

Capítulo 4

CAMPAÑA EXPERIMENTAL DE VIGAS DE ACERO INOXIDABLE A FLEXIÓN. DETERMINACIÓN DE FLECHAS

4.1.- INTRODUCCIÓN.

Este capítulo se centra principalmente en el análisis del comportamiento a flexión de vigas de acero inoxidable biapoyadas y continuas, sobre la base de los resultados obtenidos durante una campaña experimental realizada en el Laboratorio de Tecnología de Estructuras de la ETS de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona.

Los ensayos se realizan sobre seis vigas biapoyadas y sobre seis vigas continuas de dos vanos sometidas a carga puntual. Las vigas tienen secciones transversales cuadradas y rectangulares conformadas en frío y secciones en H laminadas. La campaña experimental incluye ensayos de caracterización del material considerando los efectos del conformado. La instrumentación de las vigas ensayadas permite medir flechas en distintos puntos de las vigas con transductores de desplazamiento, deformaciones mediante galgas extensométricas y reacciones en apoyos con células de carga.

Finalmente, se analizan los resultados experimentales comparándolos con los obtenidos de las recomendaciones de Eurocódigo 3, Parte 1-4 (1996) y con resultados obtenidos mediante la aplicación del código de análisis estructural Abaqus basado en el método de los elementos finitos (Hibbit et al., 1996).

El objetivo fundamental de la campaña experimental es estudiar el comportamiento a flexión de vigas de acero inoxidable y obtener flechas para diferentes niveles de carga, especialmente en condiciones de servicio. Además se analiza la evolución de las deformaciones y tensiones en las secciones transversales de las vigas, los efectos de la abolladura local y el ancho eficaz.

4.2.- CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL ENSAYADO.

4.2.1.- Geometría de las vigas.

Se ensayan vigas con tres tipos de perfiles diferentes: tubo cuadrados y rectangulares conformados en frío y secciones en H laminadas. Cada uno de estos perfiles se ensaya como viga biapoyada con carga puntual en centro luz y como viga continua con una carga puntual en cada vano, cerca de la sección central (Figura 4-1). Para poder garantizar un mínimo de fiabilidad de los resultados, todos los ensayos se realizan por duplicado, con lo que resultan un total de seis vigas biapoyadas y seis vigas continuas.

Las secciones transversales ensayadas son representativas de las usadas en la práctica. La longitud de las vigas analizadas es suficiente como para reproducir el comportamiento de viga con una relación canto/luz que se encuentra comprendida entre 1/20 y 1/25 para todas las vigas ensayadas.

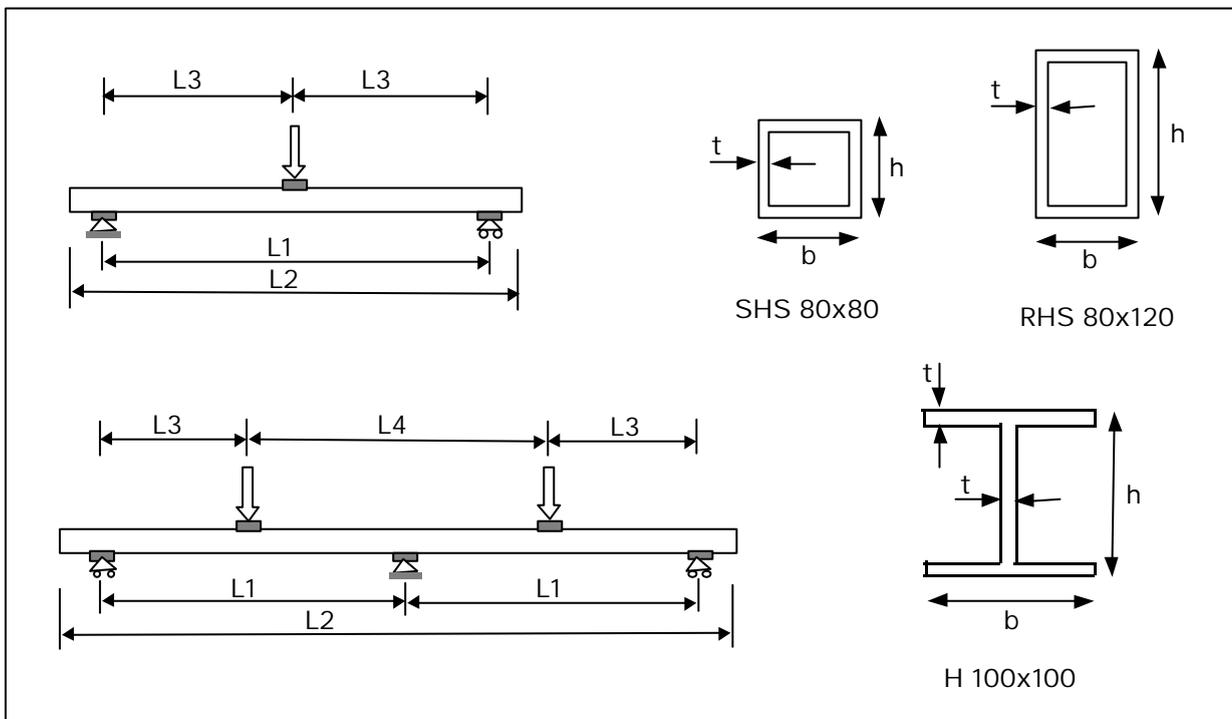


Figura 4-1. Secciones longitudinales y transversales de las vigas de acero inoxidable ensayadas.

Las principales características y dimensiones nominales de las secciones transversales de las vigas ensayadas se presentan en la Tabla 4-1. Los valores medidos no exceden a los nominales en más de un 0.5% en espesores y 1% en altos y anchos.

Tabla 4-1. Dimensiones de las vigas de acero inoxidable ensayadas.

Viga	Luz L1 (mm)	Longitud L2 (mm)	L3 (mm)	L4 (mm)	Canto h (mm)	Ancho b (mm)	Espesor t (mm)
SHS 80x80	1800	2000	900	-	80	80	3
RHS 80x120	2800	3000	1400	-	120	80	4
H 100x100	2400	2600	1200	-	100	100	8
SHS 80x80c	1800	3800	675	2250	80	80	3
RHS 80x120c	2800	5800	1675	2250	120	80	4
H 100x100c	2250	4700	1125	2250	100	100	8

4.2.2.- Propiedades del material acero inoxidable.

Para poder comparar los resultados experimentales con los resultados del modelo numérico y de las formulaciones analíticas, es necesario conocer las características del material acero inoxidable. Por este motivo, un primer paso ha sido caracterizar los tres perfiles tipos en el Laboratorio Metalúrgico de Acerinox.

Las secciones transversales de las probetas ensayadas son tubos cuadrados 80x80, tubos rectangulares 80x120 y secciones en H 100x100. Las probetas se obtienen de las caras en los perfiles tubulares y del alma en el perfil en H y se mecanizan de acuerdo con la norma ASTM-A 370 (1990). Los ensayos se realizan siguiendo las instrucciones de la norma ASTM-A 370 (1990) para el ensayo de tracción y la norma ASTM-E 111 (1990) para la determinación del módulo de deformación longitudinal inicial (módulo de Young).

En la Figura 4-2 se presentan las curvas tensión-deformación, resultado de estos ensayos, hasta las deformaciones máximas obtenidas (0.035 mm/mm). En el Anejo 1 de resultados obtenidos en la campaña experimental de vigas de acero inoxidable a flexión se presentan todos los resultados experimentales obtenidos en el Laboratorio Metalúrgico de Acerinox.

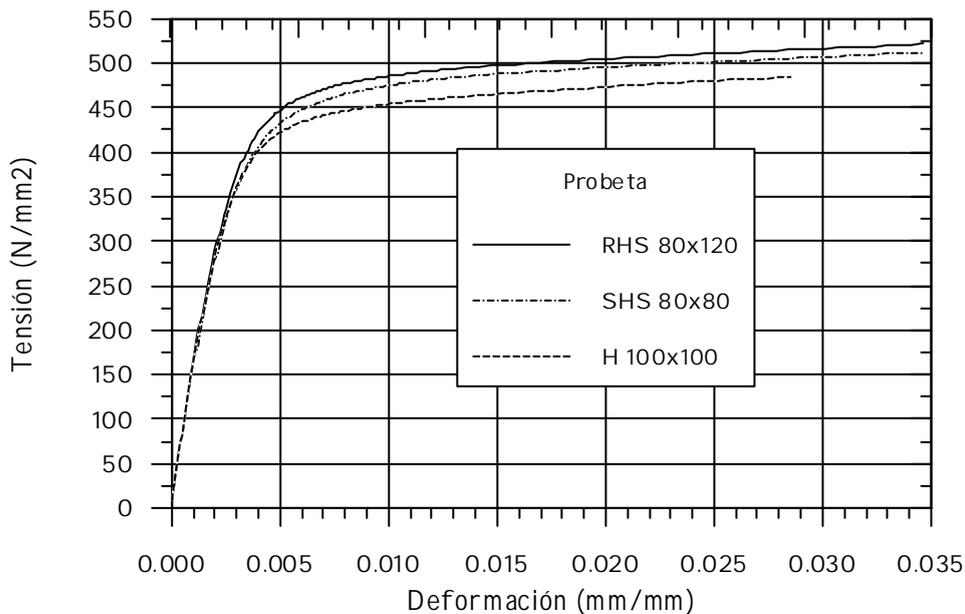


Figura 4-2. Curva tensión-deformación para las probetas ensayadas.

En la Tabla 4-2 se presentan las dimensiones de las probetas ensayadas así como las propiedades mecánicas de los aceros inoxidable utilizados (límite elástico, módulo de Young y resistencia a la tracción).

Tabla 4-2. Dimensiones de las probetas ensayadas y propiedades mecánicas de los aceros inoxidable utilizados en los ensayos.

Probeta ensayada	Tipo de acero	Ancho (mm)	Area (mm ²)	Long. (mm)	Espesor (mm)	f _y (N/mm ²)	E (kN/mm ²)	s _{max} (N/mm ²)
SHS80x80	304	12.54	35.75	50	2.85	422	165.57	658
RHS80x120	304	12.57	46.13	50	3.67	442	161.16	661
H100x100	304L	12.51	97.98	50	7.83	414	160.11	605

Cabe destacar que las diferencias entre los valores de las propiedades mecánicas obtenidas de los ensayos de las probetas y los valores propuestos por Eurocódigo 3, Parte 1-4 (1996), para chapas de material laminado en caliente, son realmente significativas. Según la normativa, para aceros S220 (AISI 304) debe tomarse un valor del límite elástico de f_y=220MPa y un módulo de elasticidad inicial de E=200000MPa. El valor del módulo de Young proporcionado por el fabricante es menor que el adoptado en Eurocódigo 3, Parte 1-4 (1996) y el valor del límite elástico obtenido experimentalmente es superior al propuesto en la norma para chapas de material laminado en caliente. Estas diferencias son debidas a la influencia que ejerce el trabajado en frío de la chapa y el conformado de la sección sobre las propiedades mecánicas del material. Por ello es siempre recomendable la realización de ensayos de caracterización del acero inoxidable.

En cualquier caso cabe destacar que existen ensayos de caracterización realizados por otros autores (Rasmussen y Hancock, 1993) sobre perfiles conformados con las mismas dimensiones que la probeta SHS 80x80, cuyos resultados son muy parecidos a los presentados en la Tabla 4-2.

La relación tensión-deformación del acero inoxidable es claramente no lineal. La mayoría de normativas permite representar la ecuación constitutiva del acero inoxidable mediante la fórmula de Ramberg-Osgood (Ec. [4-1]), con el fin de obtener una expresión analítica de dicha ecuación.

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E_0} + \epsilon_{py} \left(\frac{\sigma}{f_y} \right)^n \quad [4-1]$$

El valor de f_y es la tensión correspondiente al 0.2% de la deformación remanente, tensión ésta que se entiende como límite elástico convencional, dado que no existe un claro escalón de cedencia en la curva tensión-deformación del acero inoxidable.

Como ejemplo, la Figura 4-3 muestra la curva tensión-deformación obtenida del ensayo de la probeta del perfil de sección cuadrada SHS 80x80 (ensayo SHS 80x80) y la curva obtenida con la fórmula de Ramberg-Osgood propuesta por Eurocódigo 3, Parte 1-4 para productos planos (EC3, P1-4), así como la curva obtenida ajustando los valores de la fórmula de Ramberg-Osgood a los resultados experimentales (R-O Experimental).

