

Capítulo 7

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

7.1.- INTRODUCCIÓN.

En el presente capítulo se realiza un análisis detallado de los resultados obtenidos durante el desarrollo de los ensayos, así como una comparación de éstos con los que se derivan del modelo numérico, tras la validación de los resultados derivados de la aplicación de dicho modelo numérico.

Debido a la enorme cantidad de datos obtenidos para las doce vigas a lo largo de toda la campaña experimental, se ha considerado oportuno presentar en primer lugar un análisis general del comportamiento de todas las vigas analizando las curvas carga-flecha y evaluando las cargas críticas de abolladura a través del estudio de las tensiones principales en el punto central del alma de las vigas.

Este análisis permitirá diferenciar varios tipos de comportamiento que se analizarán detalladamente en apartados posteriores.

7.2.- ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO EXPERIMENTAL Y NUMÉRICO DEL ALMA DE LAS VIGAS.

Para el análisis de cada una de las vigas, se estudiará la curva carga-flecha experimental y su comparación con la curva del modelo numérico, identificando en aquella los cambios de comportamiento de la viga.

Una vez conocido el comportamiento del alma mediante las curvas carga-flecha, el problema requerirá un análisis a nivel tensional para evaluar con mayor rigor la respuesta estructural de la viga.

Nos encontramos ante un elemento sometido a un estado de sollicitación biaxial y en presencia de un material cuya respuesta tenso-deformacional es no lineal. En esta situación, no es posible determinar directamente el nivel de tensiones en la viga a partir de las deformaciones registradas durante el ensayo. Para ello se utilizará el modelo numérico, el cual previamente será contrastado y verificado a través de los resultados de la campaña experimental llevada a cabo.

Dicha validación se realizará mediante la comparación de los resultados, en términos de deformaciones principales. Así, a partir de las lecturas de deformaciones de las galgas de la roseta situada en el centro del panel a ambos lados del alma (ver a modo de ejemplo la Figura 6-36) (galgas 5, 7 y 9 con sus correspondientes simétricas pares, galgas 6, 8 y 10) se calculan en primer lugar las deformaciones de membrana para este punto en las tres direcciones de las bandas de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}\varepsilon_{mh} &= (\varepsilon_5 + \varepsilon_6) / 2 && \text{deformación de membrana horizontal} \\ \varepsilon_{m45} &= (\varepsilon_7 + \varepsilon_8) / 2 && \text{deformación de membrana a } 45^\circ \\ \varepsilon_{mv} &= (\varepsilon_9 + \varepsilon_{10}) / 2 && \text{deformación de membrana vertical}\end{aligned}$$

En estas expresiones ε_i representa la deformación medida por la galga i durante el ensayo.

A partir de estas deformaciones de membrana se calculan las deformaciones principales como:

$$\varepsilon_{pt} = \frac{\varepsilon_{mv} + \varepsilon_{mh}}{2} + \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\varepsilon_{mh} - \varepsilon_{m45})^2 + (\varepsilon_{m45} - \varepsilon_{mv})^2} \quad [7-1]$$

$$\varepsilon_{pc} = \frac{\varepsilon_{mv} + \varepsilon_{mh}}{2} - \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\varepsilon_{mh} - \varepsilon_{m45})^2 + (\varepsilon_{m45} - \varepsilon_{mv})^2} \quad [7-2]$$

siendo ε_{pt} y ε_{pc} las deformaciones principales de tracción y compresión respectivamente.

Por otro lado, del modelo se extraen los resultados de deformaciones principales en el punto central del panel del alma y se comparan con los calculados a partir de los resultados del ensayo. La Figura 7-1 muestra las curvas de evolución de las deformaciones principales de la roseta central del ensayo y del modelo numérico para la viga ad1w4. En la figura se observa una clara concordancia entre los resultados experimentales y numéricos. Dicha concordancia de resultados también se obtiene para las demás vigas ensayadas.

