

Estudio experimental del comportamiento a flexión de vigas de acero inoxidable

Experimental study on the flexural behaviour of stainless steel beams

Esther Real Saladrigas

Ingeniera de Caminos, Canales y Puertos
Profesora Asociada del Departamento de Ingeniería de la Construcción. UPC

◆
Enrique Mirambell Arrizabalaga

Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Catedrático del Departamento de Ingeniería de la Construcción. UPC
E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona

RESUMEN

Con el fin de cuantificar la influencia de la no linealidad del material en el comportamiento a flexión de vigas de acero inoxidable, se lleva a cabo una campaña experimental que consiste en la realización de ensayos de flexión en seis vigas biapoyadas y en seis vigas continuas de dos vanos. Las vigas se instrumentan con transductores de desplazamiento, galgas extensométricas y células de carga para determinar su respuesta estructural. Del análisis de los resultados experimentales se extraen conclusiones relativas a distribuciones de deformaciones y de tensiones. Asimismo, se utiliza un modelo numérico basado en el método de los elementos finitos, para analizar el comportamiento a flexión de las vigas ensayadas. Se comparan los resultados de flechas obtenidos experimentalmente con los resultados derivados del modelo numérico y con los obtenidos utilizando las especificaciones de Eurocódigo 3, Parte 1-4. Finalmente, del análisis comparativo se derivan conclusiones relativas al cálculo de flechas en vigas de acero inoxidable considerando los efectos de la no linealidad del material y de la reducción de sección eficaz debido a los fenómenos de abolladura local.

PALABRAS CLAVE: Vigas de acero inoxidable, análisis experimental, estado límite de servicio, comportamiento no lineal, abolladura local, sección eficaz.

SUMMARY

In order to quantify the influence of the material non-linearity effects on the flexural behaviour of stainless steel beams,

an experimental programme has been conducted. The experimental tests have been performed on six simply supported beams and six continuous beams. The beams have been instrumented with transducers, strain gauges and load cells to determine their structural response. Some conclusions may be derived from the experimental results. A numerical model based on the finite element method is used to analyse the flexural behaviour of the beams during the tests. A comparative analysis between the experimental results of deflections and those results derived from the numerical model is done. On the other hand, deflections obtained using rules specified in Eurocode 3, Part 1-4 are also compared with both experimental and numerical results. Several conclusions are pointed out to calculate deflections in stainless steel beams considering the material non-linearity effects and the effectiveness of the cross-section.

1. INTRODUCCION

El acero inoxidable se ha usado principalmente en construcciones arquitectónicas gracias a su resistencia a la corrosión, facilidad de mantenimiento y apariencia agradable. Las típicas aplicaciones incluyen recubrimientos de columnas, paneles de muros, marcos de puertas y ventanas, barandillas, escaleras y una amplia gama de secciones ligeras en acero inoxidable con una muy adecuada relación peso/resistencia. Sin embargo, su empleo como elemento estructural ha estado limitado durante años debido, entre otras razones, a la falta de especificaciones de diseño que fomenten y faciliten el uso del acero inoxidable en esta situación.

A pesar de la similitud entre las bases de diseño del acero al carbono y el acero inoxidable, es necesaria una especificación distinta para el diseño de estructuras de acero inoxidable dado que las propiedades mecánicas de dicho material son claramente distintas a las del acero al carbono. El acero inoxidable tiene una ecuación constitutiva no lineal, incluso para bajos niveles de tensión, y una pronunciada respuesta al trabajo en frío. Estas características afectan de manera significativa a las reglas de diseño relativas a los cálculos en flexión de vigas de acero inoxidable.

Los primeros trabajos de investigación sobre estructuras de acero inoxidable y cálculos de flechas fueron realizados por Johnson y Winter [1] y Wang *et al.* [2]. Dichos trabajos significaron la base de la primera norma relativa al uso del acero inoxidable en aplicaciones estructurales "Specification for the Design of Cold-Formed Stainless Steel Structural Members", AISI [3]. Recientemente, se han llevado a cabo diversos trabajos de investigación, tanto experimentales como numéricos, relativos al comportamiento estructural de vigas de acero inoxidable realizados por Lin, Yu y Galambos [4], van der Merwe y van den Berg [5] y Rasmussen y Hancock [6]. Dichas investigaciones han sido base de varias normativas en este campo y, en concreto, de la ANSI/ASCE-8-90 [7]. En Europa, Eurocódigo 3, Parte 1-4 [8] proporciona reglas complementarias para el diseño de estructuras de aceros inoxidables austeníticos y austenítico-ferríticos.

Asimismo, el Steel Construction Institute ha preparado una guía de diseño [9] para ingenieros expertos en el cálculo de estructuras de acero al carbono pero no necesariamente de acero inoxidable. Esta guía contiene especificaciones propias del acero inoxidable, las cuales deben entenderse como complemento a las especificaciones recogidas en la British Standards Institution BS 5950 Part 1 [10]. La guía incluye además recomendaciones para la elección del tipo de acero inoxidable más adecuado en cada aplicación. Contiene información sobre las propiedades mecánicas y físicas así como sobre la resistencia de proyecto de secciones transversales, barras, uniones y fabricación. También se incluyen ejemplos de proyecto para ilustrar el uso de la guía.