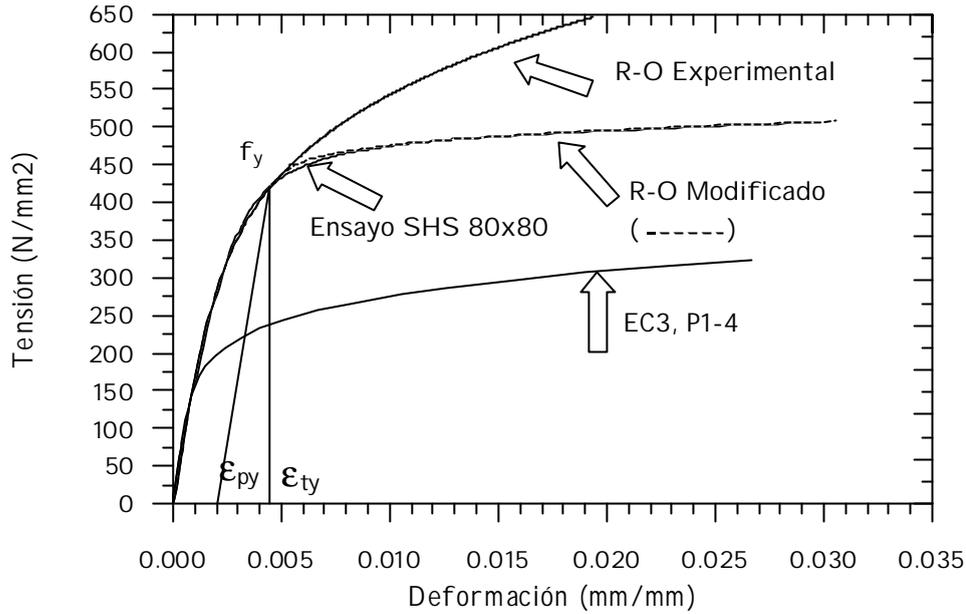


Figura 4-3. Curvas tensión-deformación para el acero inoxidable de la probeta SHS 80x80.

Como puede verse en la figura la correlación entre la curva tensión-deformación experimental y la fórmula de Ramberg-Osgood con los coeficientes ajustados de los resultados experimentales es buena para niveles de tensión inferiores al límite elástico (f_y). Sin embargo, no es tan buena para niveles de tensión mayores y es por ello por lo que, para este estudio, se ha obtenido una nueva fórmula (Ec. [4-2]), basada en la misma expresión de Ramberg-Osgood (Ec. [4-1]), para analizar el comportamiento a flexión de vigas de acero inoxidable cuando éstas se ven sometidas a tensiones normales superiores al límite elástico (R-O Modificado).

En el caso de que la tensión (σ) sea menor o igual al límite elástico (f_y), en el estudio se utiliza la fórmula de Ramberg-Osgood (Ec. [4-1]), ajustando los coeficientes n a los resultados experimentales obtenidos para las tres secciones de acero inoxidable analizadas ($n = 4.80$ para SHS 80x80, $n = 6.16$ para RHS 80x120 y $n = 6.37$ para H 100x100). El valor de la constante n se ha calculado ajustando la fórmula a la curva experimental para un valor del 0.05% de la deformación plástica. Se ha observado que, en este caso, usando dicho valor, en lugar del usual 0.01% propuesto por Euroinox (1994) y ANSI/ASCE-8-90 (1991), se obtiene una mejor aproximación de la fórmula a la curva experimental.

Para tensiones superiores al límite elástico, la relación σ - ϵ utilizada en el estudio es una expresión modificada de la fórmula de Ramberg-Osgood, basada en una traslación de los ejes de la fórmula original al punto de la curva correspondiente al límite elástico (Ec. [4-2]).

$$\epsilon = \frac{(\sigma - f_y)}{E_{0.2}} + \epsilon_{pu} \left(\frac{\sigma - f_y}{\sigma_u - f_y} \right)^n + \epsilon_{ty} \quad [4-2]$$

Por lo tanto, existe un paralelismo entre las expresiones [4-1] y [4-2]. En la ecuación [4-2], ϵ_{pu} es la deformación plástica de la tensión última, ϵ_{ty} y $E_{0.2}$ representan la deformación total y el módulo de elasticidad tangente, respectivamente, para el punto de la curva

correspondiente a una deformación plástica remanente del 0.2%. En este caso el valor de n se ajusta a los resultados experimentales de las tres secciones analizadas (n = 3.83 para SHS 80x80, n = 3.40 para RHS 80x120 y n = 2.98 para H 100x100), para niveles de tensión superiores al límite elástico.

En la Figura 4-3 se muestra también la curva resultante de aplicar esta modificación de la fórmula de Ramberg-Osgood (R-O Modificado), y se aprecia la buena correlación que presenta con los resultados experimentales. Por tanto, la utilización de la expresión [4-2] obtenida como expresión analítica de la ecuación constitutiva del acero inoxidable para tensiones superiores al límite elástico a partir de los ensayos de caracterización del material, permitirá modelizar de forma más realista el comportamiento del acero inoxidable utilizado para cualquier nivel de tensión.

4.2.3.- Clasificación de las secciones.

La capacidad resistente de una sección depende de la capacidad de cada uno de los elementos que la constituyen. Los elementos estructurales pueden verse afectados por el fenómeno de la abolladura que reduce su capacidad resistente.

Los elementos comprimidos de una sección transversal se clasifican en Clase 1, 2 o 3 en función de unas limitaciones especificadas en Eurocódigo 3, Parte 1-4 (1996) y aquellos elementos comprimidos que no verifican los criterios de Clase 3 se clasifican como Clase 4. Considerando estas limitaciones, es posible clasificar las secciones transversales de las vigas ensayadas.

Sección cuadrada SHS 80x80:

$$\varepsilon = \left[\frac{235}{f_y} \frac{E_0}{210.000} \right]^{0,5} = \left[\frac{235}{422} \frac{165.570}{210.000} \right]^{0,5} = 0,663$$

$$\text{Alma } \frac{d}{t_w} = \frac{71}{3} = 23,66 < 56,0 \quad \varepsilon = 37,1 \Rightarrow \text{Clase 1}$$

$$\text{Ala } \frac{b}{t_f} = \frac{80}{3} = 26,66 > 30,7 \quad \varepsilon = 20,35 \Rightarrow \text{Clase 4}$$

Sección rectangular RHS 80x120:

$$\varepsilon = \left[\frac{235}{442} \frac{161.160}{210.000} \right]^{0,5} = 0,639$$

$$\text{Alma } \frac{d}{t_w} = \frac{108}{4} = 27,0 < 56,0 \quad \varepsilon = 35,78 \Rightarrow \text{Clase 1}$$

$$\text{Ala } \frac{b}{t_f} = \frac{80}{4} = 20,0 > 30,7 \quad \varepsilon = 19,61 \Rightarrow \text{Clase 4}$$

Sección H 100x100:

$$\varepsilon = \left[\frac{235 \cdot 160.110}{414 \cdot 210.000} \right]^{0,5} = 0,658$$

$$\text{Alma } \frac{d}{t_w} = \frac{84}{8} = 10,5 < 56,0 \quad \varepsilon = 36,85 \Rightarrow \text{Clase 1}$$

$$\text{Ala } \frac{c}{t_f} = \frac{46}{8} = 5,75 < 9,0 \quad \varepsilon = 5,92 \Rightarrow \text{Clase 1}$$

Las alas de las secciones SHS 80x80 y RHS 80x120 son de Clase 4, con lo que en un principio sería necesario tener en cuenta los efectos de la abolladura local (sección eficaz) para calcular las flechas en vigas de acero inoxidable. Todos los demás elementos son de Clase 1.

Es muy importante destacar que el valor del límite elástico f_y influye significativamente en los límites usados para la clasificación de las secciones. Las especificaciones de diseño deberían proporcionar una clara explicación de cuál debe ser el límite elástico a considerar, en función del tipo de acero inoxidable, el tipo de material y su proceso de fabricación (laminado en caliente, laminado en frío) y la forma del elemento estructural (láminas y placas, o secciones conformadas por deformación plástica en frío).

4.2.4.- Predimensionamiento.

Previo a la realización de una campana experimental es necesario realizar un estudio preliminar del problema que se desea investigar para obtener de forma aproximada los resultados previsibles (cargas máximas, flechas, deformaciones, reacciones...) y poder preparar la instrumentación necesaria durante el ensayo.

Dicho estudio preliminar se realiza mediante la utilización del código de análisis estructural Abaqus basado en el método de los elementos finitos (Hibbit et al., 1996). Tal como se ha comentado en el capítulo anterior, dicho modelo numérico tiene en cuenta la no linealidad geométrica y la no linealidad del material considerando la ecuación constitutiva real del acero inoxidable utilizado, obtenida a partir de la información proporcionada por el fabricante. Las vigas se modelizan con elementos finitos tipo viga con lo que no se tienen en cuenta los efectos de la abolladura local, cosa que no resulta determinante ya que el objetivo principal del análisis se centra en estudiar cómo afecta la no linealidad del material a la determinación de flechas en vigas de acero inoxidable.

En total se elaboran seis modelos, uno para cada tipo de estructura a ensayar, de los que se determinan reacciones, flechas y cargas máximas esperadas que servirán de punto de partida para escoger la instrumentación adecuada. Los resultados derivados del modelo numérico se utilizarán además para comparar posteriormente con los resultados de los ensayos.

4.3.- INSTRUMENTACIÓN, EQUIPOS Y MATERIAL.

4.3.1.- Instrumentación de las vigas.

Para poder conocer el estado tensional de las vigas ensayadas con suficiente precisión, es necesario disponer una adecuada instrumentación. Dicha instrumentación consiste en una serie de galgas extensométricas unidireccionales y una serie de transductores de desplazamiento que permiten conocer las deformaciones y las flechas en diferentes secciones transversales de las vigas. Se colocan, además, células de carga en las secciones de apoyo de las vigas continuas para conocer las reacciones y controlar posibles desviaciones de la introducción de la carga durante el ensayo.

Galgas extensométricas

Las tensiones en un material no pueden medirse directamente, sino que deben obtenerse a partir de otros parámetros físicamente medibles. Por eso, un análisis experimental de tensiones requiere medir las deformaciones, así como otros parámetros del material para calcular las tensiones existentes bajo un determinado estado de carga. Las galgas extensométricas permiten medir dichas deformaciones basándose en la variación de resistencia de un conductor cuando es sometido a un esfuerzo mecánico, con lo que existe una relación lineal entre la resistencia del conductor y su deformación, cuya constante de proporcionalidad se denomina factor de galga.

El tipo de galgas extensométricas utilizado en un ensayo depende de varios factores, como son, entre otros, el material sobre el que se miden las deformaciones, el rango de deformaciones esperado, la precisión deseada y las direcciones de las deformaciones que se quieren medir.

En este caso, al tener que medir las deformaciones sobre acero inoxidable, el parámetro decisivo en el momento de escoger el tipo de galga fue la deformación máxima de la galga. En algunas secciones se esperaban deformaciones superiores al 3%, con lo que se escogió una galga capaz de medir deformaciones más allá del límite elástico, pudiendo llegar a medir deformaciones de hasta el 20%. En la Tabla 4-3, se presentan las características técnicas de las galgas escogidas.

Tabla 4-3. Características técnicas de las galgas.

Longitud (mm)	Resistencia W	Factor de galga k	Sensibilidad transversal	Límite de deformación %	Rango de temperaturas °C
6.35	120 ±0.15%	2.055±0.5%	(+0.9±0.2)%	±20	-45 ÷ +95

En todas las secciones se dispusieron galgas unidireccionales, ya que el comportamiento de las estructuras ensayadas es un comportamiento de viga en el que las tensiones principales son longitudinales.

Otro parámetro importante es el adhesivo utilizado para la unión de la galga a la viga. En nuestro caso, para poder medir con precisión deformaciones de hasta el 10%, se decidió, bajo consejo del fabricante, utilizar un adhesivo de resina epoxi de dos componentes de endurecimiento en caliente. Lógicamente, la utilización de este tipo de adhesivo exige la

aplicación de un sistema de presión sobre la galga y un sistema de calentamiento. En la Figura 4-4 puede observarse el tratamiento térmico aplicado sobre tres de las vigas ensayadas.



