisis del modelo numérico.

De este modo, las bandas unidireccionales se orientan a 45° en los casos en que no se alcance la abolladura del panel, (Figura 6-10a) y en la dirección de la diagonal de tracciones propuesta por el modelo en caso de preverse la desestabilización del alma. Estas galgas pretenden recoger el ancho y la magnitud del campo diagonal de tracciones (Figura 6-10b).

- Para evaluar las tensiones en la zona próxima al rigidizador y al ala dónde va a anclarse el campo diagonal, se disponen cuatro rosetas en la esquina superior derecha del panel tal y como se muestra en la Figura 6-10b. Éstas confirmarán la dirección de las tracciones al mismo tiempo que darán el valor exacto de las deformaciones en estos puntos.



a) Evaluación del estado de corte puro

b) Evaluación del campo diagonal de tracciones

Figura 6-10. Modos de instrumentación de las vigas según el estadio de tensión que se pretenda evaluar.

- En el ala superior se sitúa una galga unidireccional para determinar el estado tensional que se daría en caso de formación del mecanismo de marco, que llevaría al colapso de la viga.
- En las vigas que tienen una relación $a/d = 0.5$ el comportamiento de las tensiones difiere cualitativamente del resto de las vigas. Por esta razón se han dispuesto dos rosetas, una en la esquina superior izquierda del panel para recoger la entrada de carga, y otra en la esquina inferior derecha para evaluar la "entrada de la reacción".

Las galgas se disponen de forma simétrica a ambos lados del panel para poder evaluar las tensiones de membrana y de flexión que se producen en la lámina. Analizando la evolución de tensiones en una pareja de galgas situadas en el mismo punto pero en lados opuestos del alma se puede conocer en cada momento la componente de membrana y de flexión desarrollada en el punto de estudio.

- Se disponen tres transductores en la línea media del panel instrumentado para poder determinar el recorrido de las ondas de abolladura que se formarán durante el proceso de carga. La ubicación relativa de estos tres transductores es siempre la misma para todas las vigas: el transductor 2 se sitúa en el punto central de la viga (un poco desplazado para no interferir en la roseta central), mientras que los transductores 1 y 3 se disponen a ambos lados del central a una distancia igual a la longitud del elemento de malla pintado en la viga. Esta localización de los puntos de medida de desplazamientos normales al alma puede verse en la Figura 6-11 que sigue a continuación.



Figura 6-11. Disposición de los transductores en la línea media del panel para medir los desplazamientos en el plano normal al alma.

- Se dispone un transductor en la parte inferior de la viga, en la sección centro luz de la viga, para poder medir la flecha durante el ensayo (Figura 6-12).

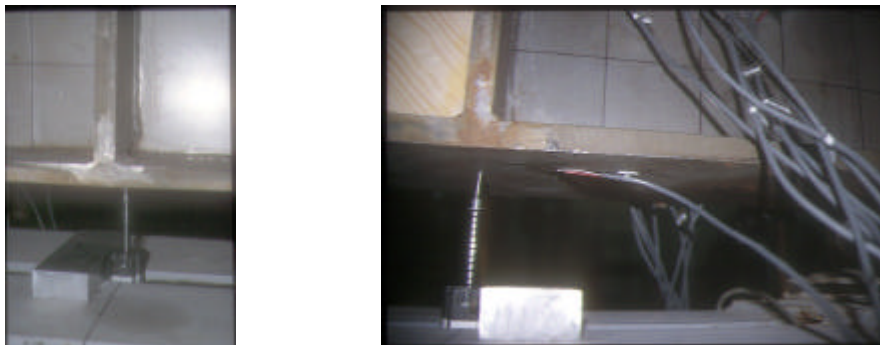


Figura 6-12. Detalles del transductor utilizado para medir flechas en la sección de centro luz durante los ensayos.

- A partir del segundo ensayo de la campaña, y por razones que se expondrán en el siguiente capítulo, se situó un transductor en el ala inferior de la viga, a la altura del aparato de apoyo, para medir posibles descensos del aparato de apoyo tal y como se muestra en la Figura 6-13.



Figura 6-13. Transductor dispuesto para los descensos del apoyo.

Para concluir este apartado, se presentan en la Figura 6-14 dos esquemas generales correspondientes a los dos modos generales de instrumentación que se han realizado durante la preparación de la campaña experimental.

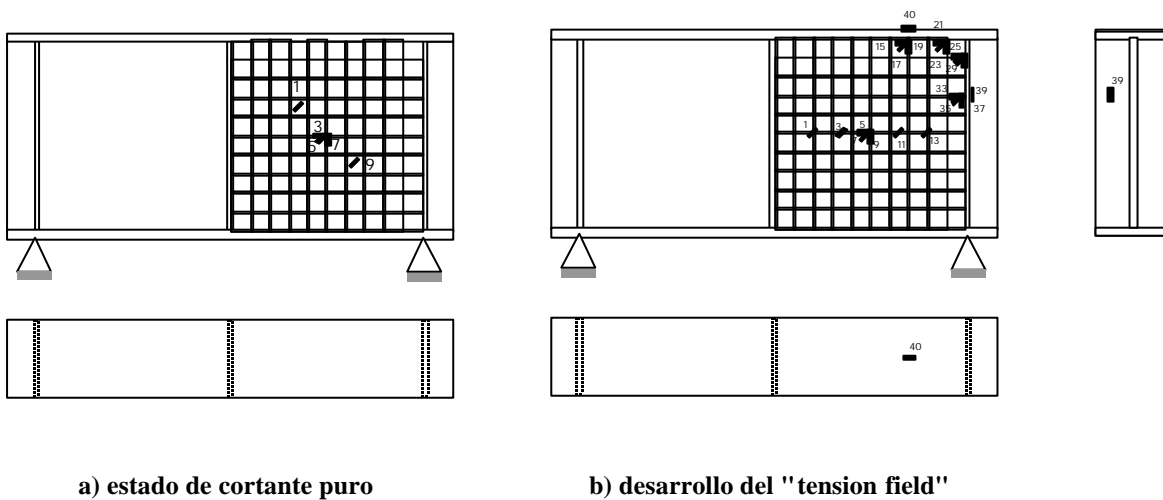


Figura 6-14. Instrumentación general de las vigas ensayadas.

6.3.2.- Método de carga. Prensa.

Los ensayos se llevaron a cabo utilizando la misma prensa que para la campaña experimental descrita en el capítulo 4. Se utilizó un pistón con una capacidad máxima de carga estática de 1000 kN y una carrera de 250 mm y la prensa se gobernaba mediante el control de la posición del pistón para poder reproducir comportamientos plásticos.

Cabe comentar que, en este caso, la rigidez del pórtico dónde se ubica la prensa es del mismo orden de magnitud que la rigidez de las vigas a ensayar. Esto hace que el valor de la flecha que se produce en la viga durante el proceso de aplicación de carga no sea directamente el desplazamiento del pistón registrado por el servocontrol analógico de la prensa en cada momento. Este valor del desplazamiento será mayor que la flecha, puesto que la viga donde se

encuentra sujeto el pistón en su extremo superior estará también sometida a efectos de flexión, aunque en el sentido opuesto.

El pórtico de carga se encuentra sobre una losa armada con el fin de absorber las elevadas reacciones que se producirán durante la aplicación de la carga en el ensayo, carga que llegará a ser la máxima aplicable con la prensa MTS.

6.3.3.- Materialización y diseño de los ensayos.

A continuación se describen los diferentes elementos que fueron utilizados en los ensayos para materializar las condiciones de contorno, apoyos y otras restricciones, así como los dispositivos de seguridad empleados.

En la fotografía de la Figura 6-15 puede verse un esquema general de los ensayos, con todos los elementos que se describen a continuación.

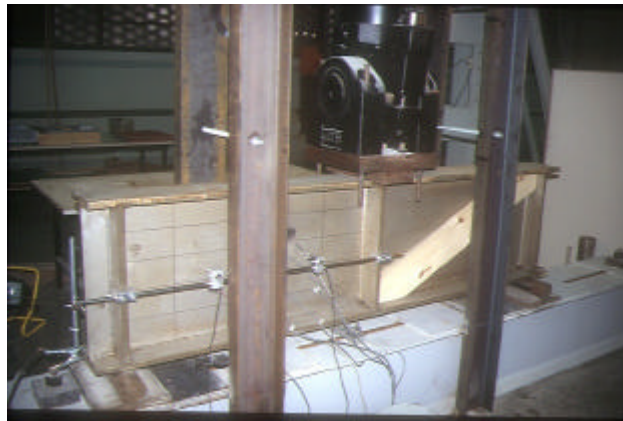


Figura 6-15. Esquema general de los ensayos.

Aparatos de apoyo

Se utilizan apoyos fijos en ambos extremos de la viga. Cada uno de ellos se materializa mediante un cilindro macizo de 80 mm de diámetro situado encima de una placa metálica que dispone de una hendidura donde se acopla el cilindro. Este tipo de apoyo permite el giro de la viga impidiendo su desplazamiento horizontal.