El Nickel Development Institute ha publicado un manual de diseño [11] para aceros inoxidables estructurales. Dicho manual se basa en los primeros borradores de Eurocódigo 3, Parte 1-4 [8]. Estos borradores se han visto sometidos a revisiones posteriores, las cuales no han sido recogidas en el manual. Por ejemplo, pueden observarse cambios significativos en la clasificación de las secciones transversales en función de las relaciones ancho/espesor y en la determinación de anchos eficaces en secciones esbeltas. Ello influye notablemente en la evaluación de la resistencia de las secciones transversales y en la determinación de la capacidad resistente de las estructuras de acero inoxidable. En cualquier caso, es un manual de gran utilidad para el proyecto de estructuras de acero inoxidable gracias a los comentarios e indicaciones que se recogen dentro de su articulado. Asimismo, el manual ofrece pautas de selección del material en función de las necesidades mecánicas y de corrosión y presenta ejemplos de aplicación que pueden resultar muy útiles para el proyectista.

A pesar de que cerca del 10% de la producción de acero inoxidable se usa en aplicaciones estructurales o arquitectóni-

cas [12], pocas investigaciones relativas a su comportamiento estructural se han llevado a cabo. Ello puede fomentar la realización de campañas experimentales y estudios numéricos que persigan como objetivo tener un mejor conocimiento del comportamiento de las estructuras de acero inoxidable.

Este artículo se centra principalmente en el análisis del comportamiento a flexión de vigas de acero inoxidable biapoyadas y continuas, en base a 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. 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 [8] y con resultados obtenidos mediante la aplicación de un código de análisis estructural (Abaqus) basado en el método de los elementos finitos (Hibbit *et al.*, [15]).

2. CAMPAÑA EXPERIMENTAL

El objetivo fundamental de la campaña experimental es estudiar el comportamiento a flexión de vigas de acero inoxidable y obtener las flechas para diferentes niveles de carga, especialmente en condiciones de servicio.

2.1. Vigas ensayadas

Se ensayaron seis vigas biapoyadas y seis vigas continuas de acero inoxidable con secciones transversales cuadradas y rectangulares conformadas en frío y secciones en H laminadas. Las principales características de las secciones longitudinales y transversales de las vigas ensayadas se presentan en la Figura 1.

Las vigas biapoyadas se ven sometidas a carga puntual en centro de luz y las continuas a una carga puntual en cada vano, cerca de la sección central (Figura 1). Las características y dimensiones principales de las vigas ensayadas se muestran en la Tabla 1. La longitud de las vigas es suficiente como para reproducir el comportamiento de viga. La relación canto/luz se encuentra comprendida entre 1/20 y 1/25 para todas las vigas ensayadas.

2.2. Propiedades del material

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. Las secciones transversales de las probetas ensayadas son tubos cuadrados 80 x 80, tubos rectangulares 80 x 120 y secciones en H 100 x 100. Los ensayos sobre las probetas extraídas de los perfiles fueron realizados por el fabricante de acuerdo con la norma ASTM [13]. En la Figura 2 se presentan las curvas tensión-deformación, resultado de estos ensayos.

Tabla 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

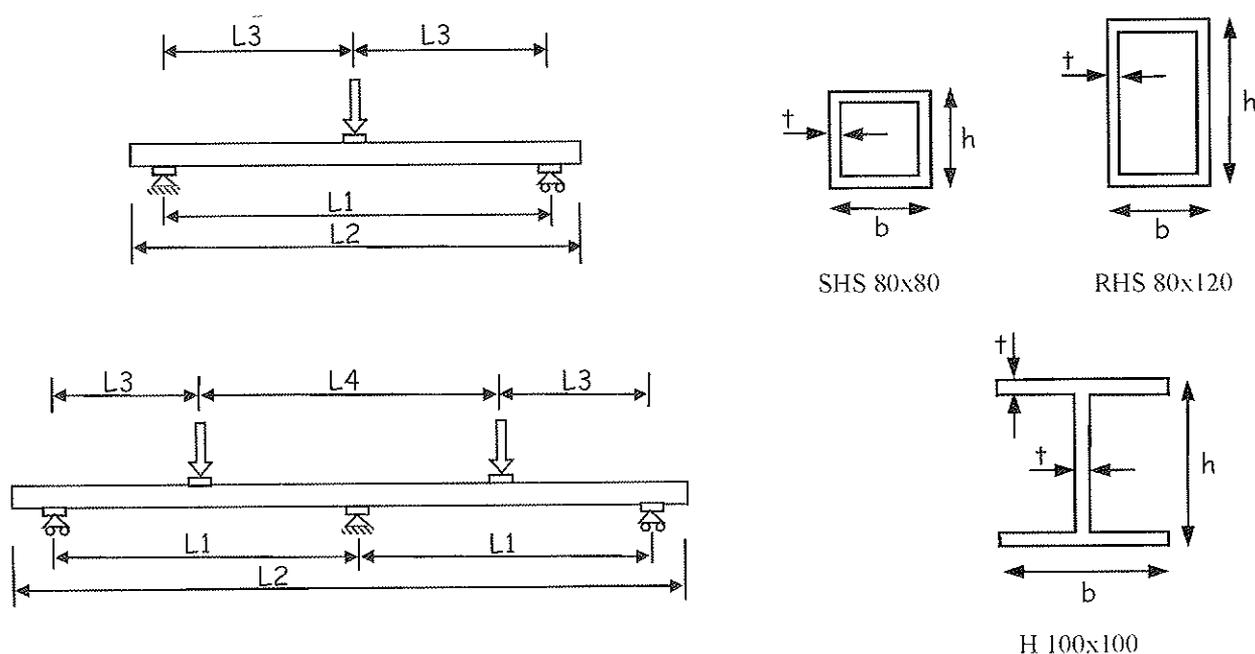


Figura 1. Secciones longitudinales y transversales de las vigas de acero inoxidable ensayadas.