Figura 4-4. Aplicación del tratamiento térmico al adhesivo.

Una vez terminado el proceso de calentamiento de las galgas se apreció que, debido a problemas con el adhesivo, algunas galgas no habían quedado bien adheridas a la viga. Como la operación de calentamiento se hacía viga por viga resultaba imposible repetir el proceso térmico en las galgas mal adheridas, por lo que se decidió sustituir dichas galgas por otras pegadas con un adhesivo más operativo, de un único componente como es el cianocrilato. Posteriormente se comprobó la eficacia de este adhesivo, con lo que se decidió pegar todas las galgas de las tres últimas vigas con cianocrilato sin que se apreciaran diferencias en los resultados de estas galgas al compararlas con las galgas anteriores.

Transductores de desplazamiento

Los transductores son dispositivos que se utilizan para medidas de desplazamientos y que convierten una señal física de entrada, como por ejemplo una variación de posición, en una salida de tipo eléctrico.

En este caso, el tipo de transductor utilizado se conoce con las siglas ldt (Linear Displacement Transducer) y basa su funcionamiento en medidas magnostriectivas. Los transductores utilizados para la sección de máxima flecha tienen un rango de medida de 0 a 300 mm, y los utilizados en los demás puntos tienen un rango de 0 a 100 mm de desplazamiento.

Células de carga

Se colocan además células de carga bajo las secciones de apoyo de las vigas continuas para conocer las reacciones y poder controlar posibles desviaciones de la aplicación de la carga durante el ensayo. En las vigas biapoyadas las reacciones se obtienen directamente por equilibrio estático, con lo que no es necesario utilizar células de carga.

La carga máxima a la que se prevé llegar en los apoyos es de 170 kN, con lo que se utilizan células con una capacidad máxima de 200kN.

Disposición de la instrumentación

La Figura 4-5 muestra un esquema general de la localización de las galgas extensométricas, los transductores de desplazamiento y las células de carga en las vigas ensayadas.

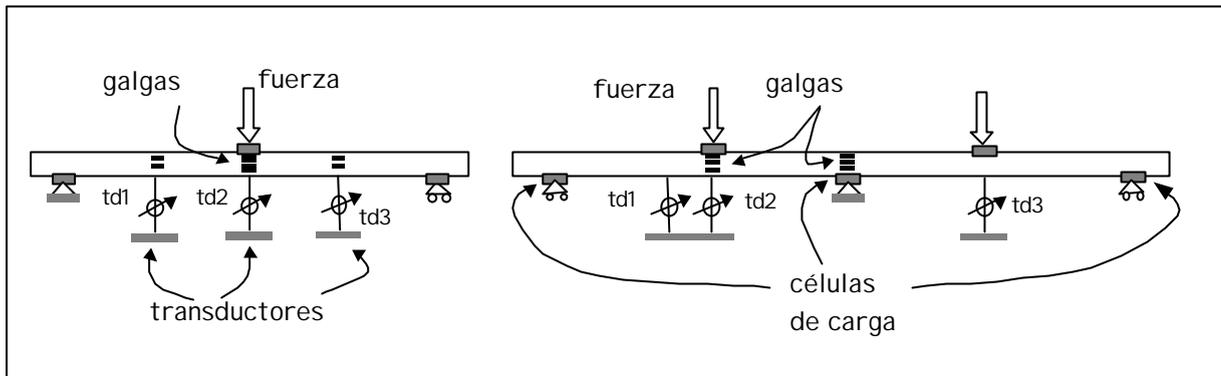


Figura 4-5. Esquema de instrumentación de las vigas ensayadas.

Las tres primeras vigas biapoyadas ensayadas se instrumentaron con un mayor número de elementos de medida de manera que, en base a los resultados obtenidos, se pudiera realizar una nueva instrumentación más eficaz en las restantes. Se dispusieron galgas en las tres secciones más representativas del comportamiento de la viga: la sección central, que será donde se obtendrán tensiones mayores, y las dos secciones a $L/4$ para controlar la simetría del ensayo. En cada sección se colocaron tres galgas en las alas y tres en el alma.

A la vista de los resultados de la primera serie de ensayos, se modificó la instrumentación, dejando solamente dos galgas en una sección a $L/4$ e incrementando la instrumentación en la sección central para obtener más información sobre la inestabilidad local que se produce en dicha sección. Las vigas continuas se instrumentaron en las secciones de aplicación de la carga y en la sección del apoyo intermedio.

Los transductores de desplazamiento se sitúan en la sección de centro luz y a $L/4$ en las vigas biapoyadas. En las vigas continuas se colocan también tres transductores, uno en centro de luz de un vano y los otros dos bajo las dos cargas aplicadas. En las Figura 4-6 y 4-7 se presentan, a modo de ejemplo, la viga biapoyada de acero inoxidable SHS 80x80-1 y la viga continua SHS 80x80c-1 durante el ensayo.



Figura 4-6. Vista de la viga de acero inoxidable SHS 80x80-1.



Figura 4-7. Vista de la viga de acero inoxidable SHS 80x80c-1.

En el Anejo 1 de resultados obtenidos en la campaña experimental de vigas de acero inoxidable a flexión, se puede observar un esquema detallado de la instrumentación en cada viga.

4.3.2.- Diseño de los ensayos.

Aparatos de apoyo

En referencia a los aparatos de apoyo, se utiliza para las vigas biapoyadas un apoyo fijo y otro móvil, y para las vigas continuas, dos aparatos de apoyo móviles en los extremos y uno fijo en el centro, asegurando así la simetría. Para conseguir una estabilidad suficiente, se dispone todo el conjunto (vigas-soportes-células) sobre unos caballetes regulables. Sobre estos caballetes, se sueldan soportes de horquilla que ofrecen una coacción lateral, evitando así el giro de las vigas alrededor de su propio eje y reduciendo la posibilidad de inestabilidad por pandeo lateral en las vigas con sección transversal en H. En la Figura 4-8 puede verse un detalle del sistema de apoyo descrito.

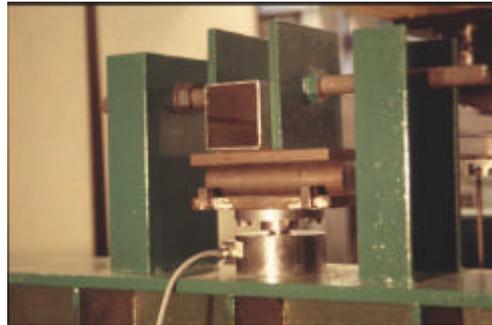


Figura 4-8. Aparato de apoyo móvil, apoyo de horquilla y célula de carga.

Viga cargadero

Para poder aplicar la carga en los dos tramos de las vigas continuas se necesita acoplar una viga a la cabeza del pistón. La viga utilizada está formada por dos perfiles UPN 300 unidos tal y como se muestra en la Figura 4-9. Esta viga tiene capacidad suficiente como para resistir las cargas a las que se verá sometida.

Con el fin de agilizar los ensayos se usó la misma viga cargadero para todas las vigas continuas, con lo que los puntos de aplicación de la carga se mantienen siempre constantes a la misma distancia.

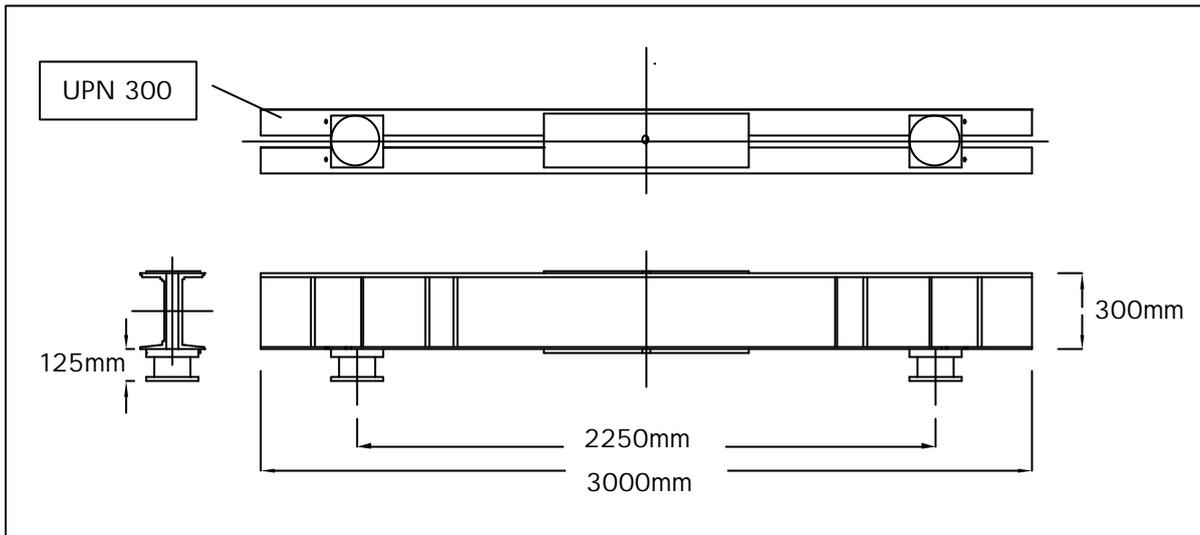


Figura 4-9. Detalle de la viga cargadero.

4.3.3.- Instalación, prensa y sistema de adquisición de datos.

Los ensayos se llevaron a cabo utilizando un actuador acoplado a un pórtico de carga mediante una rótula tridimensional. El pistón tiene una capacidad máxima de carga estática de 1000 kN y está gobernado por un servocontrol analógico que permite la programación del proceso de carga mediante la introducción de sucesivas rampas de carga. Básicamente existen dos maneras de gobernar la prensa; una controlando la posición del pistón y otra controlando la carga aplicada. En este caso se ha utilizado el control de desplazamiento, que fija la posición del pistón a partir de una velocidad de desplazamiento independiente de la carga. Este método es más seguro, ya que se evita un exceso de carga que podría producir una rotura brusca de la viga y además permite recoger experimentalmente fenómenos plásticos y respuestas estructurales dúctiles.

En la figura siguiente se observa una foto general de uno de los ensayos.

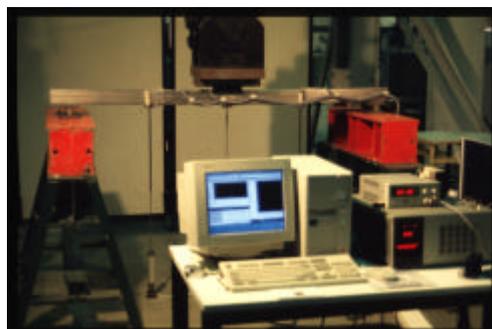


Figura 4-10. Vista general de los ensayos.

Todos los datos generados durante los ensayos (instrumentación de las vigas, carga y posición del pistón de la prensa) son recogidos por un ordenador personal para su posterior análisis. En la Figura 4-11 se presenta un esquema general de las conexiones realizadas para la adquisición de los datos generados.