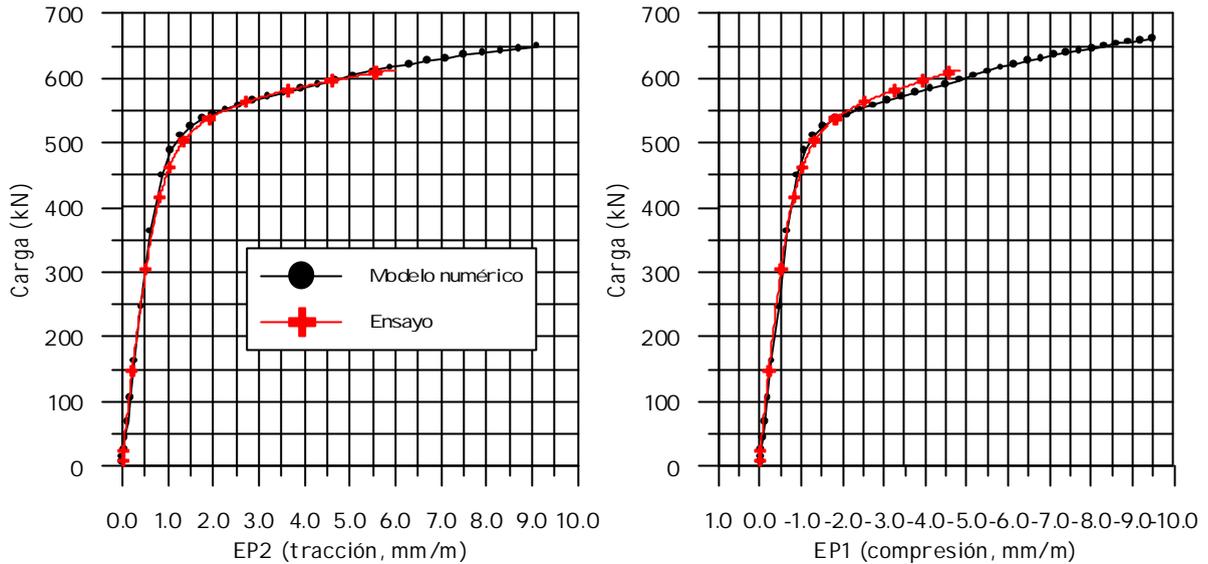


Figura 7-1. Curvas carga-deformación principal de la roseta central de la viga ad1w4.

A continuación se presentan las curvas carga-flecha experimental y numérica (Figura 7-2) para esta misma viga ad1w4 (relación de aspecto a/d igual a 1 y espesor de alma de 4 mm). También aquí puede observarse que el modelo numérico reproduce de forma fidedigna los resultados experimentales. Para el resto de vigas ensayadas, ambas curvas carga-flecha experimental y numérica son también muy similares.

En base a lo expuesto, puede concluirse que el modelo numérico puede ser utilizado como herramienta básica para poder interpretar la respuesta estructural de las vigas armadas de acero inoxidable, realizando siempre el análisis comparativo con aquellos resultados experimentales que permitan tal análisis.

7.3.- CARACTERIZACIÓN GENERAL DEL COMPORTAMIENTO DE LAS VIGAS.

En el presente apartado se realiza un análisis global de todas las vigas y se caracteriza el comportamiento general de las mismas. Dicho análisis se lleva a cabo mediante el estudio de las curvas curva carga-flecha experimental y numérica y mediante el estudio de las tensiones principales en el centro del alma de cada viga.

La Figura 7-3 muestra las tensiones principales de tracción y de compresión en el punto medio de la placa, obtenidas con el modelo numérico.