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

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 [8], para chapas de material laminado en caliente, son realmente significativas. Según la normativa, para aceros AISI 304 debe tomarse un valor del límite elástico de $f_y = 220$ MPa y un módulo de elasticidad inicial de $E = 200000$ MPa. El valor del módulo de Young proporcionado por el fabricante es menor que el adoptado en Eurocódigo 3, Parte 1-4 [8] 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 ejer-

ce 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.

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

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E_0} + \epsilon_{px} \left(\frac{\sigma}{f_y} \right)^n \tag{1}$$

El valor de f_y es la tensión correspondiente al 0,2% de la deformación remanente, tensión ésta que se entiende como

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

Probeta ensayada	Tipo de acero	Ancho (mm)	Área (mm ²)	Long. (mm)	Espesor (mm)	f_y (N/mm ²)	E (kN/mm ²)	σ_{max} (N/mm ²)
SHS 80x80	304	12.54	35.75	50	2.85	422	165.57	658
RHS 80x120	304	12.57	46.13	50	3.67	442	161.16	661
H 100x100	304L	12.51	97.98	50	7.83	414	160.11	605

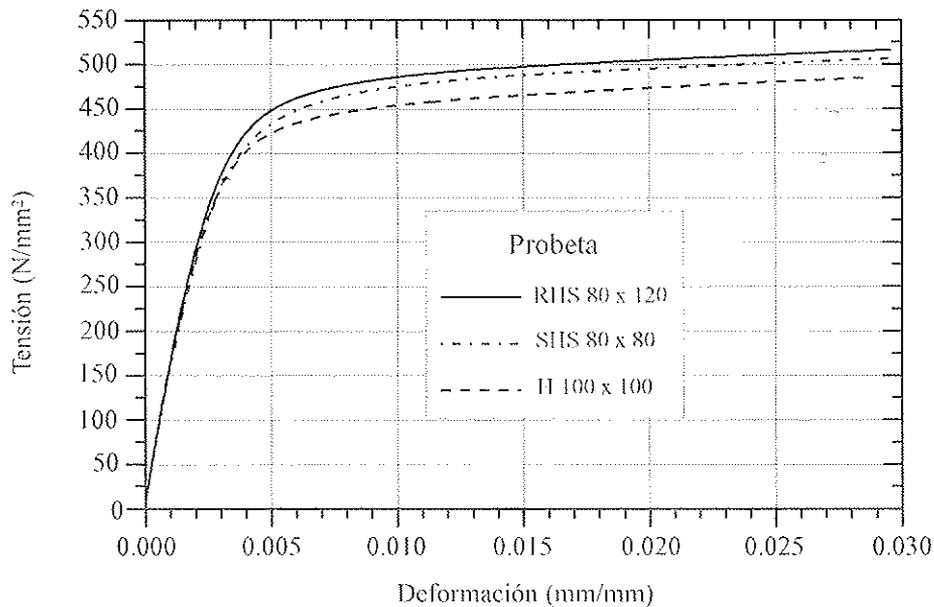


Figura 2. Curva tensión-deformación para las probetas ensayadas.

límite elástico convencional, dado que no existe un claro escalonamiento de cedencia en la curva tensión-deformación del acero inoxidable.

Como ejemplo, la Figura 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 [8] 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).

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. (2)), basada en la misma expresión de Ramberg-Osgood (Ec. (1)), para analizar el comportamiento a flexión de vigas de acero inoxidable cuando éstas se ven sometidas a tensiones normales superiores al límite elástico.

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. (1)), ajustando los coeficientes n a los resultados experimentales obtenidos para las tres secciones de acero inoxidable analizadas ($n = 4.80$ para SHS 80 x 80, $n = 6.16$ para RHS 80x120 y $n = 6.37$ para H 100 x 100). 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 ANSI/ASCE-8.90, 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. (2)).

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

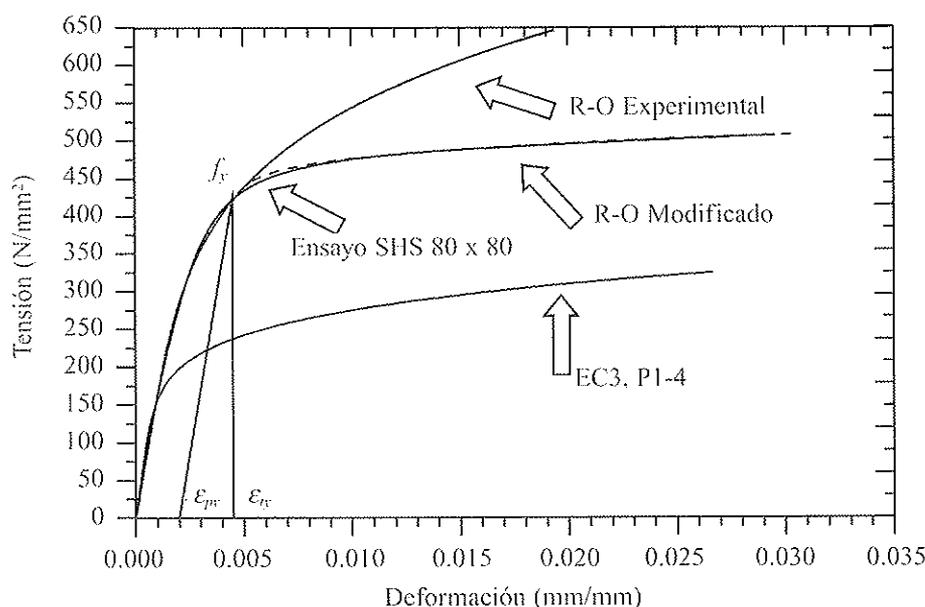


Figura 3. Curvas tensión-deformación para el acero inoxidable de la probeta SHS 80x80.