Viga soporte

Los aparatos de apoyo se colocan encima de una viga formada por dos IPE 400 unidas por chapas de acero de 12 mm soldadas en sus alas (ver Figura 6-15). Esta viga, que se dispuso encima del suelo, estaba unida a la losa autoportante del laboratorio mediante dos barras Macalloy, una en cada extremo.

La razón que conduce a la colocación de esta viga soporte es el hecho de que el desplazamiento del pistón es limitado, y si se apoya la viga a ensayar directamente en el suelo, no se consigue llegar hasta ella con el pistón.

Dispositivos de seguridad

Dado el elevado nivel de carga que se preveía alcanzar durante los ensayos (el máximo que nos permitía la prensa), para garantizar la seguridad frente a cualquier tipo de movimiento brusco o disfunción del sistema se dispusieron dos parejas de perfiles UPN soldados a la viga soporte (ver Figura 6-15). De este modo se crea una estructura en cajón que impediría el vuelco de la viga.

Tablas de madera

Por motivos de optimización de tiempo y recursos, sólo se instrumentó uno de los dos paneles de alma de cada viga. Interesa pues que el fenómeno de la abolladura se desarrolle en la zona instrumentada. Así, para que el panel no instrumentado no interfiera en el ensayo se dispusieron dos tabloncillos de madera en ambos lados del alma en forma de cruz. Con esto se pretende que estos puntales eviten el desplazamiento fuera del plano del alma, es decir, eviten que el panel abolle.

Placa de carga

Con el fin de concentrar al máximo la carga aplicada en el centro luz, encima del rigidizador central, se coloca una chapa rectangular de 45 mm de espesor y dimensiones 360 x 150 mm atornillada a otra chapa que está unida al pistón. En el caso de las tres vigas tipo ad05 no se han colocado estas chapas por razones de falta de espacio.

6.3.4.- Instalación y sistema de adquisición de datos.

Una vez instrumentadas las vigas, éstas se posicionan en la prensa en la que se va a realizar el ensayo. Las galgas y transductores de desplazamiento se conectan a un sistema de adquisición de datos. En este caso el sistema utilizado es el IOtech, distinto al utilizado en la primera campaña experimental y se compone de:

- cinco módulos DBK43A de 8 canales cada uno para la conexión de galgas
- un módulo multiplexor analógico DBK54 de 16 canales donde se conectarán los transductores de desplazamiento y los dispositivos de la prensa
- un conversor analógico-digital (Daqbook)

Un módulo tipo DBK43A condiciona la señal de un transductor con configuración de puente de Wheatstone que tienen una señal de salida menor que 50 mV, como las de las galgas extensométricas. De todas las configuraciones posibles del puente de Wheatstone se escogió la configuración de cuarto de puente positiva. Una vez elegida la configuración a emplear se soldaron las resistencias correspondientes para cada uno de los 8 canales de cada módulo tal y como se indicaba en el manual del Daqbook (IOtech, 1997).

Además de las resistencias se soldó al bloque de cada canal un "shunt" de calibración con el fin de poder calibrar cada uno de los canales con la mayor precisión y comodidad posibles. Un "shunt" de calibración es una resistencia de valor conocido que se conecta en paralelo con la galga, de manera que podemos producir una deformación ficticia de la cual conocemos el valor. Ello permite realizar un acondicionamiento de la señal ajustando la ganancia del canal hasta obtener este valor de resistencia conocido.

A parte de la configuración de los puentes de Wheatstone se dispone para cada uno de los canales un filtro para evitar la presencia de ruido en la señal.

Tal y como puede verse en la Figura 6-16, los cables previamente soldados a las terminales de las galgas se conectan directamente a los módulos DBK43A; los transductores tipo lvd_t se conectan a una fuente de alimentación de 10V y al DBK54, mientras que el transductor ldt se conecta a una fuente de alimentación de 24 V en corriente continua y al DBK54. Finalmente, a éste también se conectan las salidas de carga y posición del pistón del control de la prensa.

Los módulos de galgas y el de transductores de desplazamiento (DBK43A y DBK54 respectivamente) se conectan a su vez con el Daqbook, que recibe los voltajes de todos los instrumentos. Estos son medidos y transformados en señales digitales que son enviadas al ordenador personal que se encuentra conectado a este convertor analógico-digital.

De esta forma, durante el desarrollo del ensayo aparecen en la pantalla del ordenador las lecturas de todas las galgas, los desplazamientos medidos por los transductores de desplazamiento, el nivel de carga y la posición del sistema.

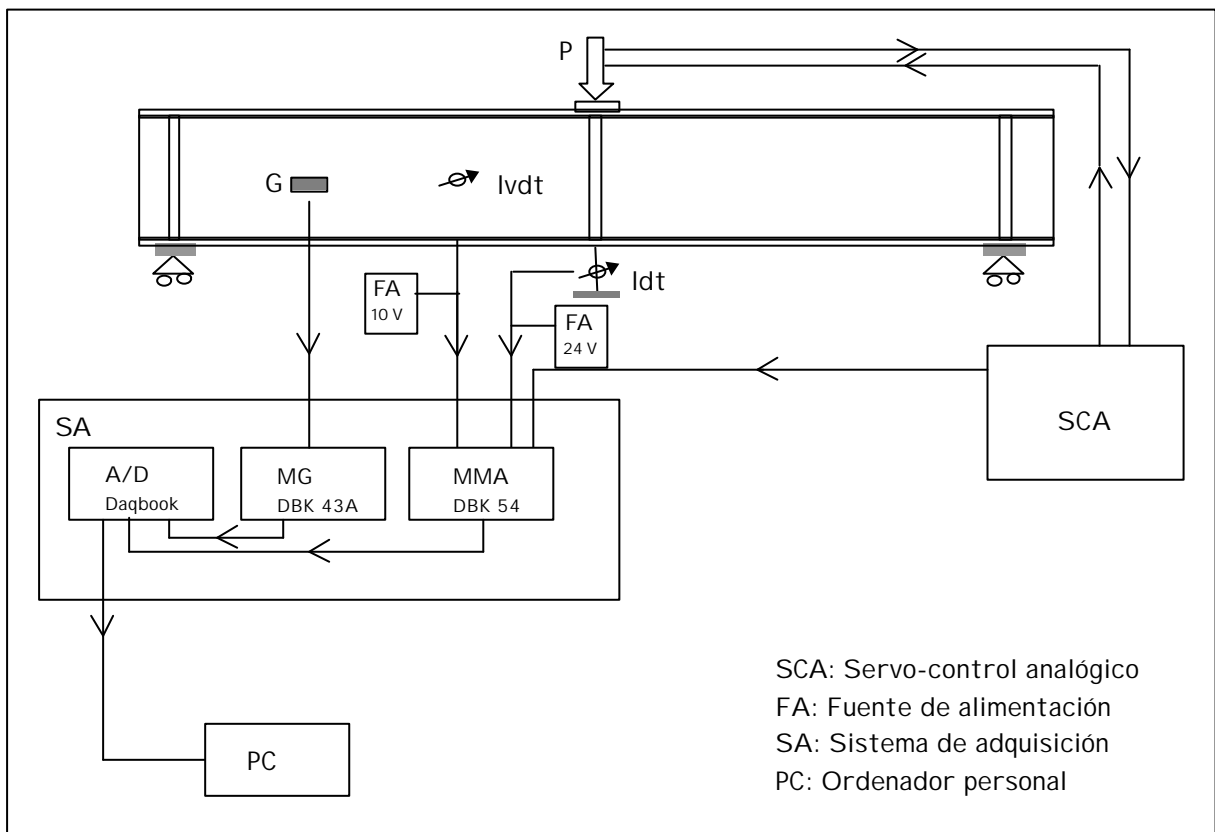


Figura 6-16. Esquema general de conexiones.

En la figura que sigue a continuación se observa, en primer lugar, el sistema de adquisición de datos con la totalidad de los módulos conectados, que a la vez se conecta al servocontrol analógico de la prensa que puede verse en la segunda imagen.

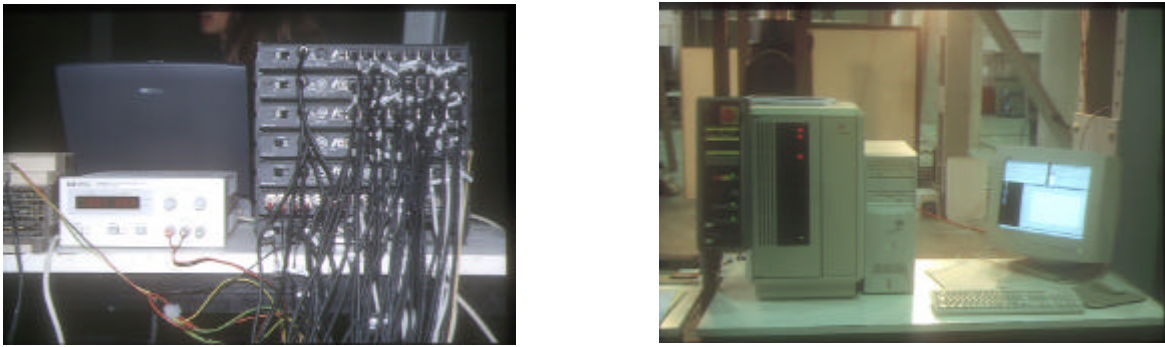


Figura 6-17. Sistema de adquisición de datos y servocontrol de la MTS.