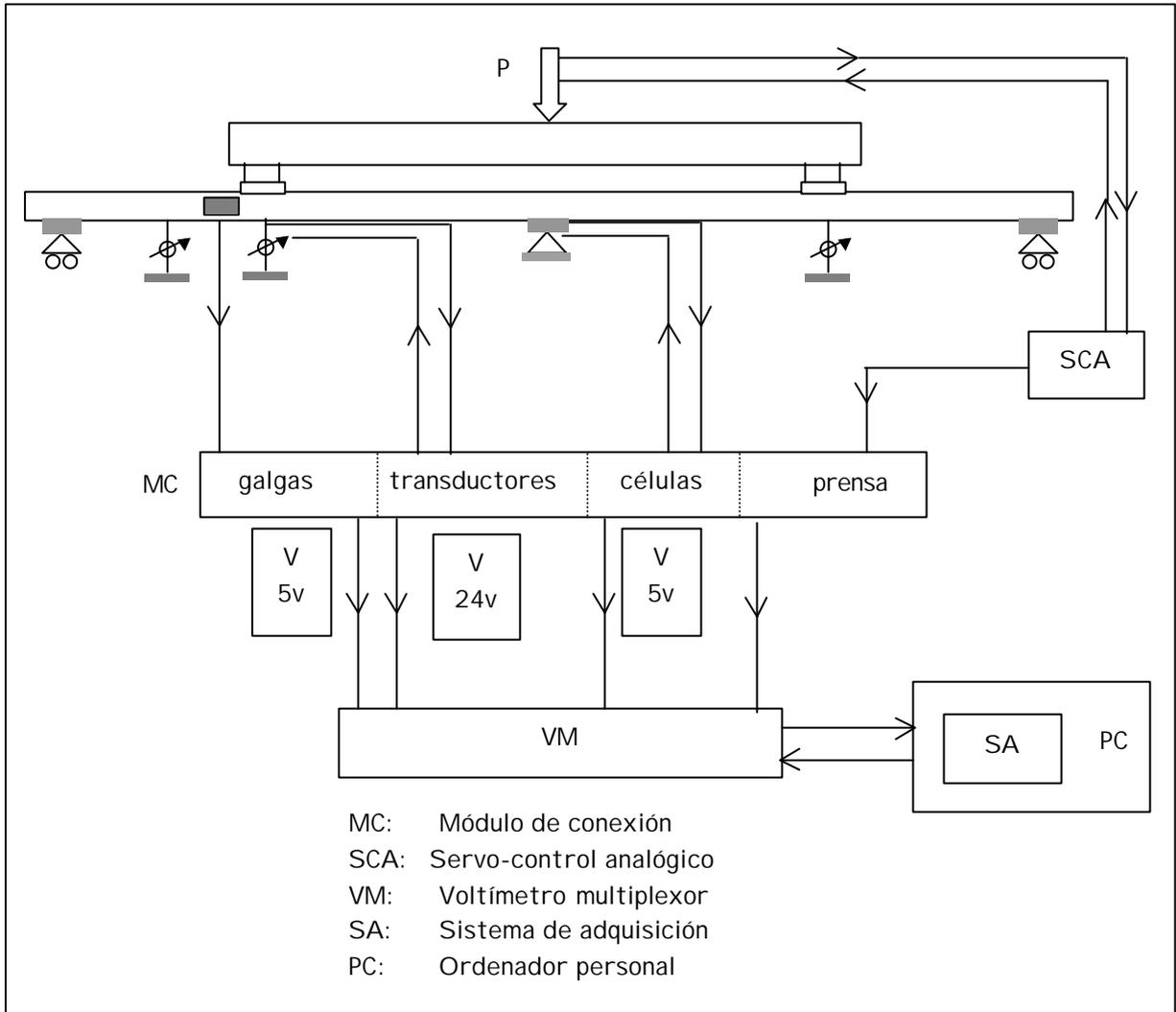


Figura 4-11. Esquema general de conexiones.

Las galgas, los transductores de desplazamiento y las células de carga se conectan a un módulo de conexión y a unas fuentes de alimentación. Las salidas de carga y posición del pistón de la prensa se conectan también a dicho módulo.

Las señales de voltaje recibidas por el módulo se transforman a señales digitales a través del voltímetro multiplexor que selecciona uno a uno los canales de entrada según la secuencia de órdenes que recibe del sistema de adquisición y envía la lectura al ordenador personal.

4.4.- RESULTADOS EXPERIMENTALES.

En este apartado se presentan algunos de los numerosos resultados experimentales que se obtuvieron durante la campaña de ensayos. Los resultados obtenidos se presentan en forma de

curvas carga-flecha y carga-deformación. En el Anejo 1 de resultados obtenidos en la campaña experimental de vigas de acero inoxidable a flexión se presenta la información más interesante relativa a los ensayos de todas las vigas. Los resultados completos de la campaña experimental pueden encontrarse en Mirambell et al. (1998).

4.4.1.- Transductores de desplazamiento.

La Figura 4-12a muestra las curvas carga-desplazamiento obtenidas experimentalmente en los transductores 1 y 3 situados a L/4 y el transductor 2 situado en centro de luz para la viga biapoyada SHS 80x80-1.

Las flechas obtenidas experimentalmente se comparan más adelante con otros resultados de flechas obtenidos mediante métodos analíticos y numéricos.

4.4.2.- Galgas extensométricas.

En la Figura 4-12b se presentan las curvas carga-deformación correspondientes a las galgas situadas en el alma de la sección central de la viga SHS 80x80-1. La información proporcionada por las galgas se analiza más adelante con el fin de estudiar la evolución de las tensiones a lo largo de la viga y los efectos de la abolladura local y el ancho eficaz.

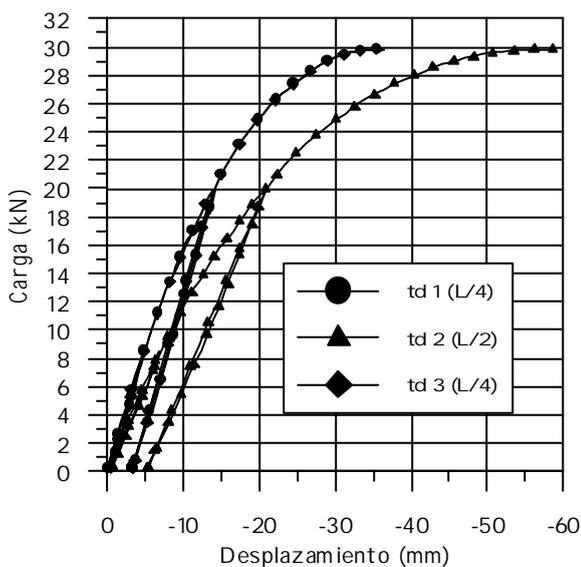


Figura 4-12a. Curvas carga-desplazamiento en los transductores de la viga biapoyada SHS 80x80-1.

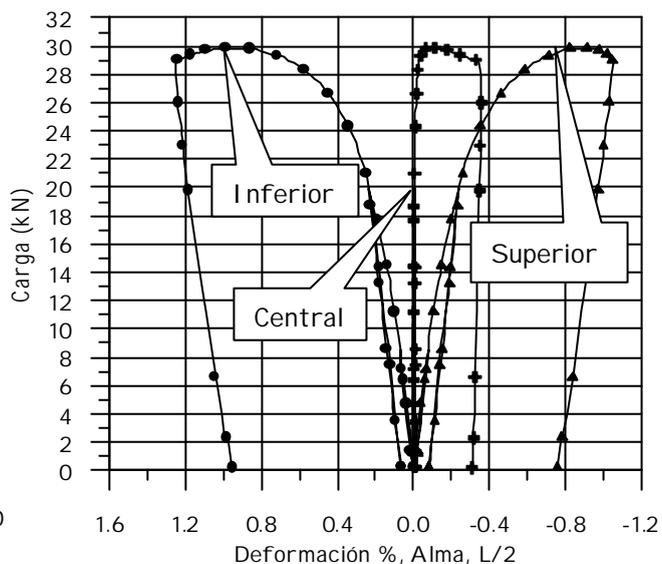


Figura 4-12b. Curvas carga-deformación en las galgas del alma de la sección central de la viga biapoyada SHS 80x80-1.

Del análisis de las curvas experimentales de la Figura 4-12 pueden extraerse algunas conclusiones parciales. Al principio del ensayo, la no linealidad del material no es tan significativa como al final del mismo, en situación de rotura. Por otra parte, se ha procedido a un proceso de carga y descarga durante el ensayo, observándose que el comportamiento a flexión de la viga durante este proceso es perfectamente lineal, siendo la pendiente de dicha rama prácticamente igual a la pendiente inicial de la curva carga-desplazamiento.

4.4.3.- Células de carga.

La Figura 4-13 muestra los valores medidos por las células de carga durante el ensayo de la viga continua SHS 80x80c-1.

En esta figura se aprecia la simetría del ensayo, ya que las células 1 y 3 midieron los mismos valores de carga, y se aprecia también la concordancia entre la suma de reacciones (Cel 1+2+3) y la carga aplicada (Pistón).

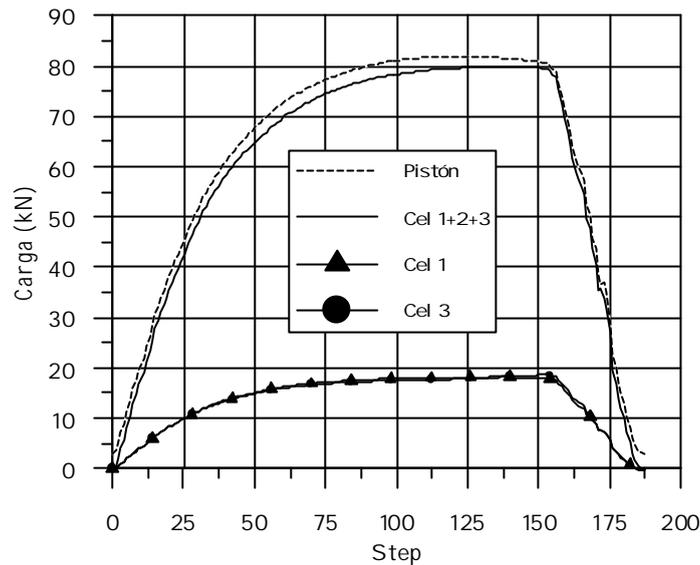


Figura 4-13. Valores de carga medidos por las células de carga durante el ensayo de la viga continua SHS 80x80c-1.

4.5.- ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES.

4.5.1.- Transductores de desplazamiento.

Las flechas experimentales se han medido con transductores de desplazamiento en todas las vigas ensayadas y se comparan con las flechas calculadas según los métodos propuestos por Eurocódigo 3, Parte 1-4 y con las flechas obtenidas a partir de la aplicación de un modelo numérico basado en el método de los elementos finitos.

Método de Eurocódigo 3, Parte 1-4

Según Eurocódigo 3, Parte 1-4, para el cálculo de flechas en vigas de acero inoxidable, deben tenerse en cuenta los efectos de la no linealidad de la ecuación constitutiva del acero inoxidable y la eficacia de la sección transversal. Las flechas se calculan utilizando el módulo de elasticidad secante determinado a partir de las máximas tensiones de tracción y compresión en el elemento estudiado bajo la combinación de acciones más relevante en el estado límite de servicio. Como simplificación, Eurocódigo permite despreciar la variación de dicho módulo de elasticidad a lo largo del elemento y usar el mínimo valor de E_s , correspondiente a la sección de máxima tensión.

Con el fin de poder evaluar los efectos de la no linealidad y de la eficacia de la sección transversal, se han realizado cuatro cálculos distintos para cada viga biapoyada tal y como se indica a continuación:

EC3 (1): Determinación de la flecha despreciando la variación del módulo de elasticidad a lo largo de la longitud del elemento y considerando la sección transversal eficaz y la tensión máxima para calcular el módulo de elasticidad secante (E_s).

$$P \Leftrightarrow M = \frac{Pl}{4} \Leftrightarrow S = \frac{M}{W} \Leftrightarrow b_{\text{eff}} \Leftrightarrow \sigma \Leftrightarrow \varepsilon \Leftrightarrow E_s = \frac{S}{e} \Leftrightarrow d = \frac{Pl^3}{48E_s I_{\text{eff}}}$$

EC3 (2): Determinación de la flecha despreciando la variación del módulo de elasticidad a lo largo de la longitud del elemento y considerando la sección transversal total y la tensión máxima para calcular el módulo de elasticidad secante (E_s).

$$P \Leftrightarrow M = \frac{Pl}{4} \Leftrightarrow S = \frac{M}{W} \Leftrightarrow \varepsilon \Leftrightarrow E_s = \frac{S}{e} \Leftrightarrow d = \frac{Pl^3}{48E_s I}$$

EC3 (3): Determinación de la flecha considerando la variación del módulo de elasticidad a lo largo de la longitud del elemento y la sección transversal eficaz.

$$P \Leftrightarrow M = M(x) \Leftrightarrow S(x) = \frac{M(x)}{W(x)} \Leftrightarrow b_{\text{eff}}(x) \Leftrightarrow S(x) \Leftrightarrow e(x) \Leftrightarrow E_s(x) = \frac{S(x)}{e(x)} \Leftrightarrow d = \int_0^{l/2} \frac{M(x) * x}{E_s(x) * I_{\text{eff}}(x)} dx$$

EC3 (4): Determinación de la flecha considerando la variación del módulo de elasticidad a lo largo de la longitud del elemento y la sección transversal total.

$$P \Leftrightarrow M = M(x) \Leftrightarrow S(x) = \frac{M(x)}{W} \Leftrightarrow e(x) \Leftrightarrow E_s(x) = \frac{S(x)}{e(x)} \Leftrightarrow d = \int_0^{l/2} \frac{M(x) * x}{E_s(x) * I(x)} dx$$

Para las vigas continuas se han realizado seis cálculos distintos para la determinación de flechas:

EC3 (1): Determinación de la flecha despreciando la variación del módulo de elasticidad a lo largo de la longitud del elemento, considerando para E_s el valor correspondiente a la sección de apoyo intermedio y la sección transversal eficaz.