Del análisis detallado de estas curvas (ver Figura 7-2 y Figura 7-3) se desprende que la no linealidad del material entra en juego en el incremento 10, a partir del cual se pierde la linealidad en la curva carga-flecha; sin embargo, en el centro del panel se sigue manteniendo un estado de corte puro (tensiones principales iguales y de signo contrario). En ese instante, la tensión de comparación vale $\sigma_{co}=211$ MPa, y si observamos la curva tensión-deformación del acero de la chapa de 4mm presentada en la Figura 6-6 del capítulo anterior, veremos que a partir de, aproximadamente, una tensión de 200 MPa entra en juego la no linealidad del material. En el incremento 19 se observa un claro cambio de comportamiento en las tensiones principales de manera que aumentan las tracciones y disminuyen las compresiones. Este cambio de comportamiento, en el que la viga ya no es capaz de absorber más compresiones,

está asociado a la entrada en juego de la no linealidad geométrica, y a la posterior formación del campo diagonal.

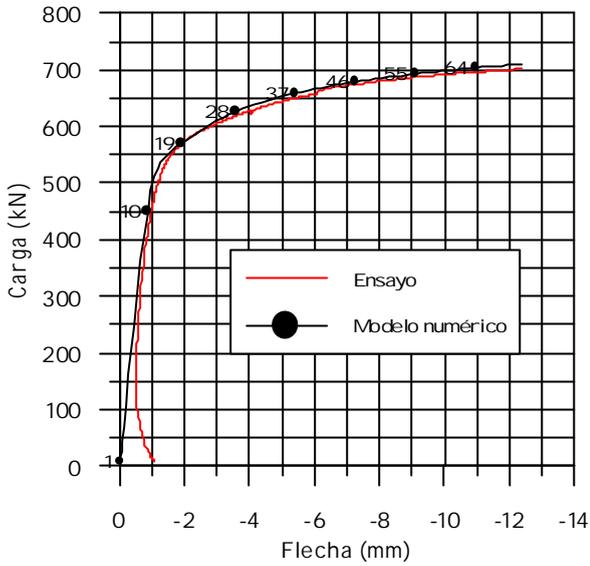


Figura 7-2. Curvas carga-flecha experimental y numérica, viga ad1w4.

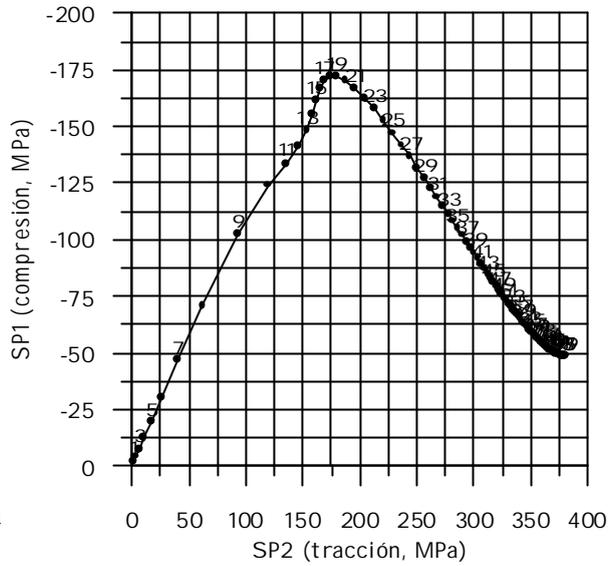


Figura 7-3. Tensiones principales en el punto central, viga ad1w4.

A continuación se presentan las curvas carga-flecha y tensiones principales de las demás vigas ensayadas (de la Figura 7-4 hasta la Figura 7-19) :