Por lo tanto, existe un paralelismo entre las expresiones (1) y (2). En la ecuación (2), ϵ_{pr} es la deformación plástica de la tensión última, ϵ_{tr} 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 80 x 120 y $n = 2.98$ para H 100 x 100), para niveles de tensión superiores al límite elástico.

En la Figura 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.

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 [8] 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, resultando las alas de las secciones SHS 80 x 80 y RHS 80 x 120 de Clase 4, con lo que será 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).

2.4. Instrumentación de las vigas

Una adecuada instrumentación permitirá conocer el estado tensional de las vigas ensayadas con suficiente precisión. Dicha instrumentación consiste en una serie de transductores lineales de desplazamiento y una serie de galgas extensométricas unidireccionales que permiten conocer las flechas y las deformaciones 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. En la Figura 4 se presenta, a modo de ejemplo, la viga continua de acero inoxidable SHS 80x80c y su instrumentación.

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

En las vigas biapoyadas se disponen tres transductores de desplazamiento, uno en centro de luz, bajo la aplicación de la carga, y los otros dos en las secciones a 1/4. 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 vigas biapoyadas se disponen galgas en las tres secciones más representativas del comportamiento de la viga: la sección central, que será donde tendremos tensiones mayores, y las dos secciones a 1/4 para controlar la simetría del ensayo. Las vigas continuas se instrumentan en una de las secciones de aplicación de la carga y en la sección del apoyo intermedio.

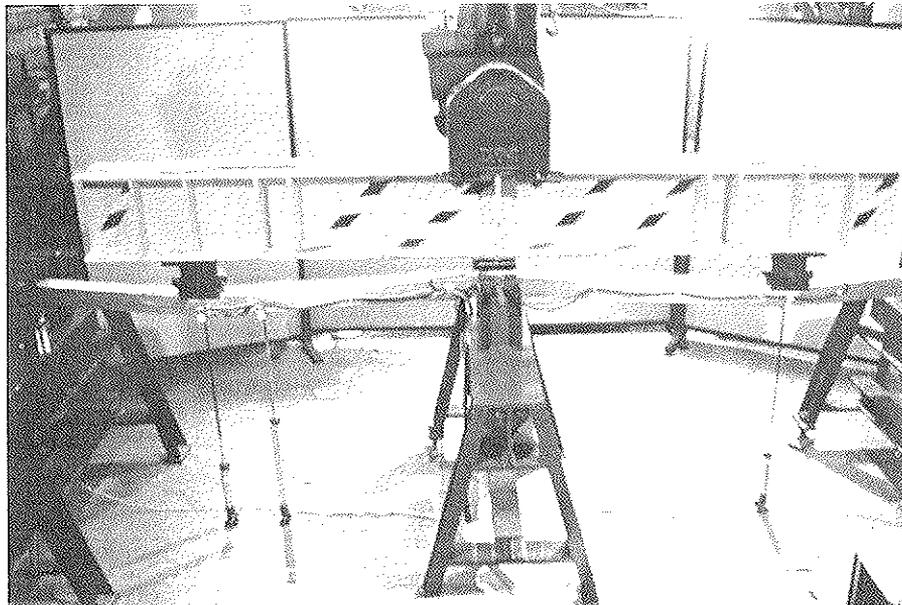


Figura 4. Vista de la viga de acero inoxidable ensayada SHS 80x80c.

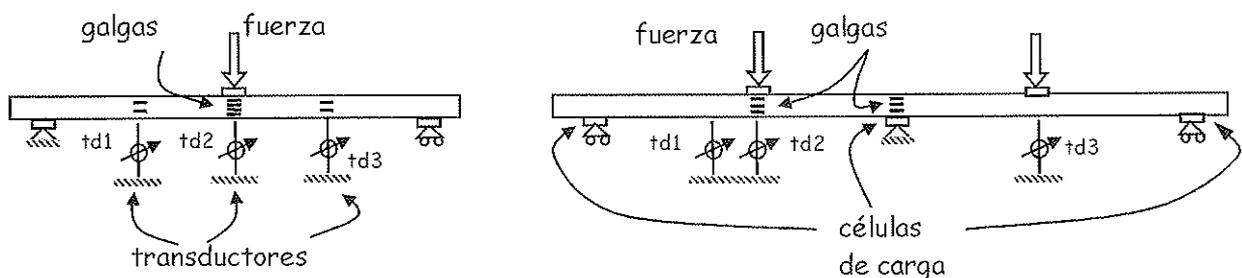


Figura 5. Esquema de instrumentación de las vigas ensayadas.

Las mismas secciones transversales se instrumentan con galgas extensométricas. En la Figura 6 se muestra una imagen de las galgas colocadas en la sección de centro luz para la viga biapoyada de acero inoxidable RHS 80x120.

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 permite recoger experimentalmente fenómenos plásticos y roturas dúctiles.

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, mediante el pertinente sistema de adquisición de datos, para su posterior análisis.

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 7 puede verse un detalle del sistema de apoyo descrito.

3. PRESENTACIÓN Y ANALISIS DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES

En este apartado se presentan algunos de los numerosos resultados experimentales que se obtuvieron durante la campaña de ensayos. Toda la información relativa a dichos ensayos puede encontrarse en Mirambell *et al.* [14].