6.4.- DESCRIPCIÓN DE LOS ENSAYOS. RESULTADOS EXPERIMENTALES.

6.4.1.- Introducción.

A continuación se describen brevemente los doce ensayos realizados durante la campaña experimental, comentando algunas de las incidencias, dificultades e imprevistos surgidos en cada uno de ellos. Asimismo se presentarán aquí solamente los resultados experimentales que se consideran más relevantes en el contexto actual del trabajo de investigación. Otros resultados experimentales pueden hallarse en el Anejo 2 de resultados obtenidos en la campaña experimental de agotamiento por cortante. Los resultados completos de la campaña experimental pueden encontrarse en Real et al. (2001).

En el siguiente capítulo los resultados experimentales son objeto de un profundo análisis que permitirá extraer conclusiones de relevancia de cara a poder evaluar el comportamiento de estas vigas armadas de acero inoxidable frente a esfuerzos cortantes primordialmente.

Tal y como se ha comentado anteriormente la geometría de las vigas ha sido expresamente elegida para estudiar el comportamiento de las almas bajo sollicitaciones de cortante, siendo todas ellas de luz reducida y canto grande. La geometría de las vigas cubre un amplio campo de esbelteces mecánicas ($\bar{\lambda}_w$) con relaciones de aspecto a/d entre 0.5 y 2, y espesores de chapa de alma de 4, 6 y 8 mm.

A continuación se presentan los ensayos y resultados correspondientes a cada viga ensayada en orden cronológico, de acuerdo con la realización de la campaña experimental.

6.4.2.- Viga ad1w8.

La campaña experimental se inició con el ensayo de la viga ad1w8. En esta viga la relación de aspecto a/d es de 1 y la chapa del alma tiene un espesor de 8mm. El esquema de disposición de la instrumentación y una foto de la viga antes de ensayar pueden verse en la Figura 6-18.

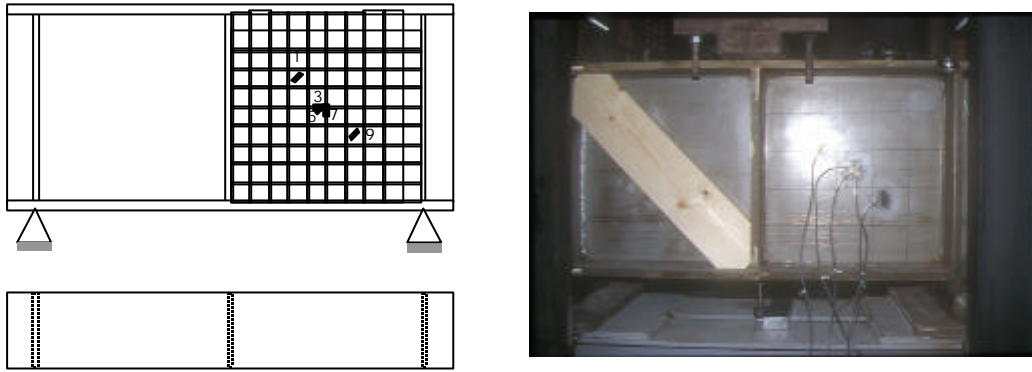


Figura 6-18. Disposición de la instrumentación y fotografía de la viga ad1w8.

La distribución de las galgas en cada viga se ha escogido en función de los resultados obtenidos en la modelización numérica de los ensayos; así en este caso en el modelo numérico se observó que en las vigas con alma de 8 mm se produce la plastificación total del alma antes de abollar. De modo que, se disponen bandas solamente en el centro del panel para estudiar la evolución de las tensiones que corresponderán al estado de cortante puro.

A continuación se presentan las gráficas más representativas de los datos obtenidos en este ensayo. La Figura 6-19a muestra las deformaciones medidas por las galgas situadas en el centro del panel; la respuesta observada es la respuesta correspondiente a un estado de tensiones de corte puro, hecho que se deduce a partir de la prácticamente nula deformación que experimentan las galgas verticales y horizontales, mientras que la banda situada a 45° se lleva toda la deformación.

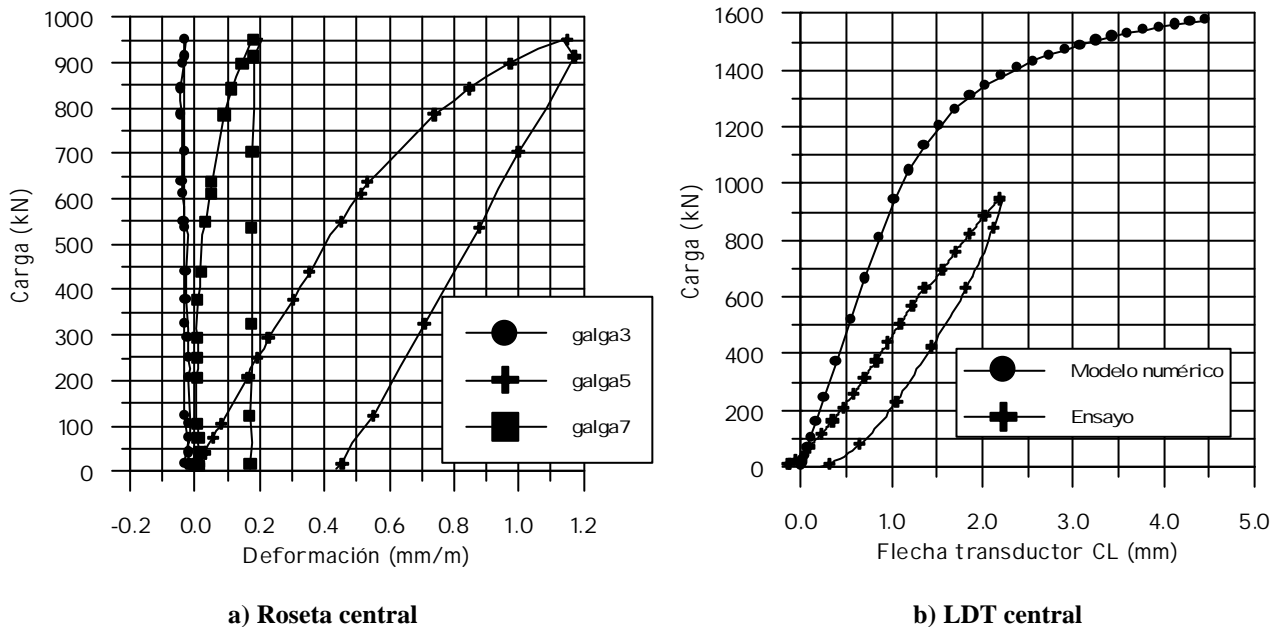


Figura 6-19. Resultados obtenidos del ensayo de la viga ad1w8.

Por otro lado, durante el transcurso de este ensayo se observó que los valores de la flecha medidos por el transductor de desplazamiento situado en el centro luz de la viga diferían significativamente del resultado de flecha obtenida del modelo, llegando a ser del orden del doble al final de la prueba (Figura 6-19b). Este fue un punto en el que se puso especial atención, para justificar esta discordancia tan clara entre ambos resultados.

6.4.3.- Viga ad1w6.

Esta viga presentaba una carga crítica de abolladura muy cercana a la carga máxima permitida por la prensa, con lo que las galgas se disponen de tal forma que se pueda valorar cuantitativa y cualitativamente, la posible formación del campo diagonal de tracciones (Figura 6-20). La galga que se dispuso en el ala inferior tenía como objetivo la evaluación de la tensión en este punto para poder compararla con la del modelo, en el caso de que, de nuevo, ambos resultados de flechas no estuvieran próximos. A su vez, esta galga, junto con la que se situó en el rigidizador, pretendían cuantificar el nivel de tensiones en los elementos de anclaje del campo diagonal.