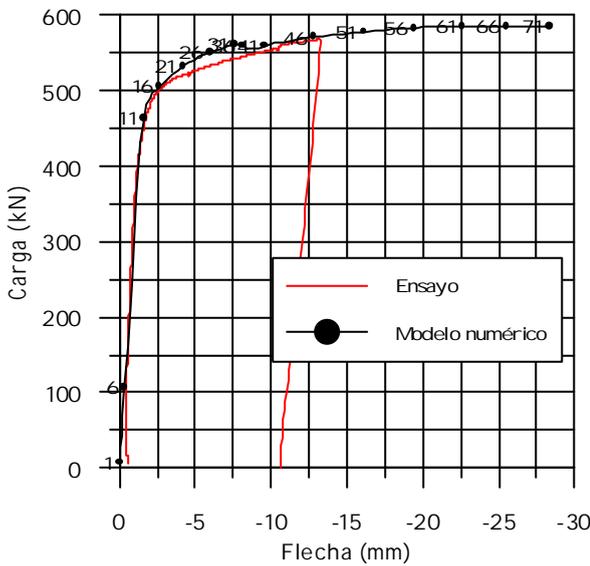


Figura 7-4. Curvas carga-flecha experimental y numérica, viga ad15w4.

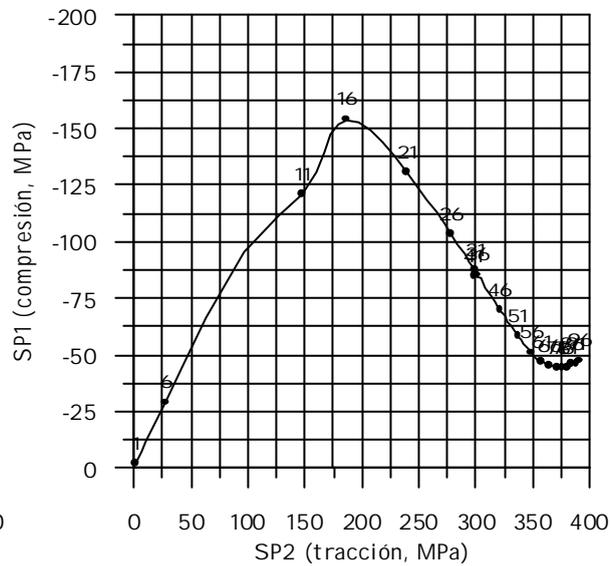


Figura 7-5. Tensiones principales en el punto central, viga ad15w4.

En la viga ad15w4, la curva carga-flecha pierde la linealidad en el incremento 11, correspondiente al instante en donde se hace apreciable la influencia de la no linealidad del material. Las tensiones principales en el punto central de la placa cambian de comportamiento en el incremento 16, entrando en juego en este instante la no linealidad geométrica.

Las Figuras 7-6 y 7-7 corresponden a la viga ad2w4, en la que el comportamiento es algo distinto a los descritos anteriormente. El modelo presenta una rigidez inicial igual a la obtenida durante el ensayo de la viga. Sin embargo el valor de la carga que agota la estructura en el ensayo es menor que el valor obtenido mediante el modelo numérico. Ello puede atribuirse a la presencia de un conjunto de variables que son difíciles de controlar. En primer lugar, la deformación inicial introducida en el modelo de la viga no es la misma que la que se presenta en realidad, debido a las imperfecciones geométricas iniciales (no se midieron las imperfecciones iniciales). En segundo lugar, hay que tener en cuenta que se trata de vigas armadas, montadas en taller a partir de la unión de varias chapas mediante soldadura. Este procedimiento constructivo introduce en la viga unas tensiones residuales que obviamente condicionarán la posterior respuesta tenso-deformacional de la misma. Ambos efectos pueden ocasionar que la capacidad última de la viga ensayada sea menor que la capacidad última obtenida mediante el modelo.

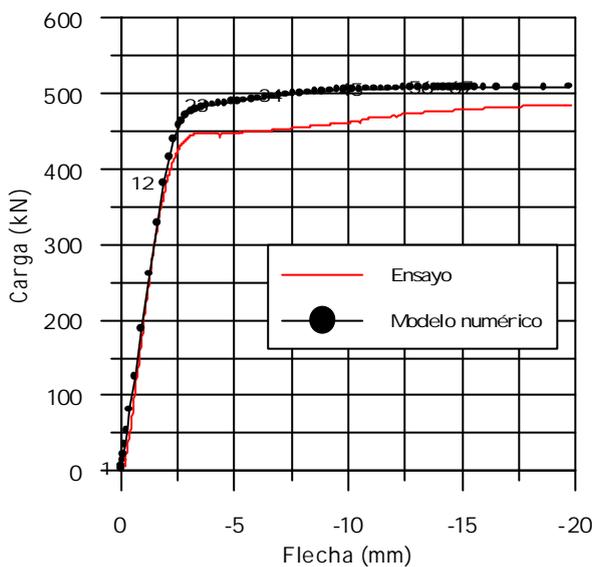


Figura 7-6. Curvas carga-flecha experimental y numérica, viga ad2w4.