3.1. Transductores de desplazamiento

Las flechas experimentales se miden con transductores lineales de desplazamiento en todas las vigas ensayadas y se com-

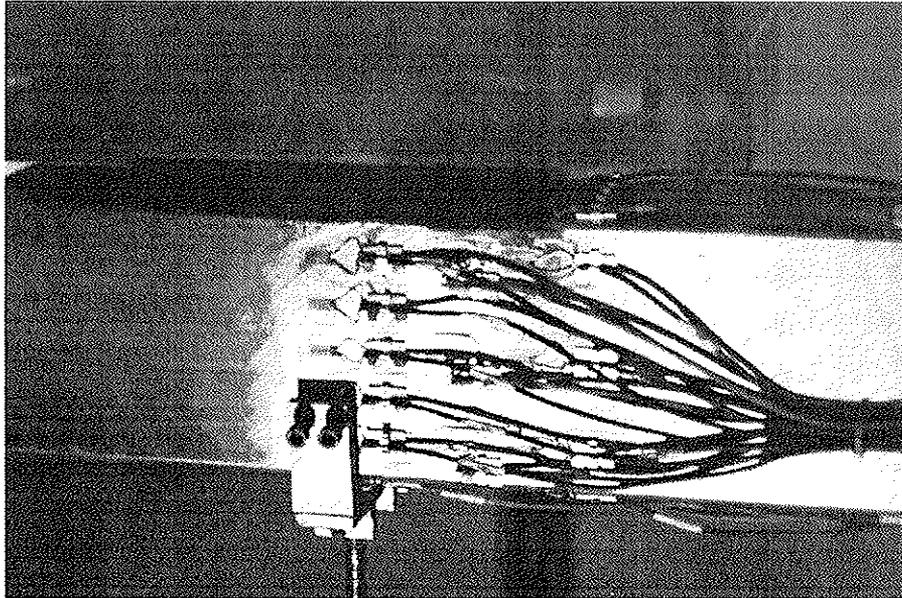


Figura 6. Galgas colocadas en la sección de centro luz para la viga de acero inoxidable RHS 80 x 120.

paran con las flechas calculadas según los métodos propuestos por Eurocódigo 3, Parte 1-4 [8] y con las flechas obtenidas a partir de un modelo numérico basado en el método de los elementos finitos.

La Figura 8 muestra las curvas carga-desplazamiento obtenidas experimentalmente en los transductores 1 y 3 (td1 y td3) situados a $l/4$ y en el transductor 2 (td2) situado en centro luz para la viga biapoyada SHS 80 x 80. En esta figura, la recta horizontal (límite elástico) marca el valor de la carga para el cual la tensión en la fibra más solicitada alcanza el valor del límite elástico.

Del análisis de estas curvas experimentales 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.

Lógicamente, los resultados experimentales recogen, de forma implícita, la influencia de la no linealidad del diagrama tensión-deformación del acero inoxidable y de la reducción de sección transversal (sección eficaz) debida a los efectos de la abolladura local.

Según Eurocódigo 3, Parte 1-4 [8], 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

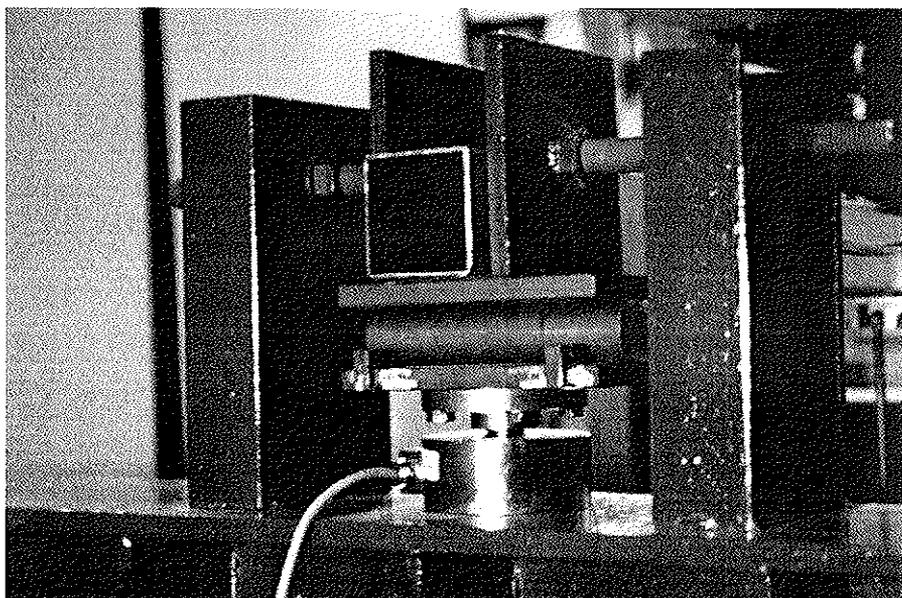


Figura 7. Aparato de apoyo móvil, apoyo de horquilla y célula de carga.

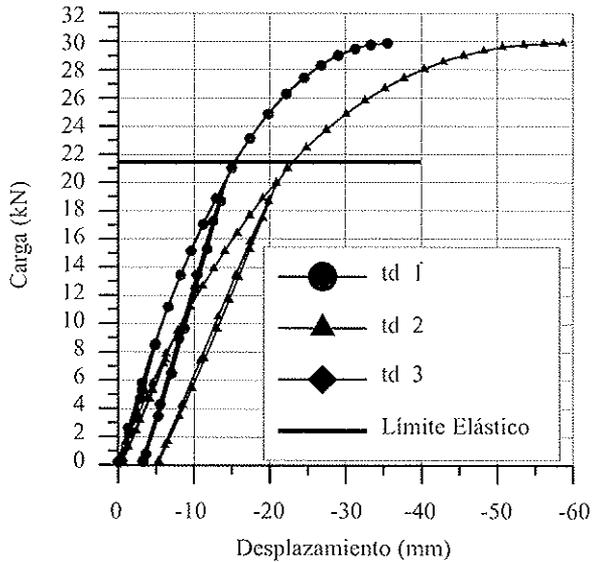


Figura 8. Curvas carga-desplazamiento en los transductores de la viga biapoyada SHS 80 x 80.