EC3 (2): Determinación de la flecha despreciando la variación del módulo de elasticidad a lo largo de la longitud del elemento, considerando para E_s el valor correspondiente a la sección de apoyo intermedio y la sección transversal total.

EC3 (3): Determinación de la flecha despreciando la variación del módulo de elasticidad a lo largo de la longitud del elemento, considerando para E_s el valor correspondiente a la sección de aplicación de la carga y la sección transversal eficaz.

EC3 (4): Determinación de la flecha despreciando la variación del módulo de elasticidad a lo largo de la longitud del elemento, considerando para E_s el valor correspondiente a la sección de aplicación de la carga y la sección transversal total.

EC3 (5): Determinación de la flecha considerando la variación del módulo de elasticidad a lo largo de la longitud del elemento y la sección transversal eficaz. En este caso se considera la redistribución de tensiones internas debida a los efectos de la no linealidad del material

EC3 (6): Determinación de la flecha considerando la variación del módulo de elasticidad a lo largo de la longitud del elemento y la sección transversal total. En este caso se considera la redistribución de tensiones internas debida a los efectos de la no linealidad del material

Para la realización de todos los cálculos se han desarrollado programas de cálculo de estructuras que tienen en cuenta la no linealidad del material.

Modelo numérico

Tal y como ya se ha comentado anteriormente, en este estudio se ha utilizado un código de análisis estructural Abaqus basado en el método de los elementos finitos (Hibbit et al., 1996) para modelizar el comportamiento de las vigas ensayadas considerando los efectos de la no linealidad del material. Las vigas ensayadas se modelizan con elementos finitos tipo viga, no considerando por tanto en el modelo numérico los efectos de la abolladura.

Usando coeficientes de ajuste

Rasmussen y Hancock (1993) presentan un método aproximado para calcular de manera sencilla las flechas en vigas de acero inoxidable con sección tubular. El método incorpora, en el procedimiento descrito anteriormente, un coeficiente k_σ por el que se multiplica la tensión máxima. El coeficiente propuesto vale $k_\sigma=2/3$ para vigas biapoyadas y $k_\sigma=1/2$ para vigas continuas de acero inoxidable con sección tubular cuadrada (SHS). Los resultados derivados de la aplicación de este procedimiento también se comparan con los resultados derivados de los otros métodos.

Análisis comparativo de las flechas calculadas

a) Vigas biapoyadas

En primer lugar se analizan los resultados obtenidos, según los métodos anteriormente descritos, para las vigas de acero inoxidable biapoyadas. La Figura 4-14a muestra las curvas carga-flecha de la viga biapoyada SHS 80x80 calculadas según Eurocódigo 3, Parte 1-4 y los resultados de la curva experimental de la viga SHS 80x80-1. En esta figura, la recta horizontal (Límite Elástico) marca el valor de la carga para el cual, mediante un cálculo lineal elástico, la tensión en la fibra más solicitada alcanza el valor del límite elástico.

Comparando las curvas EC3 (1)-EC3 (2) y EC3 (3)-EC3 (4), se aprecia una gran diferencia en cuanto al uso de la sección eficaz. Lógicamente el efecto es importante dado que nos encontramos en presencia de una sección Clase 4.

Comparando las curvas EC3 (1,2)-EC3 (3,4), se aprecia la diferencia entre adoptar un único módulo de elasticidad secante correspondiente al valor de la máxima tensión o en adoptar el módulo de elasticidad correspondiente a cada sección. En el primer caso hay un aumento de flecha respecto a los resultados experimentales para niveles de tensión inferiores al límite elástico. En el segundo caso, las flechas obtenidas analíticamente son comparables a las experimentales, incluso para niveles de tensión algo superiores al límite elástico.

Parece claro que la curva EC3 (3), que tiene en cuenta la sección eficaz y la variación de límite elástico secante a lo largo de la viga, es la más adecuada para comparar con los resultados experimentales, con los derivados de la aplicación del modelo numérico y con los resultados obtenidos con la aplicación de coeficientes de ajuste del método de Rasmussen y Hancock. No obstante, se estudiará también la curva EC3 (1), ya que corresponde a un cálculo sencillo y conservador, también generalmente aceptado por las normativas. (Figura 4-14b)

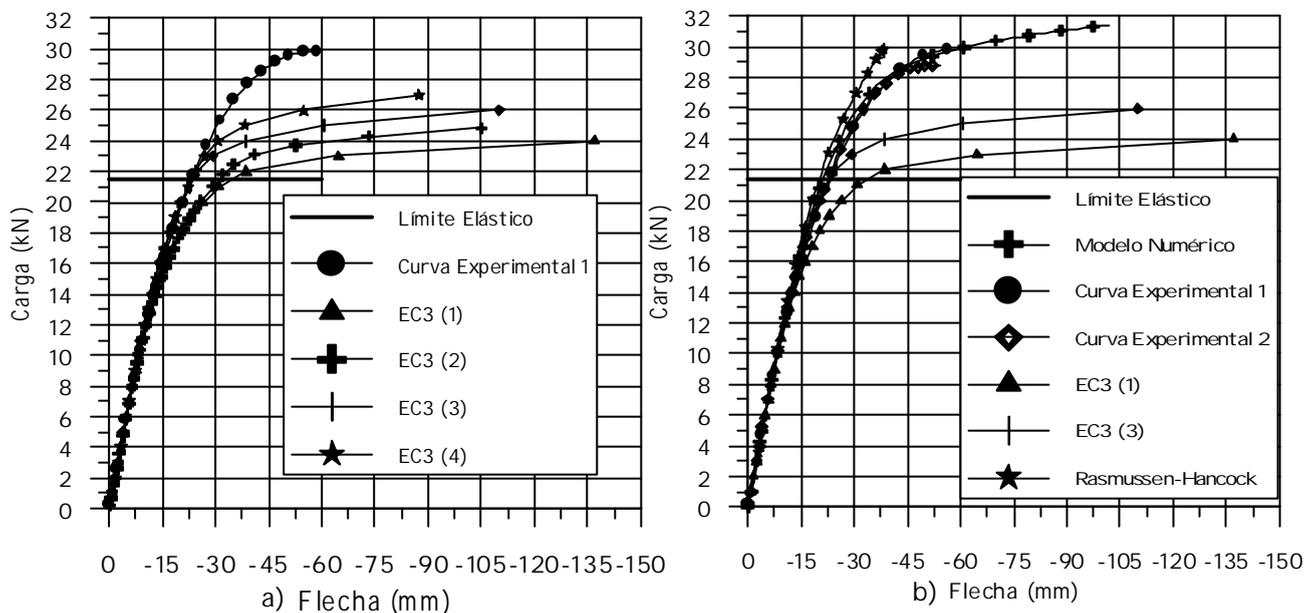


Figura 4-14. Curvas carga-flecha de la viga biapoyada SHS 80x80.

En esta figura puede verse la buena relación existente entre los resultados del modelo numérico y los experimentales. Las pequeñas diferencias que se aprecian son debidas al hecho de que el elemento usado en el modelo numérico es un elemento de viga que no tiene en cuenta los efectos de la abolladura local. Por otro lado, el método propuesto por Rasmussen y Hancock aproxima muy bien la flecha a la obtenida experimentalmente, incluso para niveles de carga superiores al límite elástico.

En relación con los resultados obtenidos con Eurocódigo 3, Parte 1-4, puede destacarse que la curva EC3 (1), obtenida con el mínimo valor del módulo de elasticidad secante, se ajusta a los resultados experimentales para valores de tensión inferiores al 60% del límite elástico, mientras que para niveles de tensión cercanos al límite elástico, las diferencias pueden ser importantes.

La curva EC3 (3), en la que se tiene en cuenta la variación del módulo de elasticidad a lo largo del elemento, se ajusta a los resultados experimentales hasta el límite elástico. Las diferencias más allá del límite elástico son debidas a que no se ha considerado la variación del módulo de elasticidad secante a través de la sección transversal.

Para la viga biapoyada RHS 80x120 (Figura 4-15) los resultados son muy parecidos a los presentados para la viga SHS 80x80. Sin embargo, en este caso, la consideración del ancho eficaz en el cálculo de flechas es menos importante dado que el espesor de ala es ahora de 4 mm en lugar de 3 mm y la sección está justo en el límite entre Clase 3 y Clase 4.

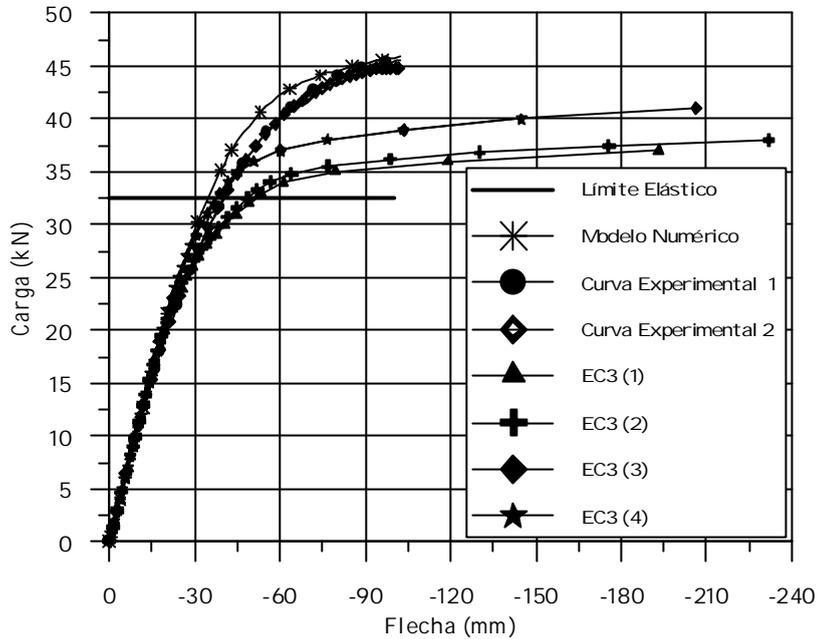


Figura 4-15. Curvas carga-flecha de la viga biapoyada RHS 80x120.

Para la viga biapoyada H 100x100 (Figura 4-16) se obtuvieron resultados similares. Aunque en este caso cabe señalar que el agotamiento de las piezas en los experimentos fue debido a pandeo lateral. El modelo numérico también predecía dicha forma de colapso. No obstante, se apreció una diferencia entre los valores de la carga para los cuales la pieza colapsaba experimentalmente y según el modelo numérico. Dicha diferencia es debida a que las condiciones reales del ensayo (viga, apoyos y pistón) ofrecían una coacción mayor al pandeo lateral que la considerada en el modelo numérico.

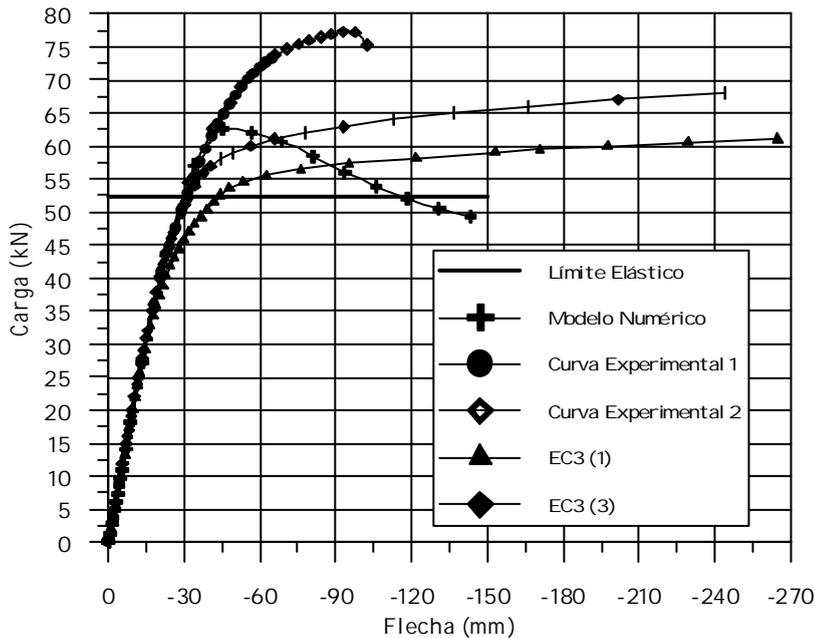


Figura 4-16. Curvas carga-flecha de la viga biapoyada H 100x100.