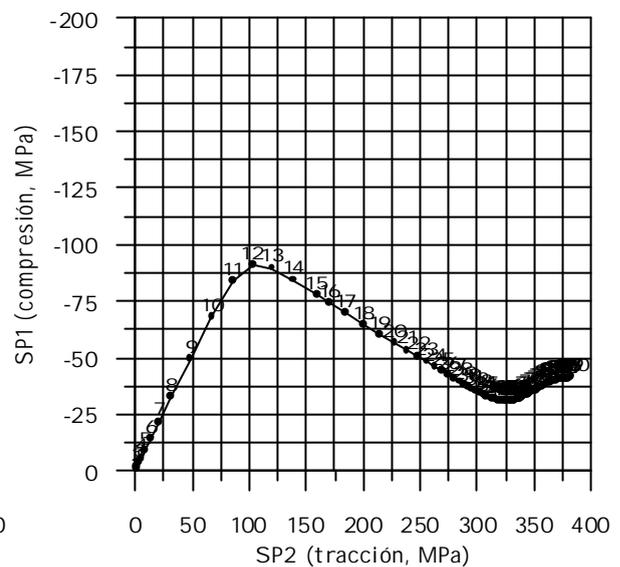


Figura 7-7. Tensiones principales en el punto central, viga ad2w4.

Por otra parte, cabe señalar que en esta viga aparece la no linealidad geométrica antes que la no linealidad del material. Observando la curva carga-flecha se aprecia una pérdida de linealidad en el incremento 12, que coincide exactamente con el instante en el que se produce un cambio de comportamiento en la relación entre tensiones principales. En dicho instante, el valor de la carga aplicada es de 381.5 kN, induciéndose una tensión de comparación de, aproximadamente, $\sigma_{co}=165.2$ MPa. Mirando la curva tensión-deformación para el material correspondiente a la chapa de 4mm, se observa que para este nivel de tensiones el material se encuentra en una fase prácticamente lineal. Es decir, en este caso, todavía no ha entrado en juego la no linealidad del material y el cambio de comportamiento debe atribuirse por tanto a la aparición de la no linealidad geométrica, y al inicio de la formación del campo diagonal.

Es de destacar aquí que ésta es la única viga en la que aparece antes la no linealidad geométrica que la no linealidad del material. Es decir, que la abolladura se produce en una fase en la que el comportamiento del material es prácticamente lineal. En todos los demás casos aparece, en mayor o menor medida, el efecto de la no linealidad del material acero inoxidable antes que la no linealidad geométrica.

A continuación se presentan las curvas correspondientes a las vigas con espesor de chapa de alma de 6 mm. Las Figuras 7-8 y 7-9 corresponden a la viga ad1w6 y las Figuras 7-10 y 7-11 a la viga ad15w6. En las curvas correspondientes a las tensiones principales del punto central del panel de alma se aprecia que el comportamiento de ambas vigas es cualitativamente distinto a las presentadas anteriormente.