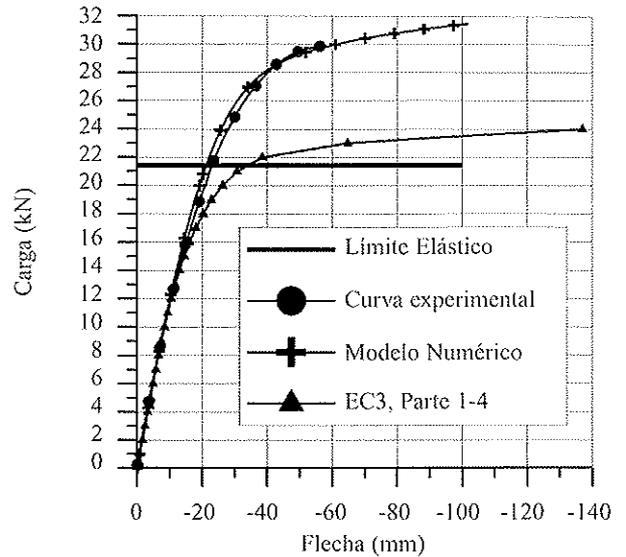


Figura 9. Curvas carga-flecha para la viga biapoyada SHS 80 x 80.

acero inoxidable y la sección transversal eficaz. 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 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. Así, el cálculo de la flecha de una viga biapoyada sometida exclusivamente a una carga puntual en centro vano se realizaría de la siguiente manera:

$$P \Rightarrow M = \frac{PL}{4} \Rightarrow \sigma = \frac{M}{W} \Rightarrow E_c \times (1) \Rightarrow \varepsilon$$

$$\Rightarrow \varepsilon \Rightarrow E_s = \frac{\sigma}{\varepsilon} \Rightarrow f = \frac{Pl^3}{48E_s I}$$

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.*, [15]). El modelo numérico considera la ecuación constitutiva real del material, obtenida a partir de la información proporcionada por el fabricante, con lo que se determinan las flechas 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.

A continuación se presentan los resultados del análisis comparativo de flechas para las vigas biapoyadas SHS 80x80 (Figura 9), H100x100 (Figura 10) y la viga continua RHS 120x80 (Figura 11).

En las Figuras 9 y 11 puede observarse que los resultados del modelo numérico se ajustan bastante bien a los resultados experimentales, aunque existen pequeñas diferencias debidas al hecho de que el elemento finito usado para el análisis numérico es un elemento tipo viga, que no considera los efectos de la abolladura local. Esta diferencia no se aprecia en el

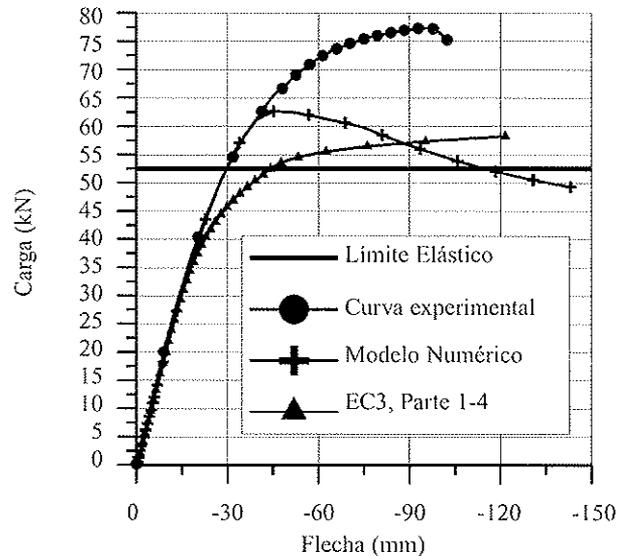


Figura 10. Curvas carga-flecha para la viga biapoyada H 100 x 100.

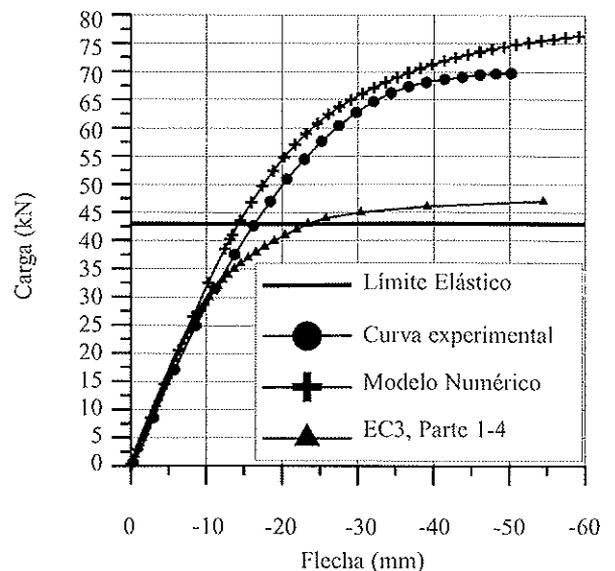


Figura 11. Curvas carga-flecha para la viga continua RHS 80 x 120.