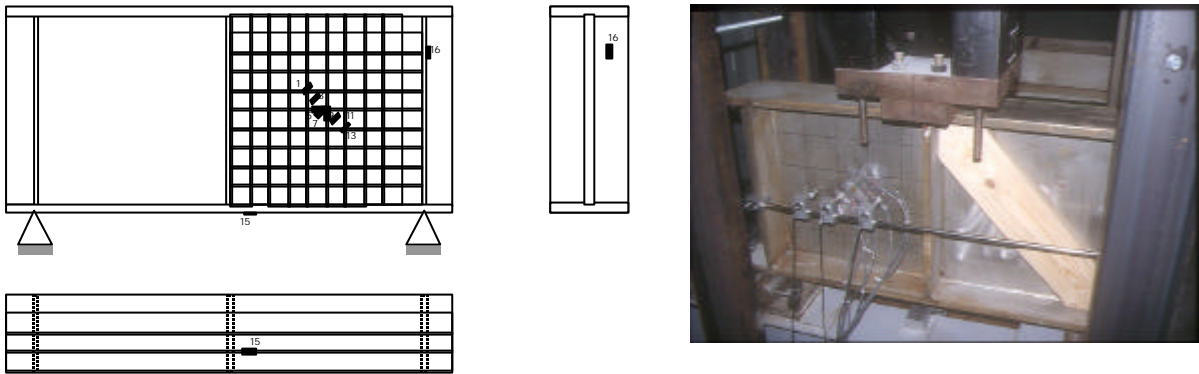


Figura 6-20. Esquema de instrumentación en la viga ad1w6

Finalmente no se llegó a alcanzar la abolladura de la viga; la carga máxima aplicada fue de 950 kN. De nuevo, y al igual que en el caso de la primera viga ensayada, la flecha medida durante el ensayo era mucho mayor que la que se obtenía del análisis con el modelo numérico.

6.4.4.- Viga ad15w8.

Esta viga, de comportamiento cualitativamente similar a las de espesor de alma de 8 mm con relaciones $a/d = 1$, se instrumentó con un total de 11 galgas (Figura 6-21), de manera que las galgas del alma recogían el estado tensional del alma, que estaría lejos del agotamiento por plastificación. Se dispuso una galga adicional en el ala superior para controlar e identificar el estado tensional de la viga y del alma, y poder así analizar el problema de las flechas.

En vigas cortas como las estudiadas en este capítulo, con relaciones luz/canto menores de 5, las deformaciones producidas por esfuerzo cortante son importantes y deben sumarse a las deformaciones de flexión.

En un primer momento se pensó que la diferencia entre las flechas medidas y las que predecía el modelo numérico podía ser debida a una incorrecta modelización del problema, de modo que no se estaban incluyendo las deformaciones por cortante. Un análisis minucioso de los resultados del modelo permitió rechazar dicha hipótesis.

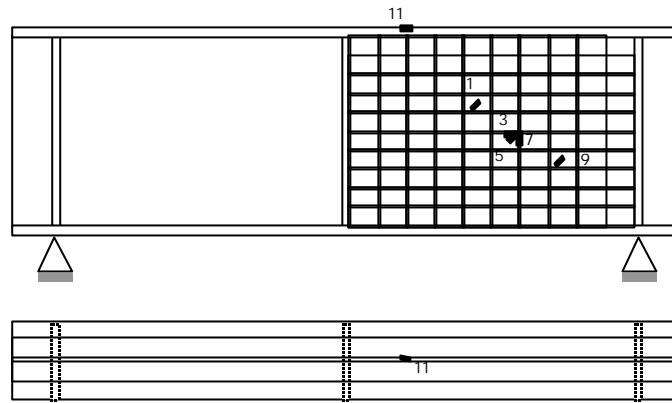


Figura 6-21. Disposición de la instrumentación en la viga ad15w8

Tal y como se ha comentado anteriormente, para la realización de los ensayos se utilizó una viga soporte, sobre la que se dispusieron los aparatos de apoyo y sobre estos las vigas a ensayar. Dicha viga soporte estaba formada por dos perfiles IPE 400 unidos por chapas de acero soldadas en las alas. A pesar de la rigidez de esta viga, teniendo en cuenta las elevadas cargas a las que se estaba trabajando, se pensó en la posibilidad de que la diferencia de la flechas fuera debida a un posible descenso de los aparatos de apoyo.

Para poder evaluar el descenso del apoyo se dispuso un transductor en el ala inferior de la viga a la altura del punto de apoyo (Figura 6-22b). De este modo, y midiendo los descensos en uno de los apoyos durante el ensayo, se puede conocer el valor de la flecha en todos los ensayos del modo que se describe a continuación y que se representa en la Figura 6-23.



Figura 6-22a. Vista general de la viga ad15w8

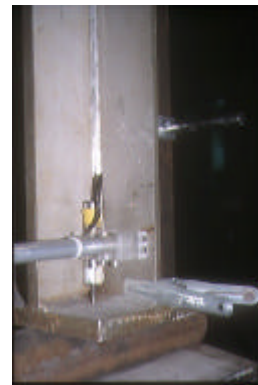


Figura 6-22b. Situación del transductor utilizado para la medida del descenso de apoyo

A los desplazamientos verticales medidos por el transductor situado en el centro luz de la viga se deben restar los descensos registrados en el apoyo. De esta forma obtenemos la curva representada como "diferencia". Linealizando esta curva para omitir el período de acomodación de la viga (valores de carga inferiores a 200 kN) y desplazándola hasta el origen obtenemos la curva representada como "flecha ensayo" que corresponde a la flecha real del ensayo y que se comporta de modo prácticamente idéntico a la del modelo. Así se acepta de forma definitiva la hipótesis del descenso de apoyo y se mantiene el transductor durante toda la campaña para el cálculo de flechas.

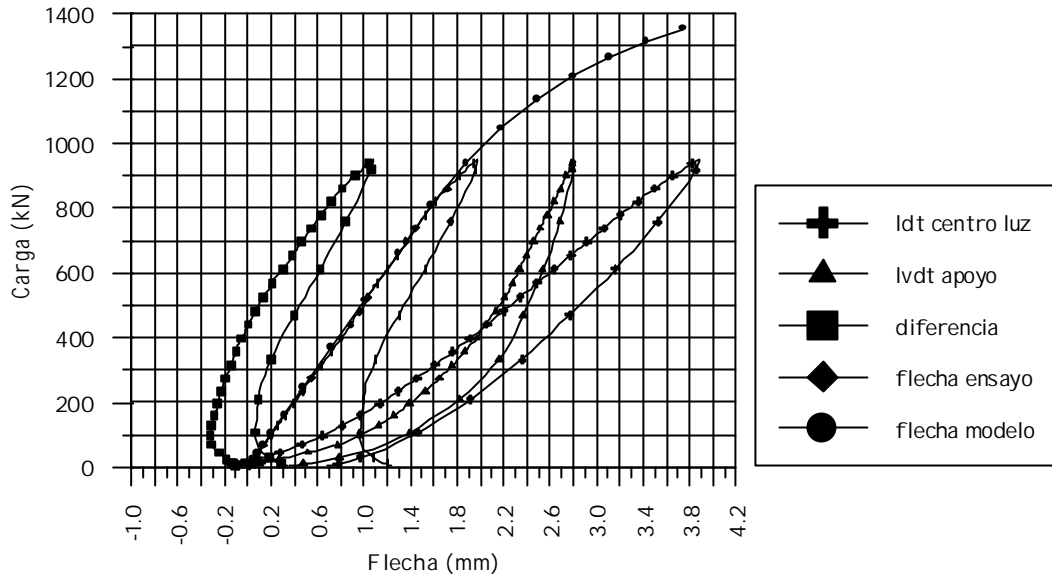


Figura 6-23. Representación de la flecha en el ensayo de la viga ad15w8.

6.4.5.- Viga ad15w6.

La siguiente viga ensayada fue la viga ad15w6, con espesor de alma de 6 mm. Los resultados del análisis numérico indican que en esta viga la abolladura ocurre para niveles tensionales elevados, próximos a la plastificación y a su vez próximos a la carga máxima que se puede aplicar en el laboratorio.

En el modelo numérico también se observa la formación de un campo diagonal de tracciones. Por esta razón, se eligió un esquema de instrumentación distinto a los presentados en las vigas anteriores que permitiera registrar tensiones de corte puro y su evolución hacia el campo diagonal de tracciones, tal y como se muestra en el esquema siguiente.