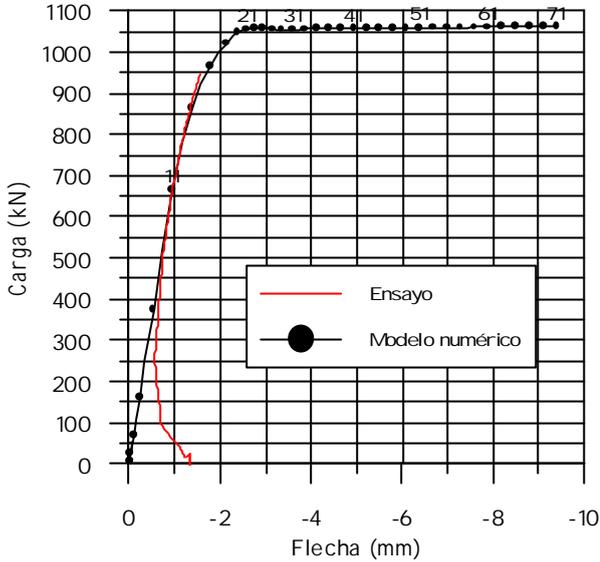


Figura 7-8. Curvas carga-flecha experimental y numérica, viga ad1w6.

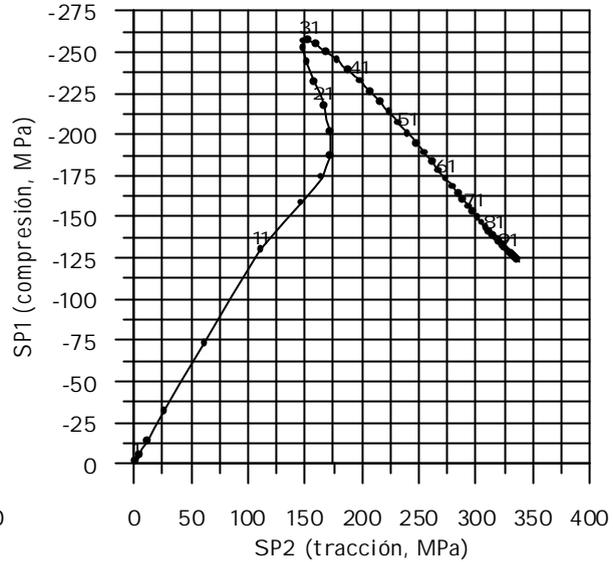


Figura 7-9. Tensiones principales en el punto central, viga ad1w6.

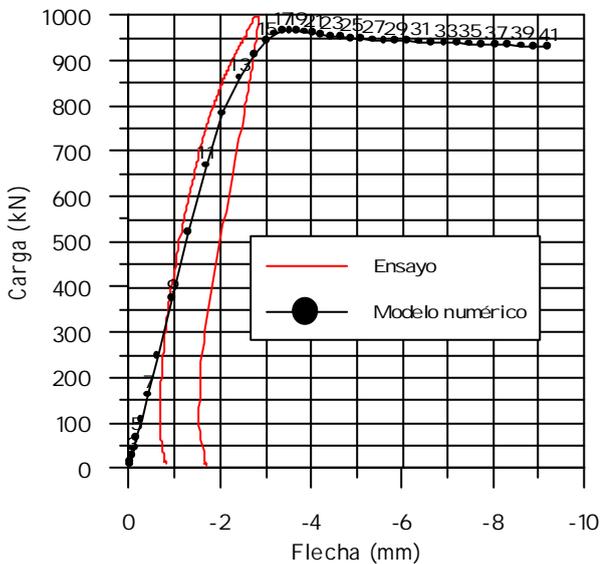


Figura 7-10. Curvas carga-flecha experimental y numérica, viga ad15w6.

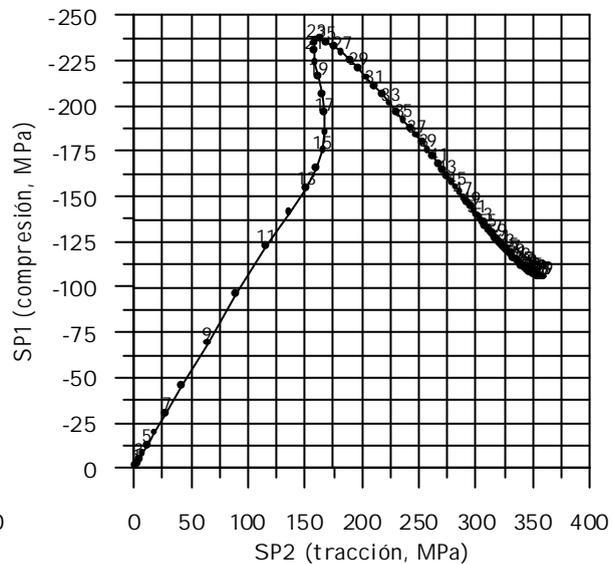


Figura 7-11. Tensiones principales en el punto central, viga ad15w6.