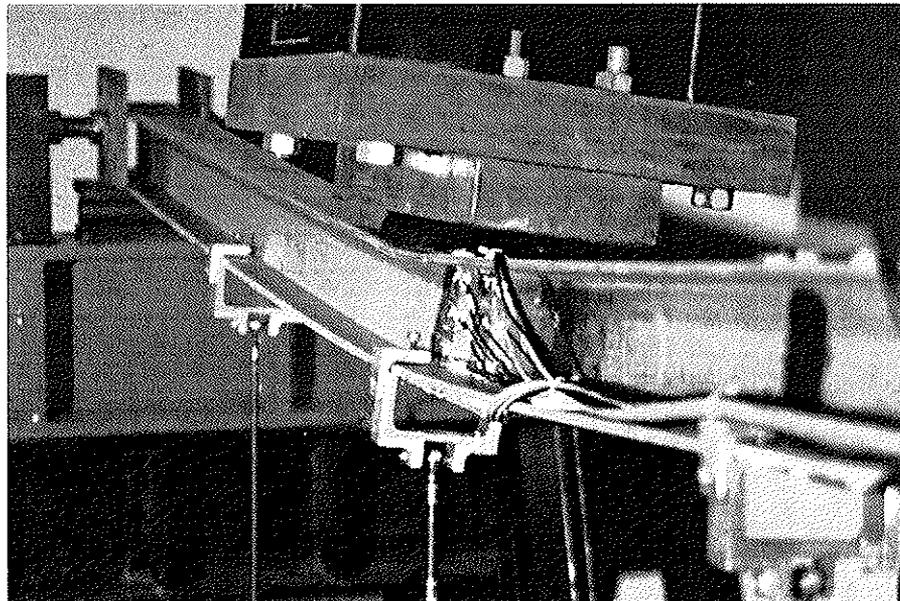


Figura 12. Pandeo lateral.

perfil en H dado que no aparecen fenómenos de inestabilidad local (Figura 10).

En este caso, para las vigas con sección transversal en doble T, 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. En la Figura 12 se presenta una fotografía de una de las vigas ensayadas después de que ocurriera el pandeo lateral.

En relación a los resultados obtenidos a partir de Eurocódigo 3, Parte 1-4 [8], puede destacarse que las curvas carga-flecha (curvas EC3 de las Figuras 9, 10 y 11), obtenidas utilizando el mínimo valor del módulo de elasticidad secante, son parecidas a las curvas de resultados experimentales hasta un valor del 60% de la carga para la cual la tensión en la fibra más cargada alcanza el valor del límite elástico. Para niveles de carga cercanos a dicho valor, las diferencias entre las flechas obtenidas mediante este método y las experimentales pueden ser significativas, pudiendo llegar a valores de hasta el 50% en las vigas biapoyadas y cercanos al 80% en las vigas continuas de dos vanos. Esta diferencia es debida a que la formulación de Eurocódigo 3 no considera la variación del módulo de elasticidad a lo largo de la viga ni a través de su sección transversal, y es más acusada en las vigas continuas de dos vanos ya que existe una redistribución de esfuerzos localizada fundamentalmente en las zonas de apoyos intermedios. Una información más detallada sobre el análisis de todos los resultados de flechas obtenidos en las vigas biapoyadas y continuas puede encontrarse en Mirambell y Real [16].

3.2. Galgas extensométricas

Analizando la información que proporcionan las galgas extensométricas es posible estudiar el comportamiento del

acero inoxidable en compresión y en tracción y los efectos de la abolladura local (sección eficaz). Las curvas carga-deformación obtenidas de las galgas situadas en el alma de la sección centro luz para la viga biapoyada RHS 80x120 se presentan en la Figura 13.

El análisis de estas curvas experimentales permite observar, al igual que en las curvas carga-desplazamiento, los efectos de la no linealidad del material durante el proceso de carga hasta rotura y la respuesta lineal de la estructura durante los procesos de carga y descarga llevado a cabo durante el ensayo.

Con el fin de analizar el comportamiento a flexión de la viga y obtener la respuesta deformacional de la sección transversal (deformación plana), algunas de las vigas ensayadas se instrumentaron con suficientes galgas a lo largo del alma. La Figura 14 muestra la información proporcionada por las cinco galgas situadas en ésta, en la sección de centro de luz de una de las dos vigas biapoyadas RHS 80x120 ensayadas.

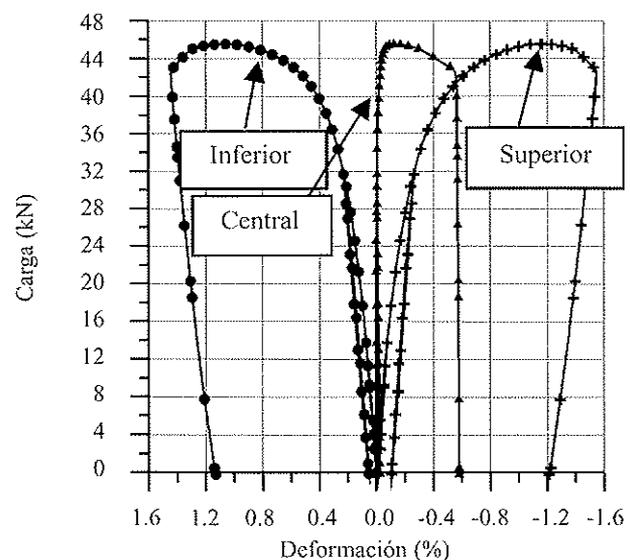


Figura 13. Curvas carga-deformación obtenidas para las tres galgas de la primera viga RHS 80 x 120.