En la Figura 4-17 se presenta una fotografía de una de las vigas ensayadas después de que ocurriera el pandeo lateral.



Figura 4-17. Pandeo lateral de la viga biapoyada H 100x100.

b) Vigas continuas

A continuación se presentan los resultados de las flechas obtenidas para las vigas continuas. En primer lugar, la Figura 4-18 muestra las curvas carga-flecha de la viga SHS 80x80c. En la Figura 4-18a se presentan las curvas EC3 (3) y EC3 (4) calculadas según Eurocódigo 3 considerando, para los cálculos del módulo de elasticidad secante, el valor de la tensión en la sección de aplicación de la carga. Esta sección es la sección de momento máximo positivo ($M=313 \cdot P$). Las curvas EC3 (5) y EC3 (6) se han obtenido considerando la variación del módulo de elasticidad a lo largo de la viga y la redistribución de momentos. Las curvas EC3 (3, 5) han sido obtenidas considerando la sección eficaz y las curvas EC3 (4, 6) considerando la sección total.

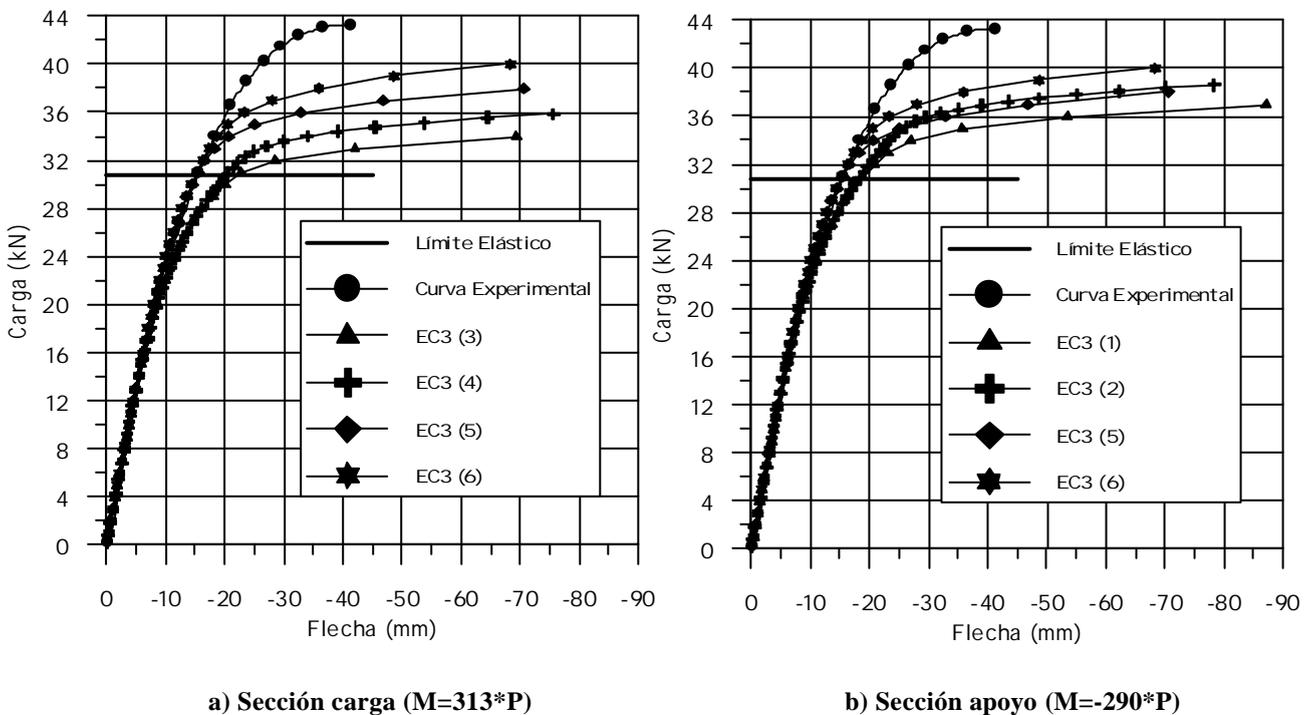


Figura 4-18. Curvas carga-flecha de la viga continua SHS 80x80c.

Además se presentan, en la Figura 4-18b, las curvas obtenidas al considerar la tensión en la sección de apoyo intermedio para calcular el módulo de elasticidad secante. La sección de apoyo intermedio corresponde a la sección de máximo momento negativo ($M=-290 \cdot P$).

En esta figura se aprecia la importancia que tiene el módulo de elasticidad secante utilizado para el cálculo de flechas en vigas de acero inoxidable. En primer lugar, existe una diferencia apreciable entre asumir un único valor de E_s para toda la viga o considerar su variación a lo largo del elemento. Y en segundo lugar, si se adopta un único valor del módulo de elasticidad secante, existen diferencias en los resultados en función de cual sea el valor de E_s escogido para representar el comportamiento de toda la viga.

En este caso el valor correspondiente a la sección más solicitada (sección de máximo momento positivo) proporciona flechas mayores que si se utiliza el valor de E_s de la sección de apoyo intermedio, cuyo valor resulta ser más representativo del comportamiento general de la viga.

La Figura 4-19 muestra las curvas carga-flecha de la viga continua SHS 80x80c obtenidas con la aplicación del modelo numérico y con la utilización de los coeficientes de ajuste del método de Rasmussen y Hancock, en comparación con las curvas experimentales y con las curvas EC3 (1), EC3 (3) y EC3 (5) resultado de la aplicación de Eurocódigo 3.

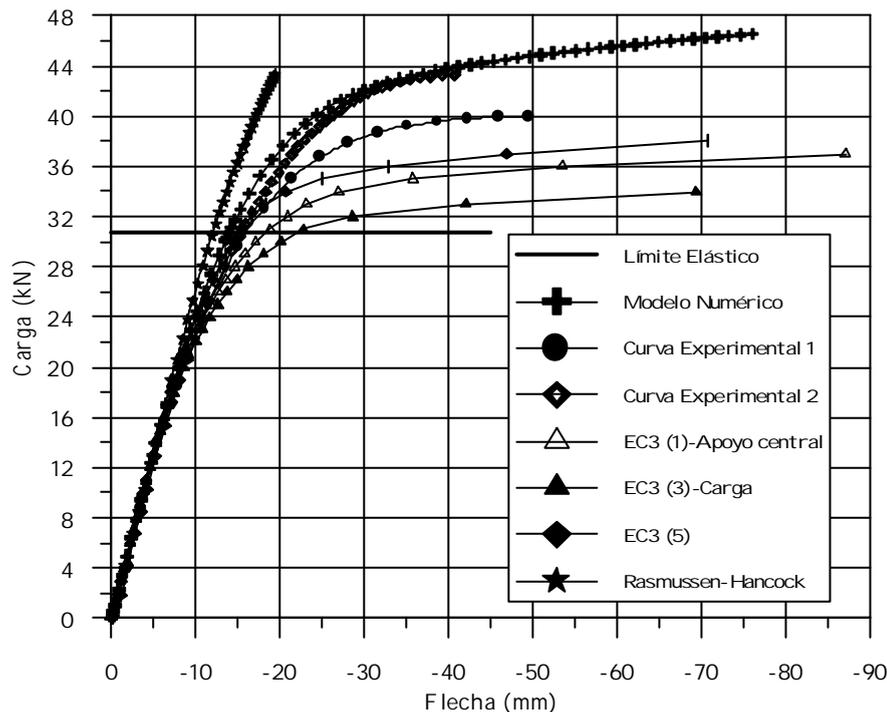


Figura 4-19. Curvas carga-flecha de la viga continua SHS 80x80c.

La diferencia entre las curvas experimentales se debe a que en el ensayo de la primera viga continua SHS 80X80 se colocó un neopreno sin zunchar debajo del neopreno zunchado que se utilizaba para la aplicación de la carga. La colocación de dicho neopreno sin zunchar hizo que fueran más evidentes los efectos de la abolladura local con la consecuente pérdida de canto en las secciones de aplicación de carga del primer ensayo.

Tal y como ocurre con las vigas biapoyadas, los resultados del modelo numérico son muy parecidos a los de los ensayos. Para niveles de tensión superiores al límite elástico se observan pequeñas diferencias debidas a los efectos de la abolladura local, que no se consideran en el análisis numérico. Los resultados del método propuesto por Rasmussen y Hancock en este caso proporcionan flechas algo menores que las experimentales, con lo que en este caso quedaría del lado de la inseguridad aunque seguramente es debido a que para vigas continuas con este estado de cargas el coeficiente utilizado debería ser otro. En el próximo capítulo se analiza la posibilidad de utilizar coeficientes de ajuste para el cálculo de flechas en vigas de acero inoxidable. En relación con los métodos propuestos por Eurocódigo 3, Parte 1-4, puede decirse que los métodos que consideran la variación del módulo de elasticidad proporcionan resultados más parecidos a los experimentales.

Sin embargo, para la viga continua RHS 80x120 (Figura 4-20), la tensión normal en el apoyo intermedio ($M=-538*P$) es significativamente mayor que la correspondiente a la sección de aplicación de la carga ($M=351*P$). Las luces y las posiciones de aplicación de la carga son distintas para cada una de las vigas continuas. En este caso, los resultados de flechas son sobrestimados cuando se utiliza el módulo de elasticidad secante correspondiente a la sección transversal sometida a la máxima tensión normal (sección de apoyo).

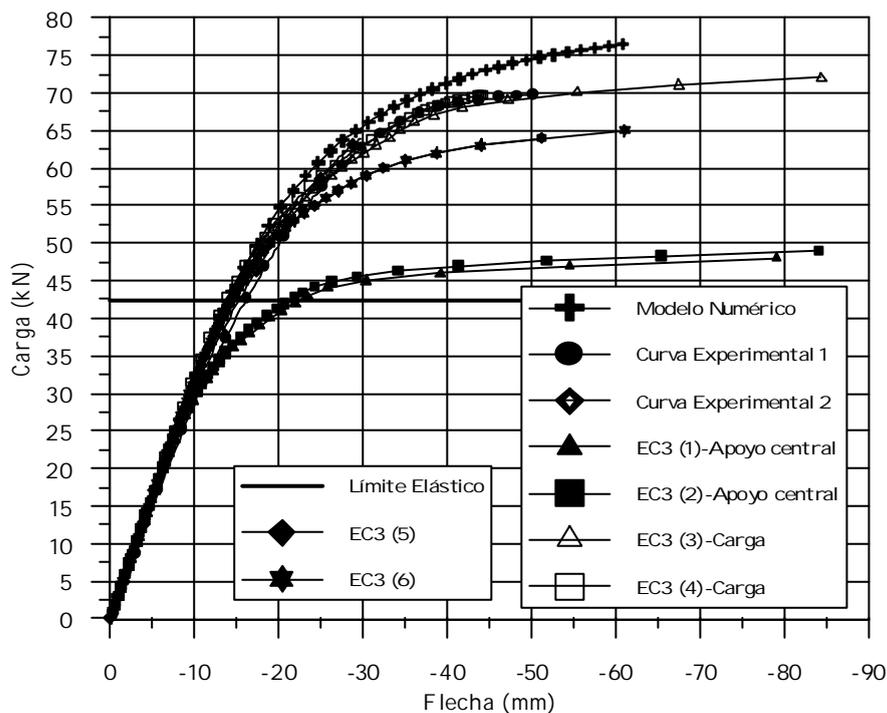


Figura 4-20. Curvas carga-flecha de la viga continua RHS 80x120c.

Para la viga continua H 100x100 los resultados son muy similares (Figura 4-21). El fallo de la primera viga ensayada se produjo por pandeo lateral, como en las vigas biapoyadas. Para la segunda viga continua se paró el ensayo antes de que se produjera el fenómeno del pandeo lateral.