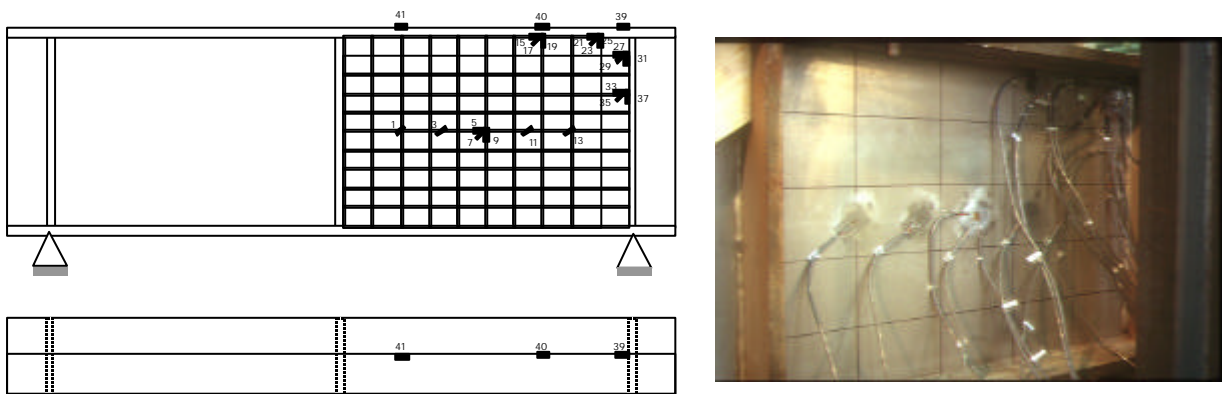


Figura 6-24. Esquema de instrumentación en la viga ad15w6.

Las vigas en las que se espera la formación de un campo diagonal de tracciones se instrumentan con un total de 40 galgas. En la línea media del panel de alma se colocan una roseta central y galgas unidireccionales situadas en la dirección de la diagonal geométrica del panel para recoger el ancho y la magnitud del campo diagonal de tracciones. Para evaluar las tensiones en la zona en la que se ancla el campo diagonal y se forman las rótulas plásticas del

mecanismo de colapso, zona de unión entre el ala superior y el rigidizador de apoyo, se colocan cuatro rosetas más.

La carga máxima aplicada en el ensayo fue de 999 kN, y a pesar de estar muy cerca de la capacidad última de la viga, no se llegó a desencadenar la abolladura del alma.

6.4.6.- Viga ad2w8.

Una vez ensayadas las dos parejas de vigas con almas de espesores 8 y 6 mm de las familias ad1 y ad15 se continúa con sus semejantes del grupo ad2 puesto que su comportamiento es muy similar. Así, se ensaya la viga ad2w8, con el siguiente esquema de instrumentación que puede verse en la Figura 6-25.

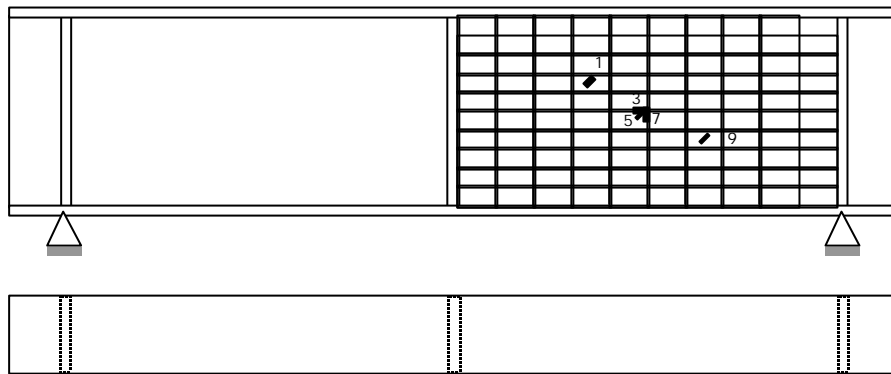


Figura 6-25. Esquema de instrumentación en la viga ad2w8.

Al igual que en las anteriores vigas con espesor de alma de 8 mm, con las cargas máximas aplicadas durante el ensayo, el alma de la viga se encuentra en estado de corte puro y lejos del agotamiento por plastificación. En la Figura 6-26 se presentan las curvas carga-flecha obtenidas experimental y numéricamente, y en la Figura 7-27 se observa un esquema general del ensayo.

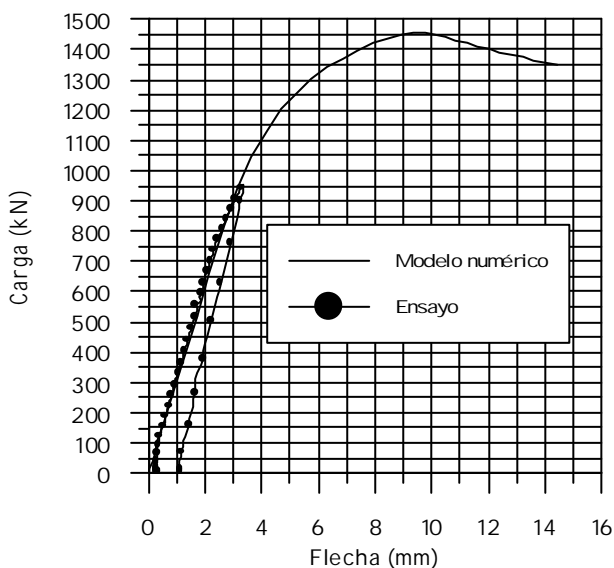


Figura 6-26. Curvas carga-flecha (viga ad2w8).

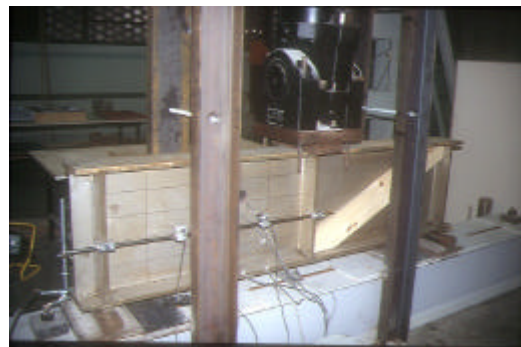


Figura 6-27. Esquema general del ensayo de la viga ad2w8.

6.4.7.- Viga ad2w6.

Durante los preparativos previos al ensayo de la viga ad2w6 se detectó un comportamiento anómalo en dos de los módulos de conexión de las galgas. Tras la revisión de los equipos llevada a cabo por diferentes técnicos y especialistas de la universidad, los módulos estropeados fueron mandados al fabricante para sustituirlos por otros en perfectas condiciones. A causa de la demora en la entrega de dichos módulos por parte del suministrador, se decidió reemprender la campaña experimental utilizando los tres módulos restantes, que funcionaban perfectamente.

Por lo tanto, en el ensayo de la viga ad2w6, instrumentada de forma análoga a las anteriores vigas con alma de 6 mm, sólo se le pudieron conectar 24 de las 40 galgas que tenía el conjunto de su instrumentación prevista, dado que ocurrió un fallo en el funcionamiento de parte del equipo utilizado.

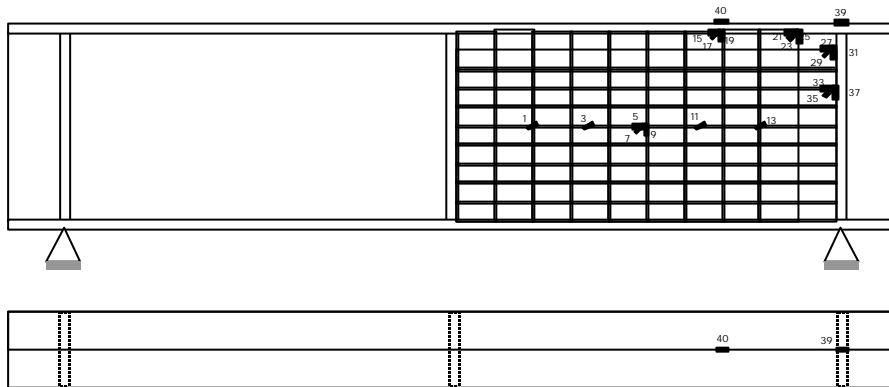


Figura 6-28. Esquema de instrumentación en la viga ad2w6.

Tal y como sucedió con el resto de las vigas de espesor 6 mm anteriormente ensayadas, no se produjo la abolladura del alma aunque la carga crítica de abolladura estaba muy cercana a la carga máxima aplicada durante la prueba.

En la Figura 6-29 se presenta la evolución de las deformaciones en las bandas de la roseta central del alma. La gráfica refleja un comportamiento típico de un estado de cortante puro, ya que las galgas dispuestas a 45° (galgas 7 y 8) son las que registran mayores deformaciones, mientras que las situadas en posición horizontal (galga 5) y vertical (galgas 9 y 10) apenas perciben los efectos de la aplicación de carga. No se obtuvieron datos de la galga 6, aunque su comportamiento debería ser parecido a la galga 5.