En la curva carga-flecha de la viga ad15w6 (ver Figura 7-10) se pierde la linealidad en el incremento 11, instante en el cual el punto central del alma se encuentra todavía en estado de corte puro, con lo que dicha pérdida de rigidez está asociada a la entrada en juego de la no linealidad del material. En la gráfica de tensiones principales (Figura 7-11) se aprecia un cambio de comportamiento en el incremento 15, pero en este cambio de comportamiento

aumentan las compresiones y no las tracciones. Esto es debido a que en el incremento 15 ya se ha alcanzado el límite elástico del acero inoxidable en varios puntos del alma. Observando la curva tensión-deformación para las chapas de 6 mm, presentada en el capítulo anterior (Figura 6-7), se obtiene que el límite elástico es $\sigma_{02}=323.4$ MPa, que para un estado de corte puro significa tener unas tensiones principales de valor $|sp1| = |sp2| = 186.7$ MPa.

El alma deja de absorber compresiones a partir de incremento 23, pero estudiando la curva carga-flecha en dicho instante se observa que la viga ya ha perdido carga. Esto indica que la plastificación del alma se ha producido en un estado de corte puro y que luego se ha desarrollado la no linealidad geométrica.

En las Figuras 7-12 y 7-13 se presentan los resultados correspondientes a la viga ad2w6. En este caso, la no linealidad del material aparece en el incremento 11 y el cambio de comportamiento en las tensiones aparece en el incremento 13.

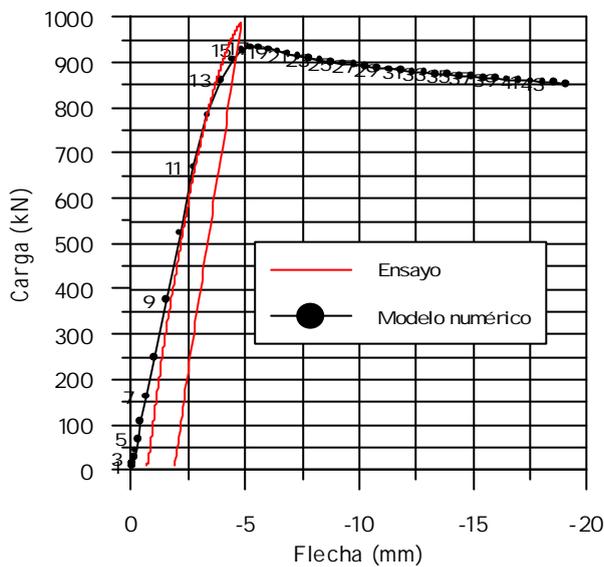


Figura 7-12. Curvas carga-flecha experimental y numérica, viga ad2w6.