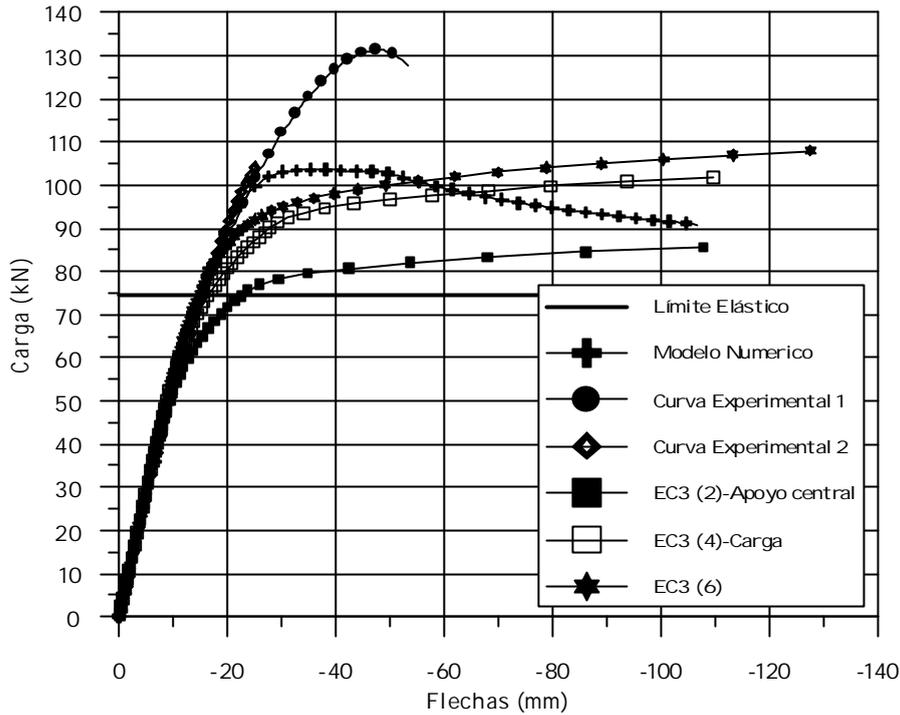


Figura 4-21. Curvas carga-flecha de la viga continua H 100x100c.

4.5.2.- Galgas extensométricas.

Analizando la información que proporcionan las galgas extensométricas es posible estudiar el comportamiento general de las vigas, el comportamiento del acero inoxidable en compresión y en tracción y los efectos de la abolladura local (sección eficaz).

Tal y como se ha comentado anteriormente, en las primeras vigas biapoyadas ensayadas (SHS 80x80-1, RHS 80x120-1, H100x100-1) se colocaron galgas en las secciones a L/4 y en centro de luz, tanto en las alas como en las almas. Un primer análisis de los resultados proporcionados por estas galgas permite observar la evolución del ensayo en las secciones instrumentadas.

Una vez ensayada la primera serie de tres vigas, se aprecia que aparecen efectos locales importantes en la sección de centro luz (sección de aplicación de la carga) y se decide instrumentar más intensamente dicha sección colocando más galgas a lo largo del alma y las alas y obtener así más información sobre la respuesta deformacional de la sección transversal.

A continuación se realiza a modo de ejemplo un análisis detallado de las galgas situadas en la zona de centro luz de la viga biapoyada RHS 80x120-2.

En la Figura 4-22 se presenta un esquema general de la instrumentación de dicha viga y una imagen de las galgas colocadas en la sección de centro luz.

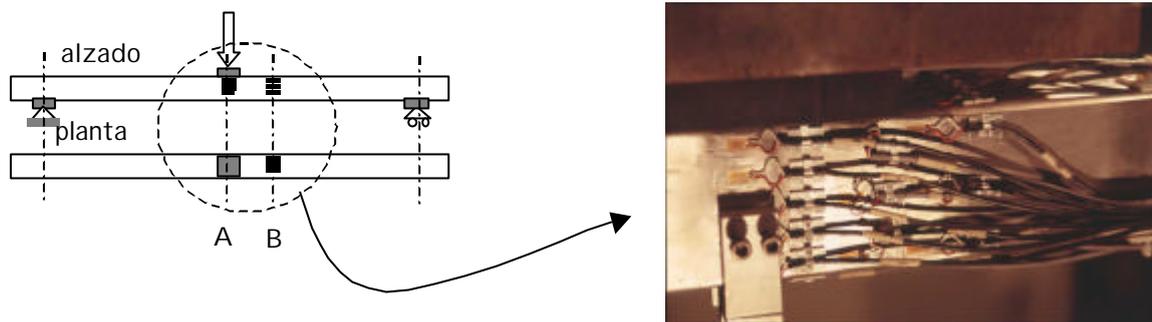


Figura 4-22. Instrumentación de la viga biapoyada RHS 80x120-2.

Como puede verse en la figura, la sección A (sección de centro luz) tiene cinco galgas a lo largo del alma, con el fin de poder determinar las distribuciones de tensiones no lineales y los efectos locales de la introducción de la carga. Dado que dicha sección se encuentra situada exactamente en el punto de aplicación de la carga no pudo instrumentarse el ala comprimida, con lo que se decidió instrumentar una sección cercana (sección B) en la que se conocieran las deformaciones del alma y las alas con el fin de identificar posibles efectos de abolladura y redistribuciones de tensiones.

La Figura 4-23 presenta las gráficas carga-deformación de las galgas a analizar de las secciones A y B. La aplicación de la carga en este ensayo se realizó de manera lenta, con tres velocidades de pistón distintas disminuyendo a medida que aumentaba el desplazamiento del mismo (3.45, 2.4 y 1.5 mm/min) con el fin de poder localizar de manera precisa los fenómenos locales que se pudieran producir. La carga máxima a la que se llegó es de 44.81 kN, a partir de la cual, se forma una rótula plástica en la sección central y la viga se descarga hasta 41.82 kN, instante en el que se procede a la descarga manual de la viga.

Analizando las curvas de la Figura 4-23 se observa que para un nivel de carga de 44.45 kN, antes de llegar a la carga máxima, las galgas 13, 14 y 15 del ala superior dejan de comprimirse y sufren un cambio de comportamiento a tracción que puede ser indicativo de que el efecto local de la introducción de la carga empieza a cobrar importancia. Siguiendo con el ensayo, se aprecia un nuevo cambio en las galgas 12 y 16. Dichas galgas se encuentran más cerca del alma y por tanto aprecian el efecto local más tarde.

En las galgas del ala inferior no se aprecia ningún efecto ya que están sometidas a tracción durante todo el ensayo.

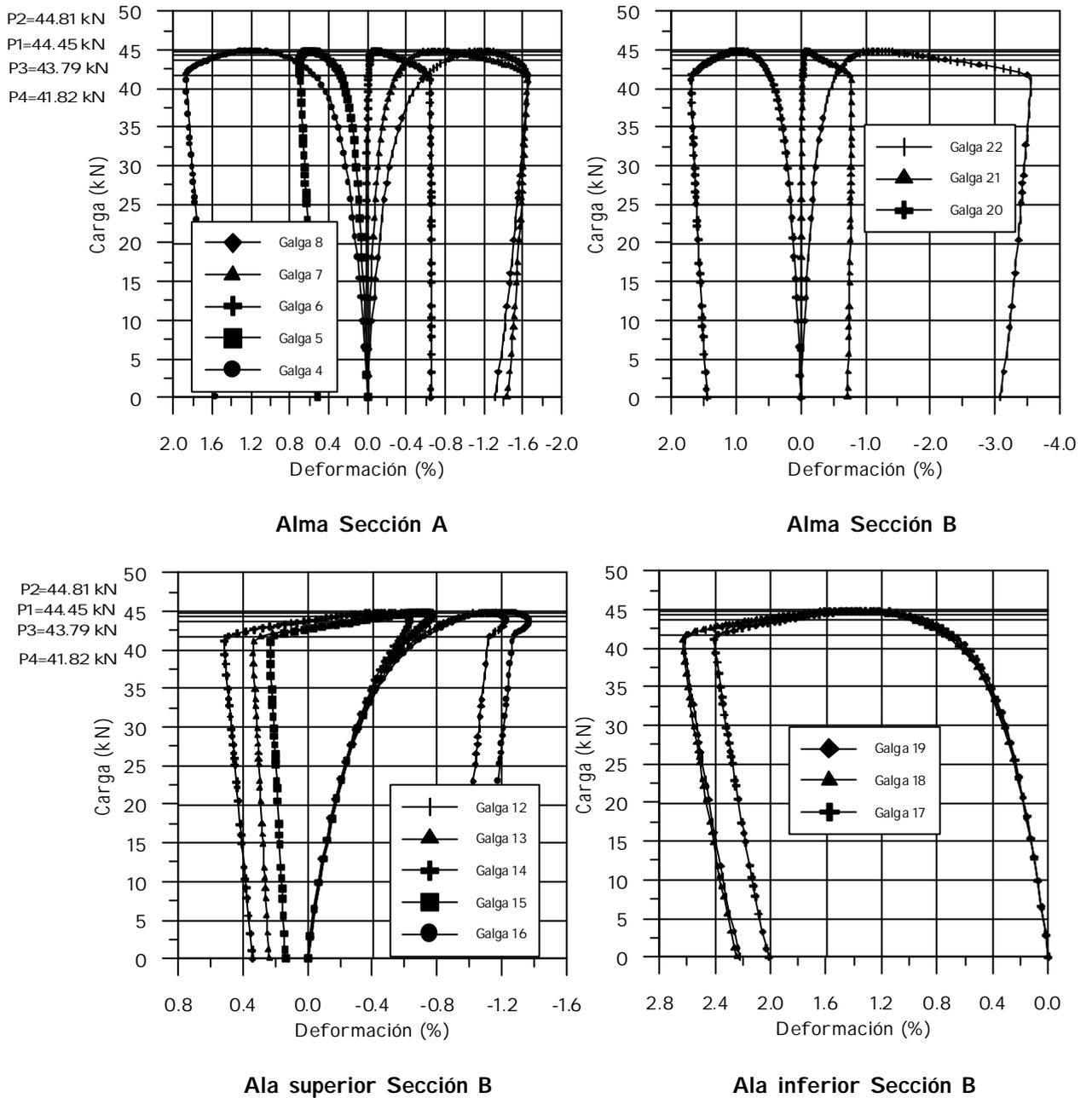


Figura 4-23. Curvas carga-deformación de las galgas de las secciones A y B de la viga biapoyada RHS 80x120-2.

Con el objeto de poder analizar de una forma más cómoda y sencilla la respuesta tenso-deformacional de la estructura, la Figura 4-24 muestra las distribuciones de deformación a lo largo de la sección transversal A para diferentes valores de la carga, así como sus correspondientes distribuciones de tensiones.

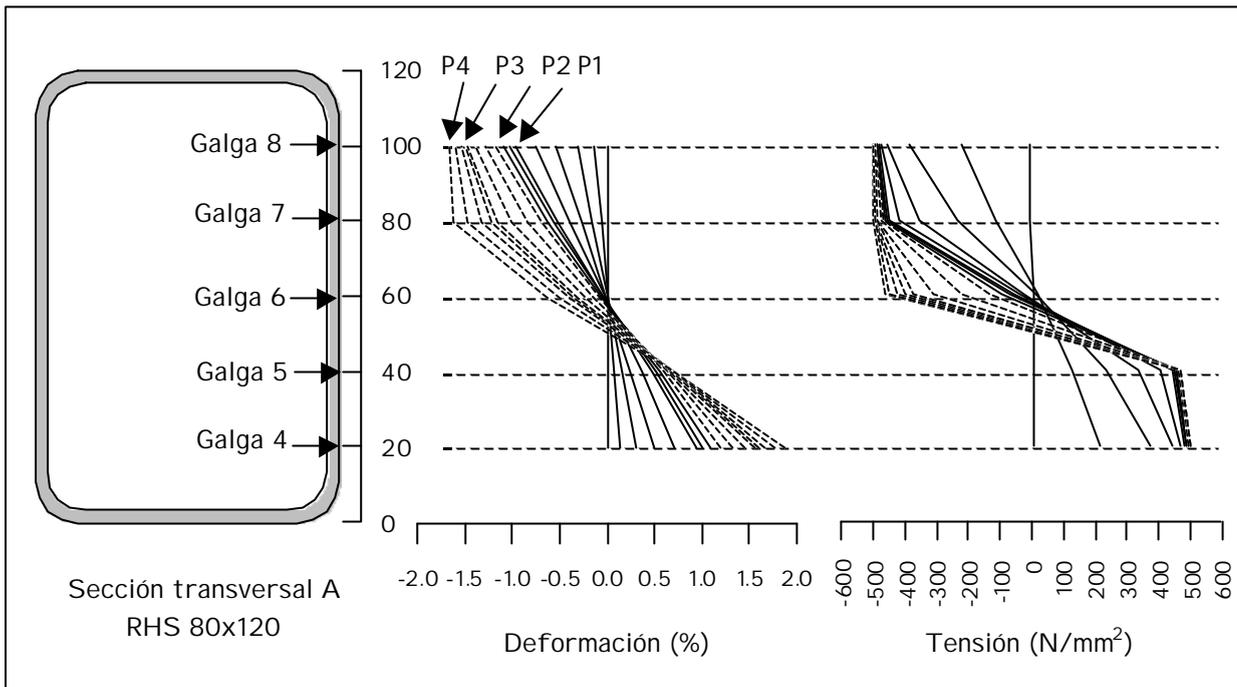


Figura 4-24. Distribuciones de deformaciones y tensiones a través de la sección transversal A en centro de luz de la viga biapoyada RHS 80x120-2.