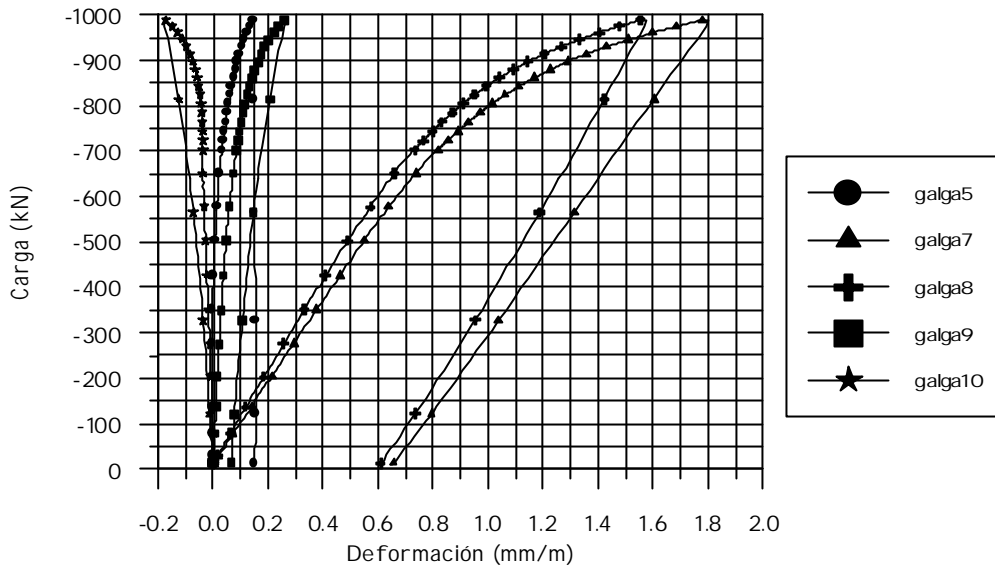


Figura 6-29. Deformaciones medidas en el centro del panel durante el proceso de carga.

6.4.8.- Viga ad05w8.

A continuación se ensayaron las vigas con relación de aspecto $a/d=0.5$. Primero se ensayó la viga ad05w8 con la siguiente distribución de galgas:

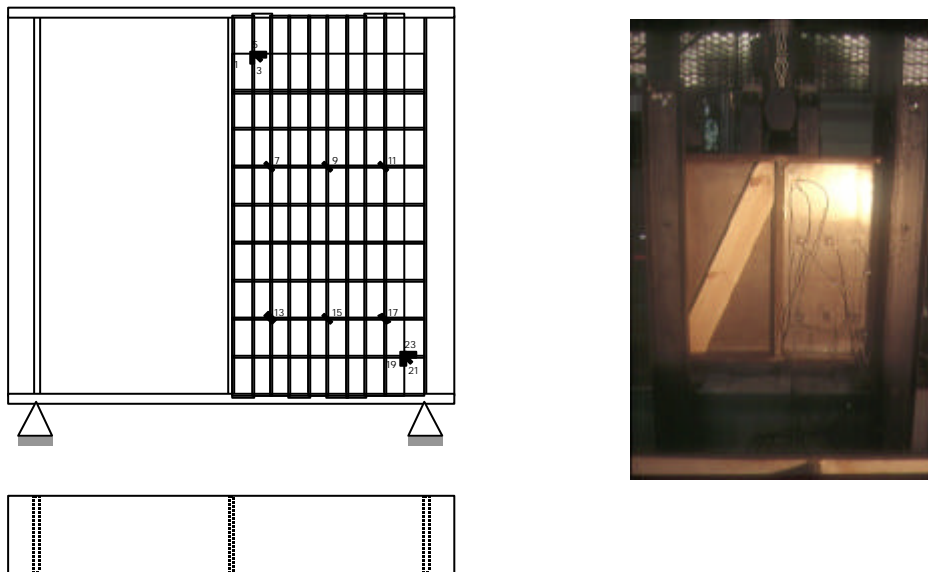


Figura 6-30. Esquema de instrumentación y vista general del ensayo de la viga ad05w8.

El comportamiento de estas vigas con relación $a/d = 0.5$ difiere de los demás grupos de vigas y, por ello, su esquema de instrumentación es distinto. Las rosetas de las esquinas (Figura 6-30) se disponen para obtener los niveles y distribución de las tensiones, que reflejan la entrada de carga por la sección media y reacción por el apoyo. Las galgas unidireccionales, orientadas a 45° y distribuidas en todo el panel, pretenden evaluar el nivel de tensiones en el alma. Al

igual que sucede con el resto de vigas con chapa de 8 mm, en esta viga, para los niveles de carga que se aplican en la prueba, no se observa la formación del campo diagonal de tracciones.

Cabe comentar que esta viga se diseñó con alas y rigidizadores de espesor 30 mm con el fin de permitir el anclaje del campo diagonal de tracciones en el caso que se produjera. Este aumento en el espesor de las alas hizo que la viga no cupiese en el espacio máximo comprendido entre los aparatos de apoyo y la chapa inferior que se coloca en el pistón para la aplicación más concentrada de la carga. Para solucionar este impedimento, se tuvo que sustituir el rodillo del aparato de apoyo utilizado hasta el momento, de diámetro 80 mm, por un rodillo con un diámetro de 50 mm. No siendo suficiente esta sustitución, se tuvo que retirar del pistón la chapa comentada anteriormente.

6.4.9.- Viga ad05w6.

La siguiente viga ensayada fue la ad05w6. En este caso, y a diferencia de las demás vigas de alma de 6 mm, tampoco se espera la formación del campo diagonal de tracciones. La disposición de galgas es idéntica a la de la viga anterior (Figura 6-30).

Para este ensayo se repuso el aparato de apoyo original ya que las alas de esta viga eran de 20 mm, pero la aplicación de la carga continuaba siendo directamente desde el pistón, puesto que no había espacio suficiente para la chapa.

Los resultados de la roseta situada para recoger la entrada de carga (ver Figura 6-30) se representan a continuación y en ellos ya se percibe que la entrada de carga se recoge mayoritariamente a través de las galgas verticales. Así, se observa que conforme se procede a la entrada de carga en la dirección vertical (las galgas 1 y 2 son las primeras percibir la existencia de la carga) las tensiones van abriéndose, ya que para estados más avanzados las bandas diagonales y horizontales obtienen un registro creciente de deformaciones (Figura 6-31).

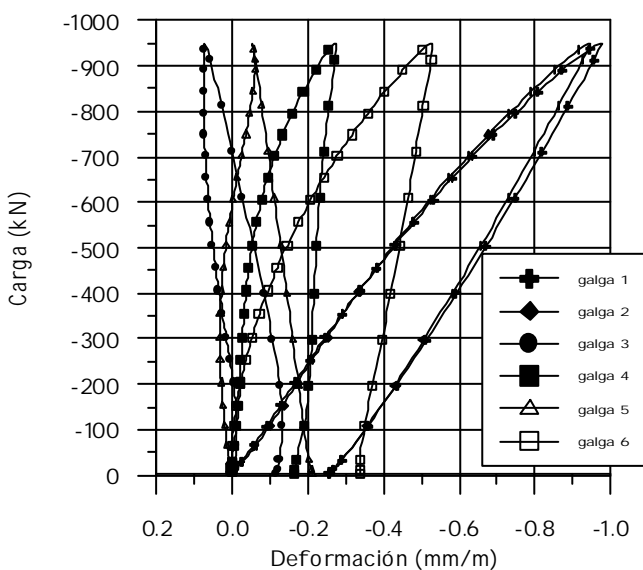


Figura 6-31. Deformaciones medidas en las rosetas situadas en la zona de entrada de carga.



Figura 6-32. Vista general de la viga ad05w6 instrumentada.

6.4.10.- Viga ad05w4.

En la última de las vigas con relación $a/d = 0.5$ ensayada se produjo por primera vez en la campaña el fenómeno de la abolladura. La distribución de las galgas (Figura 6-33) responde a otro modo de comportamiento diferente al de las otras vigas de esta familia, ya que en este caso se percibía la formación del campo diagonal de tracciones en los resultados del modelo numérico. Por esta razón se sustituyen las galgas unidireccionales del centro del panel por rosetas, con el fin de poder conocer con exactitud la dirección de las tensiones principales.

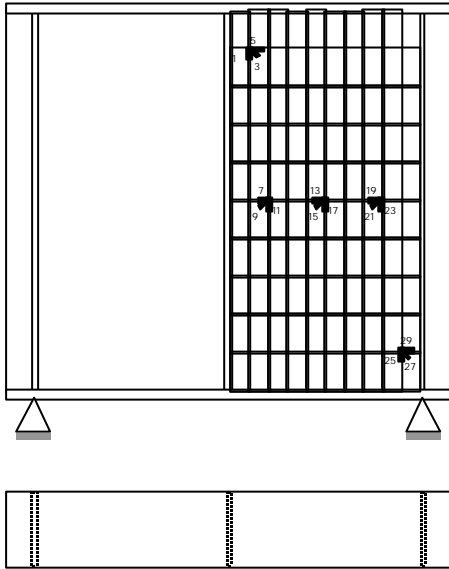


Figura 6-33. Esquema de instrumentación en la viga ad05w4.

Figura 6-34. Deformada de la viga ad05w4 después de la abolladura del ala

Observando la deformada de la viga en la fotografía de la Figura 6-34, se observa que se formaron dos ondas de abolladura, tal y como se producía en la modelización por elementos finitos. El no poder situar la placa debajo del pistón y no poder concentrar la aplicación de la carga en el rigidizador favoreció la aparición de un efecto local conocido como "patch loading" (Figura 6-35b).