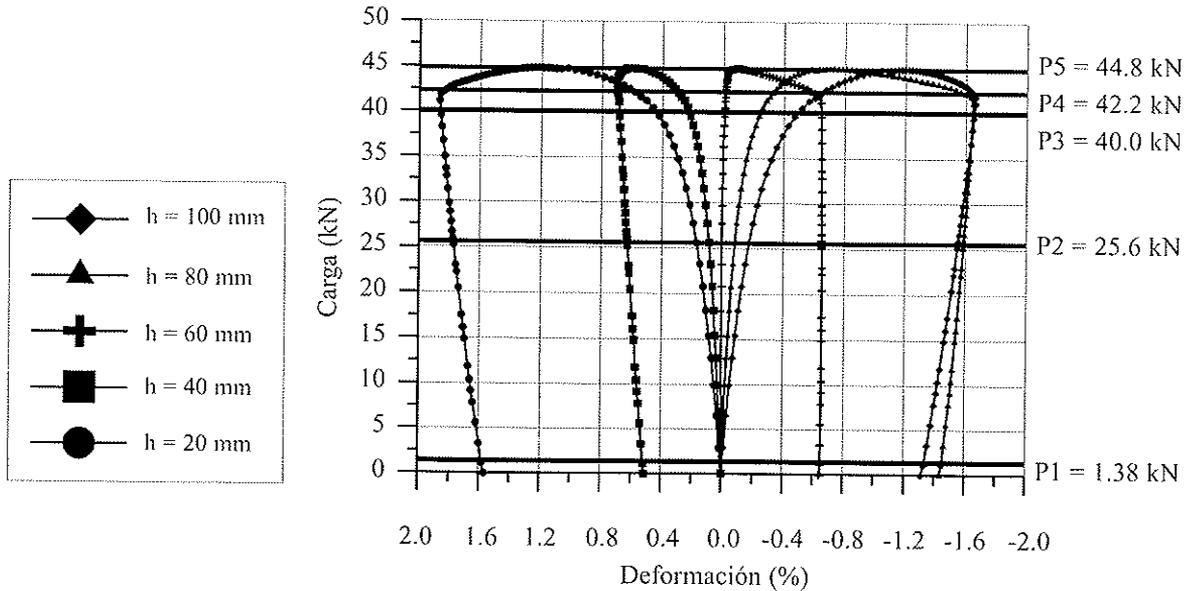


Figura 14. Curvas carga-deformación obtenidas para las cinco galgas de la segunda viga RHS 80 x 120.

Con el objeto de poder analizar de una forma más cómoda y sencilla la respuesta tenso-deformacional de la estructura, la Figura 15 muestra las distribuciones de deformación a lo largo de la sección transversal para diferentes valores de la carga, así como sus correspondientes distribuciones de tensiones.

ble. Por último, puede observarse que, para niveles de carga cercanos a rotura (mayores que 40.0 kN) los efectos de la abolladura y los efectos locales de la introducción de las cargas y reacciones son más relevantes, dando lugar a deformaciones no planas de la sección transversal y a distribuciones de tensiones claramente no lineales.

Desde el inicio del ensayo hasta niveles de carga cercanos a $P_2 = 40.0 \text{ kN}$, a medida que va aumentando la carga 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. Para estos niveles de carga, la deformación de la sección transversal es plana y la distribución de tensiones es no lineal, debido a la ecuación constitutiva del acero inoxidable.

CONCLUSIONES

Se ha presentado un estudio experimental del comportamiento a flexión de vigas de acero inoxidable, ensayándose una serie de doce vigas biapoyadas y continuas de dos vanos de acero inoxidable. La información obtenida de los transduc-

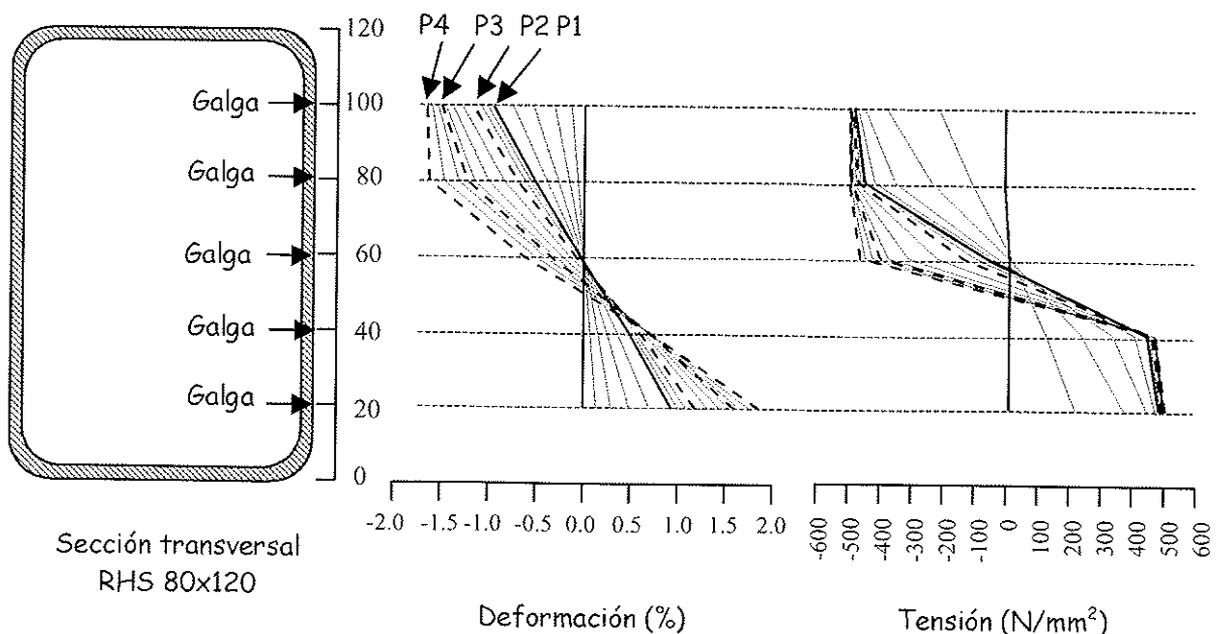


Figura 15. Distribuciones de deformaciones y tensiones a través de la sección transversal en centro luz de la viga RHS 80x120.