Desde el inicio del ensayo hasta niveles de carga cercanos a $P1 = 44.45 \text{ kN}$, la deformación de la sección transversal es plana y la distribución de tensiones es no lineal, debido a la ecuación constitutiva del acero inoxidable. A partir de este instante se hacen más evidentes los efectos de la abolladura del ala comprimida con la consiguiente pérdida de sección eficaz, el descenso del eje neutro de la sección y la consecuente redistribución de tensiones. Por último, puede observarse que para niveles de carga cercanos a rotura los efectos de la abolladura y los efectos locales de la introducción de la carga son más relevantes, dando lugar a deformaciones no planas de la sección transversal. Una vez superada la carga máxima se forma una rótula plástica en la sección apreciándose distribuciones de tensiones claramente no lineales. En la Figura 4-25 se presenta una diapositiva de cual fue el estado final en el que quedó la sección estudiada.

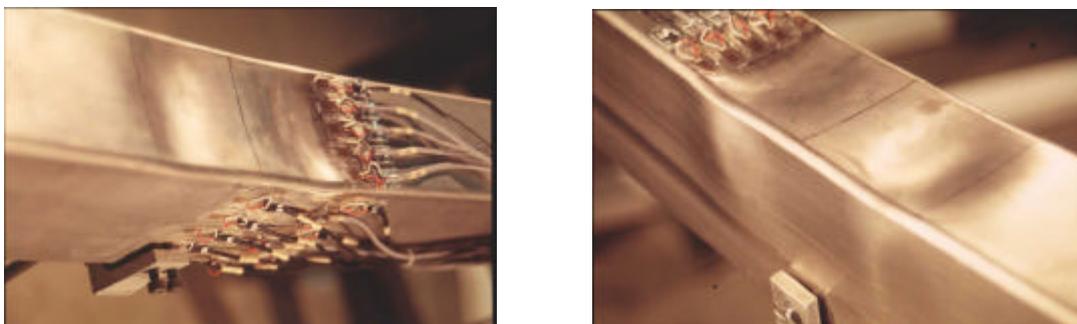


Figura 4-25. Estado final de la sección de centro luz de la viga biapoyada RHS 80x120-2.

El estudio de la evolución de la abolladura del ala comprimida se realiza en la sección B. En el alma se dispone solamente de tres galgas, pero a la vista del resultado anterior se puede asumir deformación plana de la sección hasta la carga $P1 = 44.45 \text{ kN}$, de manera que se puede determinar la distribución de tensiones a lo largo de toda la sección. En la Figura 4-26 se presentan las distribuciones de tensiones en el alma y en el ala superior de la sección B, hasta el instante en el que aparecen los efectos locales de la aplicación de la carga.

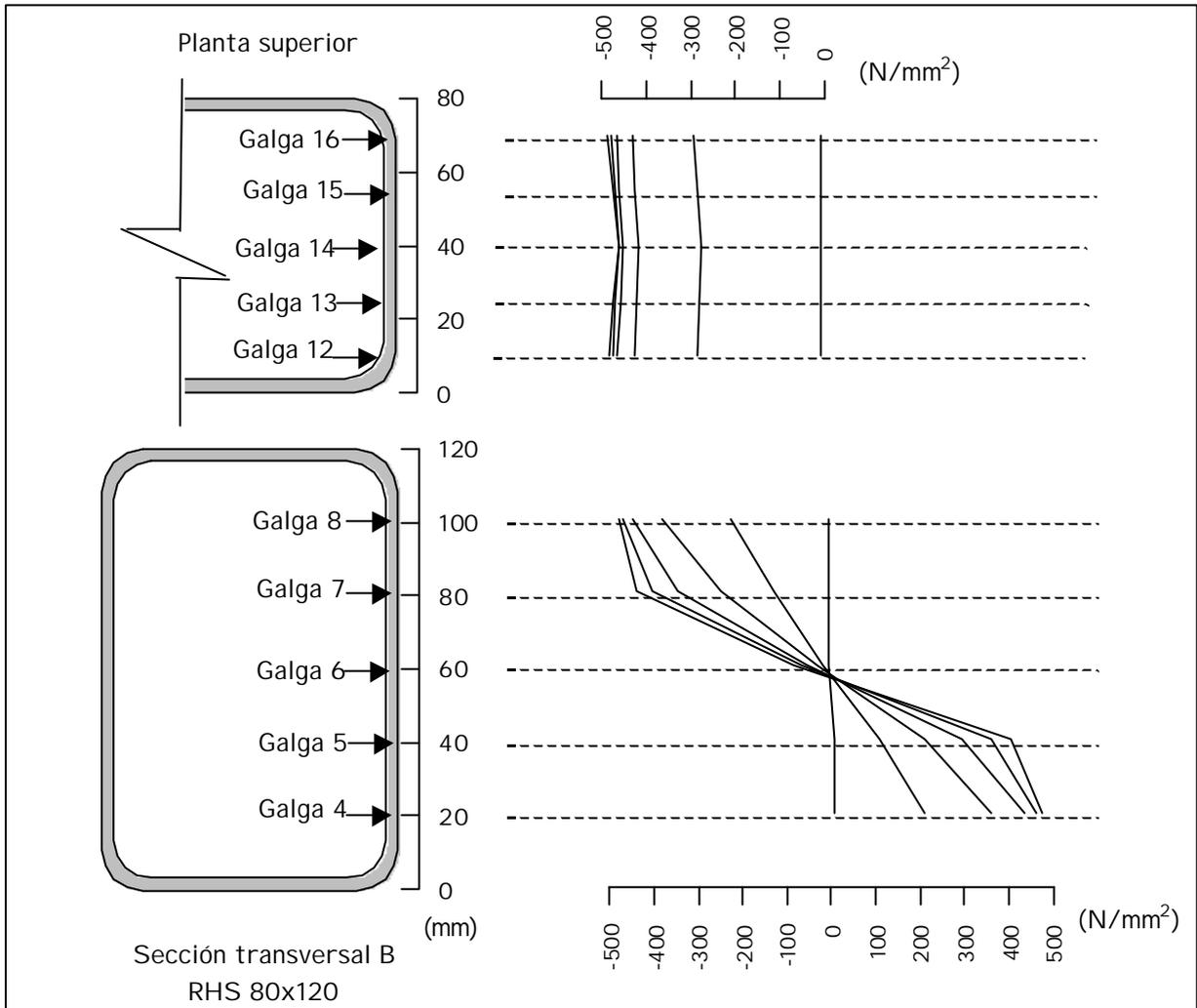


Figura 4-26. Distribuciones de tensiones a través de la sección transversal B de la viga biapoyada RHS 80x120-2.

En la figura se aprecia como a medida que aumenta la carga se hace evidente el efecto de la abolladura del ala comprimida ya que las distribuciones de tensiones en el ala no son uniformes y además se produce un descenso de la fibra neutra de la sección.

Analizando las galgas de las demás secciones de las vigas se observan comportamientos análogos al anteriormente descrito en todas ellas. Es decir, las deformaciones de las secciones son planas, hasta que los efectos locales son importantes, con los valores de las deformaciones experimentales, y asumiendo deformación plana de las secciones, se determinan las distribuciones de tensiones y se observa la no linealidad de dichas distribuciones y como va descendiendo la fibra neutra a medida que aparece la abolladura y el efecto local.

Un análisis más profundo de dicho comportamiento, incluyendo la no linealidad de las tensiones a lo largo de la sección transversal y relacionando los momentos actuantes con la curvatura de la sección y la distribución de las tensiones en la misma, así como la comparación con el modelo numérico, se realiza en el siguiente capítulo.

4.6.- CONCLUSIONES.

A continuación se presentan las principales conclusiones derivadas de la campaña experimental de vigas a flexión.

Durante los ensayos de caracterización del material se evidencian claras diferencias entre los valores de las propiedades mecánicas obtenidas de las probetas y los valores propuestos por Eurocódigo 3, Parte 1-4. Estas diferencias son debidas a la influencia que ejerce el trabajado en frío de la chapa y el conformado de la sección sobre las propiedades mecánicas del material. Por ello es siempre recomendable la realización de ensayos de caracterización del acero inoxidable a utilizar.

Durante los ensayos también se pone de manifiesto la respuesta no lineal de las estructuras de acero inoxidable, especialmente en aquellas situaciones en donde las estructuras se ven sometidas a tensiones próximas o superiores al límite elástico. Por otra parte, se observa que el comportamiento a flexión de las vigas bajo ciclos de carga y descarga realizados durante los ensayos es lineal.

Los resultados experimentales se han comparado con resultados obtenidos mediante un modelo numérico que tiene en cuenta la no linealidad del material, con los derivados de la aplicación de Eurocódigo 3, Parte 1-4 (1996) y con los obtenidos con la aplicación de los coeficientes de ajuste propuestos en el método de Rasmussen y Hancock (1993). Puede concluirse que el modelo numérico proporciona una muy buena aproximación al comportamiento de las vigas de acero inoxidable, aunque en general subestima muy ligeramente las flechas. Ello es debido a que en el modelo numérico se han utilizado elementos tipo viga y, por tanto, no se consideran los efectos de la abolladura local.

La aplicación del método simplificado de Eurocódigo 3, Parte 1-4 (1996), que considera un único valor del módulo de elasticidad secante a lo largo de todo el elemento, es recomendable para calcular flechas hasta valores de carga cercanos al 60% de la carga para la cual la tensión en la fibra más solicitada alcanza el valor del límite elástico. Sin embargo, para cargas superiores tiende a sobrestimar las flechas, dando lugar a un dimensionamiento claramente conservador frente al estado límite de servicio de deformaciones. En cualquier caso, es deseable definir criterios de decisión en torno a cuál debe ser el módulo de elasticidad a considerar de manera que reproduzca el comportamiento global de la estructura, especialmente en vigas continuas, en las que pueden existir diferencias significativas entre los valores absolutos de los máximos momentos positivos y los máximos negativos.

La utilización de los coeficientes de ajuste del método propuesto por Rasmussen y Hancock (1993) conduce, en algunos casos, a resultados de flecha inferiores a los experimentales quedando del lado de la inseguridad. Dicha diferencia puede ser debida a que el coeficiente utilizado en cada caso debe depender del esquema estático y el esquema de cargas al que se ve sometida la estructura, así como de la propia sección transversal.

Para secciones Clase 4 existe una diferencia importante en la obtención de flechas si se considera la sección total o la sección eficaz. Los resultados experimentales evidencian también la pérdida de sección eficaz del ala comprimida en cuanto aparecen fenómenos de abolladura local, así como el consecuente descenso de la fibra neutra de la sección. Por otra parte, las flechas obtenidas considerando la variación del módulo de elasticidad a lo largo de la viga y la posible redistribución de tensiones debida a la no linealidad del material son muy parecidas a las flechas experimentales.

Analizando la información proporcionada por las galgas extensométricas es posible estudiar el comportamiento de las secciones transversales de las vigas. Se observa que durante los primeros estados de carga las deformaciones de las secciones son planas y las distribuciones de tensiones son no lineales debido a la ecuación constitutiva del acero inoxidable. Posteriormente puede apreciarse que la deformación en la sección deja de ser plana en el momento en que los efectos de la abolladura local son importantes.