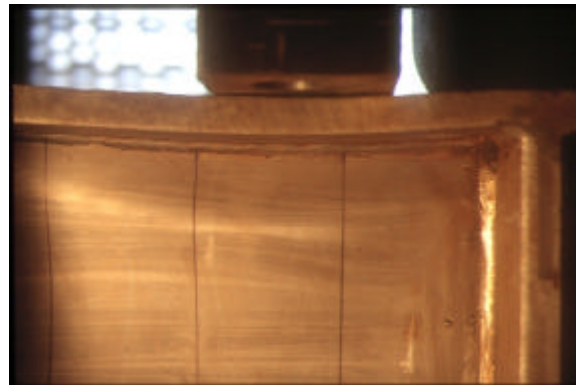


Figura 6-35. a) Abolladura del alma por cortante.

b) Efecto local: "patch loading"

6.4.11.- Viga ad1w4.

A continuación se ensayaron la vigas restantes con espesor de alma de 4mm. Con el ensayo de la viga ad1w4, comenzaba una serie de tres ensayos en los que la carga crítica de abolladura estaba suficientemente alejada de la plastificación y dentro del rango de cargas que se pueden aplicar en el laboratorio. Esta viga se ensayó con la disposición de las galgas que se observa en la Figura 6-36, para poder determinar la abolladura y la posterior formación del campo diagonal de tracciones.

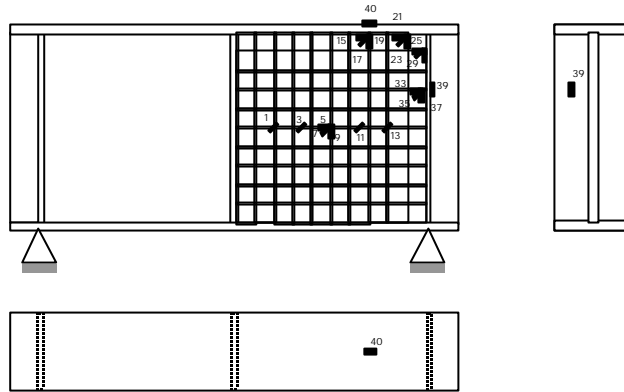


Figura 6-36. Esquema de instrumentación para la viga ad1w4.

En la Figura 6-37 se presenta una gráfica de las curvas carga-flecha obtenidas experimental y numéricamente. En dicha figura se observa la gran similitud existente entre los resultados experimentales y los derivados del modelo numérico.

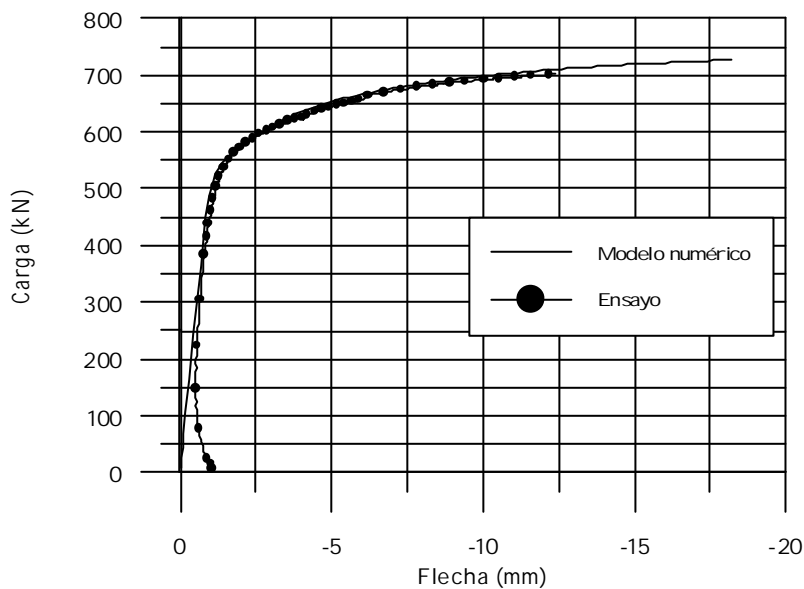


Figura 6-37. Curvas carga-flecha experimental y numérica de la viga ad1w4.

En las curvas de la figura anterior se aprecia un cambio de comportamiento para un valor de la carga entorno a los 550 kN, posiblemente asociado a la aparición de la abolladura en el alma. El valor de la tensión tangencial en el alma, para dicho valor de la carga total puede tomarse aproximadamente igual a 137.5 MPa, y suponiendo que el alma se encuentra en un

estado de corte puro, la tensión de comparación correspondiente según von Mises sería de aproximadamente 238 MPa.

En la Figura 6-6 se ha presentado la curva tensión-deformación obtenida experimentalmente para las chapas de 4 mm. En ella se ve que, para valores de tensión cercanos a 238 MPa, ha entrado claramente en juego la no linealidad del material. En el siguiente capítulo se realiza un análisis profundo de los resultados obtenidos tanto experimental como numéricamente.

Durante el ensayo se formó una onda de abolladura en la dirección de la diagonal del panel, y la carga máxima a la que se llegó fue de 705 kN. La onda formada en el alma se propagó incluso a la zona exterior al rigidizador tal y como puede verse en la imagen de la Figura 6-38. Esta circunstancia podría ser debida al hecho de que el rigidizador no tuviera suficiente capacidad resistente para permitir el anclaje del campo diagonal de tracciones.



Figura 6-38. Onda de abolladura de la viga ad1w4.

6.4.12.- Viga ad15w4.

El comportamiento esperado en esta viga era muy similar al de la viga anterior y así se corroboró durante el proceso de carga de ésta. El esquema de instrumentación será análogo al de la viga anterior y se representa en la Figura 6-39.

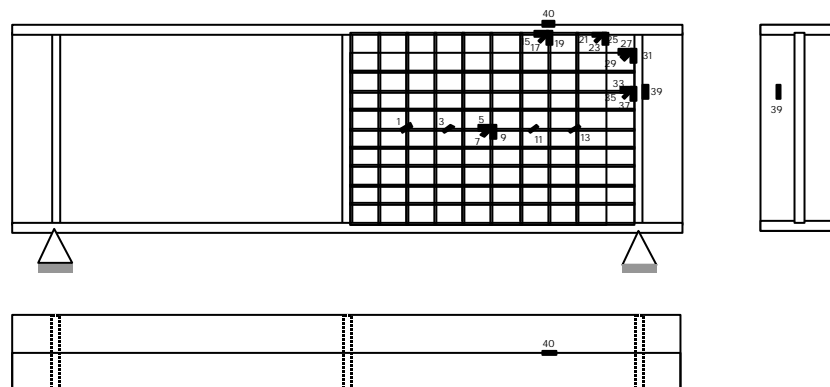


Figura 6-39. Disposición de la instrumentación en la viga ad15w4.

Tal y como se esperaba tras el previo análisis del modelo, la viga abolló formándose claramente una onda en la dirección diagonal geométrica del panel. Esta viga tiene una relación de aspecto mayor que la viga anterior y ello conduce a una esbeltez relativa mayor, de modo que en la viga ad15w4 la abolladura se aprecia para valores de carga sensiblemente menores que en la viga anterior ad1w4. Por otro lado, para los valores más elevados de carga se apreció la formación del mecanismo del marco que llevaría a la viga al colapso.

A continuación se presentan una serie de imágenes en las que se observa la evolución de la abolladura del panel.

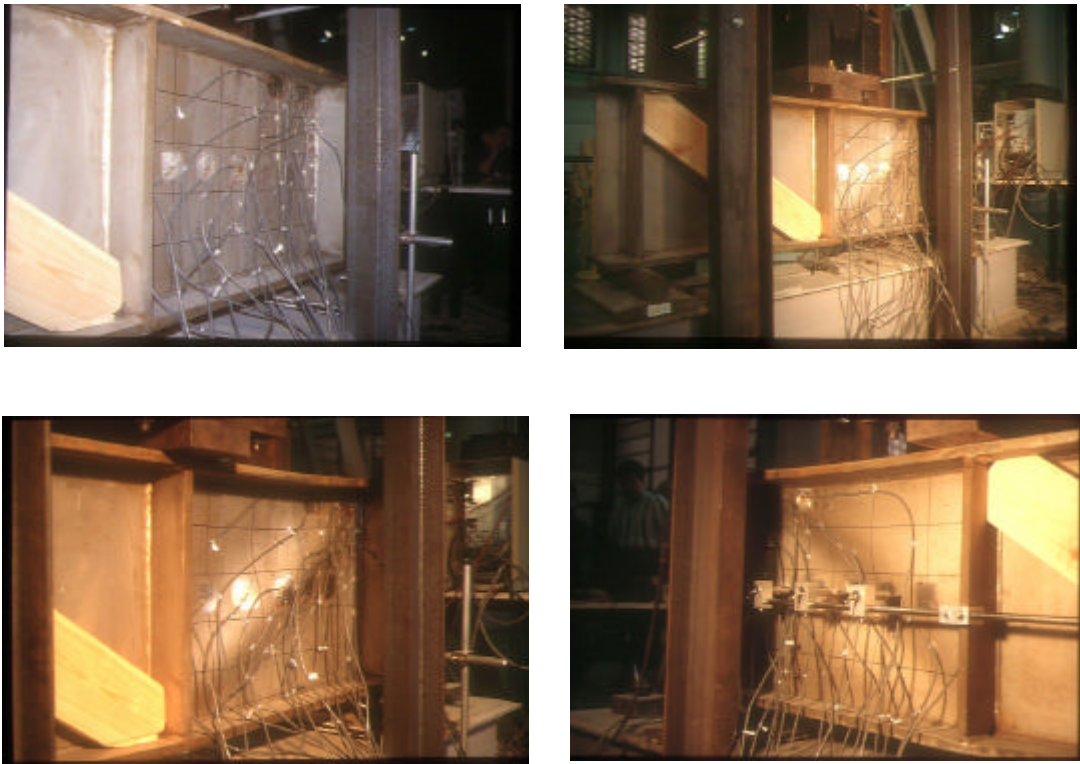


Figura 6-40. Evolución de la abolladura en el panel.

6.4.13.- Viga ad2w4.

La campaña experimental finalizó con el ensayo de la viga ad2w4. El esquema de la distribución de galgas es análogo al de las vigas para las que el modelo numérico predecía la abolladura y la posterior redistribución de las tensiones para la formación del campo diagonal de tracciones (Figura 6-41).

Esta viga es la más esbelta del conjunto de las doce vigas, y es por ello por lo que se esperaba encontrar en ella las mayores deformaciones de la campaña experimental. La Figura 6-42 presenta la curva carga-flecha obtenida experimentalmente.

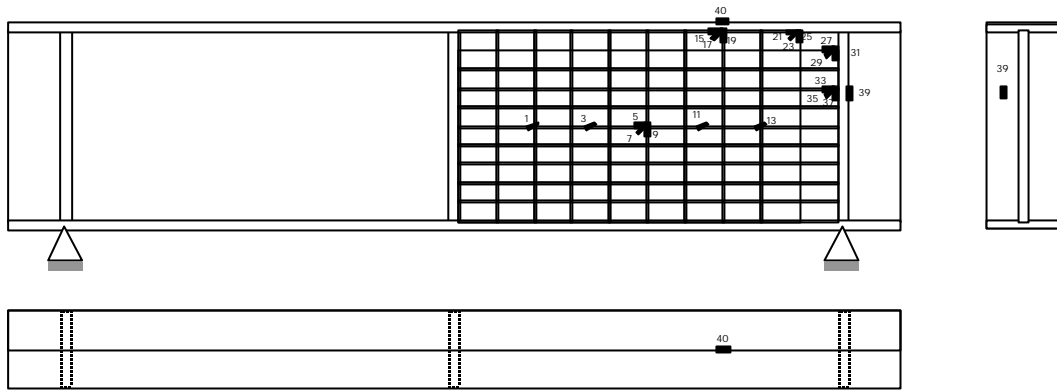


Figura 6-41. Esquema de instrumentación para la viga ad2w4.

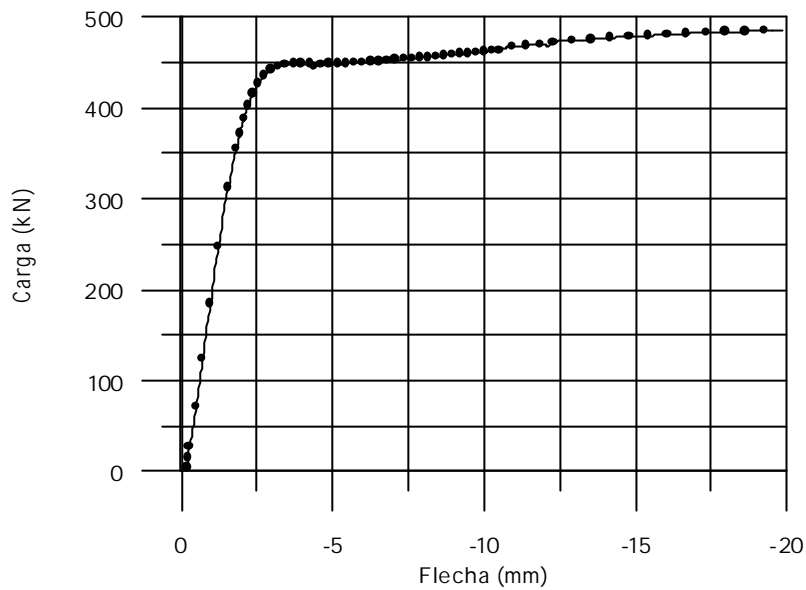


Figura 6-42. Curva carga-flecha experimental de la viga ad1w4.

En esta curva se aprecia como, después de la aparición de la abolladura (Figura 6-43) (pérdida de linealidad de la curva carga-flecha) se produce un incremento de capacidad resistente hasta el colapso de la estructura. Durante el ensayo, se pudo observar de forma clara la formación del mecanismo del marco en un estado más avanzado que en las vigas anteriores (Figura 6-44).



Figura 6-43. Abolladura en la viga ad2w4.



Figura 6-44. Mecanismo del marco.

La información recogida por los transductores situados en el alma de la viga, nos permite observar la evolución progresiva de la onda de abolladura presentada en la Figura 6-45.

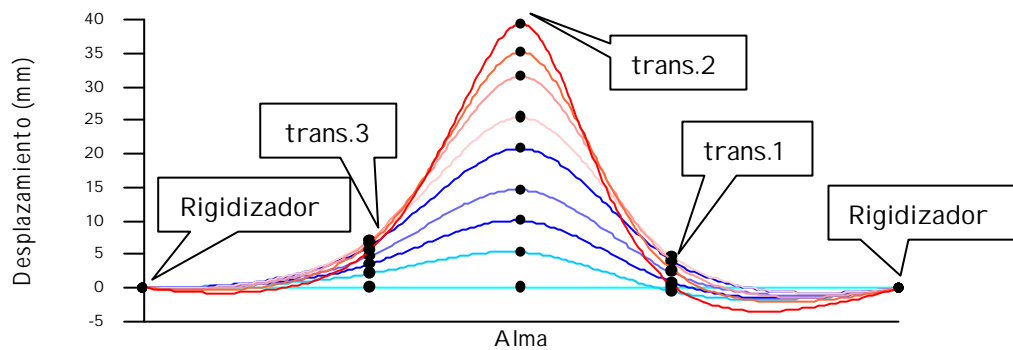


Figura 6-45. Evolución de la onda de abolladura en la viga ad2w4.

6.5.- CONCLUSIONES.

A continuación se exponen diversas conclusiones relativas al diseño de vigas armadas con almas esbeltas de acero inoxidable extraídas a partir del trabajo experimental realizado. En el siguiente capítulo se realizará un análisis detallado de los resultados derivados de los ensayos.

Dado el carácter experimental de este trabajo, se pueden extraer conclusiones relacionadas con el trabajo experimental en sí mismo, destacándose los siguientes puntos:

- Es importante establecer un planteamiento inicial concreto. Es decir, marcar unos objetivos y una estrategia a seguir a partir de un estudio previo del problema con el fin de no salirse, durante la campaña experimental, fuera de los límites del problema.
- Los resultados obtenidos experimentalmente se ajustan muy bien a los resultados derivados de la aplicación de un modelo numérico, que se han utilizado para la preparación de la campaña experimental. Esto permitirá, en el siguiente capítulo, utilizar los resultados numéricos y experimentales para realizar análisis más detallados del comportamiento de las vigas.

- La materialización física de elementos como los aparatos de apoyo, la viga de entrega de carga, y en definitiva todos los detalles influye en la reproducción correcta de las condiciones de contorno del fenómeno que se quiere estudiar.
- En campañas experimentales en las que se prevea alcanzar cargas elevadas, y las rigideces de los elementos que trabajan a flexión sean comparables a las rigideces de los elementos auxiliares del ensayo, es necesario utilizar transductores de desplazamiento para localizar posibles descensos de apoyo.
- Los tablones de madera del panel no instrumentado cumplieron con el objetivo de impedir los desplazamientos del alma fuera de su plano. El grado de efectividad dependía en gran parte del grado de encaje de la madera entre los rigidizadores y el alma.
- Por último, cabe destacar que el hecho de que en algunos casos, la onda de abolladura se propagará más allá del rigidizador, se debía a la falta de capacidad resistente del mismo para permitir el anclaje completo del campo diagonal de tracciones.