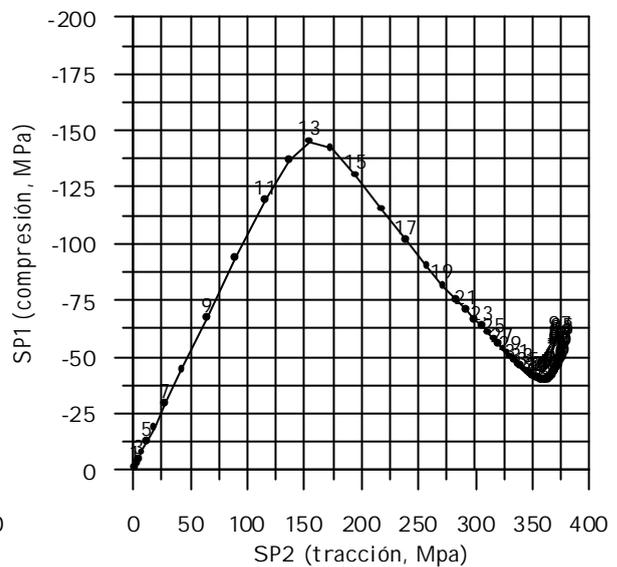
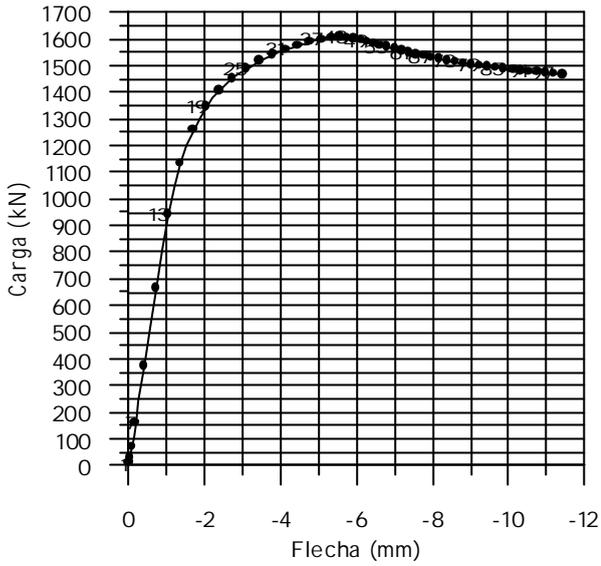


Figura 7-13. Tensiones principales en el punto central, viga ad2w6.

En las vigas con alma de 8 mm, el comportamiento es muy similar al de la viga ad15w6 presentada anteriormente. En todas ellas se produce la plastificación del alma antes de que entre en juego la no linealidad geométrica. En las Figuras 7-14 hasta 7-19 se presentan las curvas correspondientes a las vigas con alma de 8 mm. En estas vigas se reprodujeron cargas muy bajas durante los ensayos, con lo que se presentan solamente las curvas correspondientes al modelo numérico.

Debe señalarse que para la determinación de las flechas reales del ensayo, en las primeras vigas ensayadas en las que no se había dispuesto ningún transductor de desplazamiento en el apoyo, se han usado los datos correspondientes al transductor del apoyo del ensayo de otra viga con la misma relación a/d, suponiendo, que al ser la misma estructura de ensayo y de carga sobre la viga soporte, se comportará igual para los mismos niveles de carga.



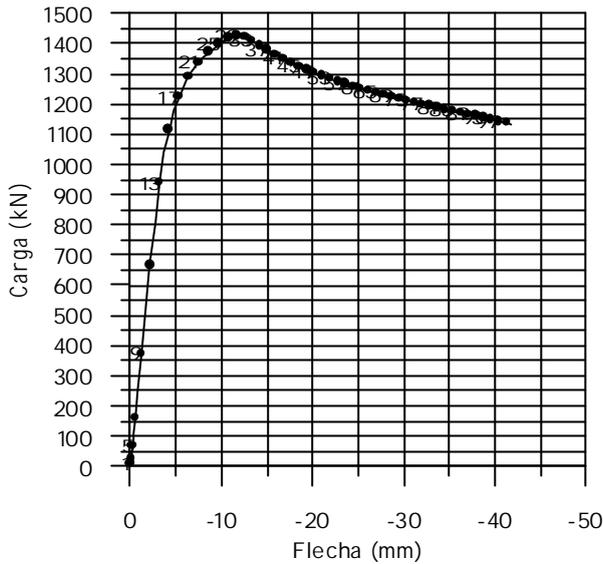


Figura 7-18. Curvas carga-flecha numérica viga ad2w8.

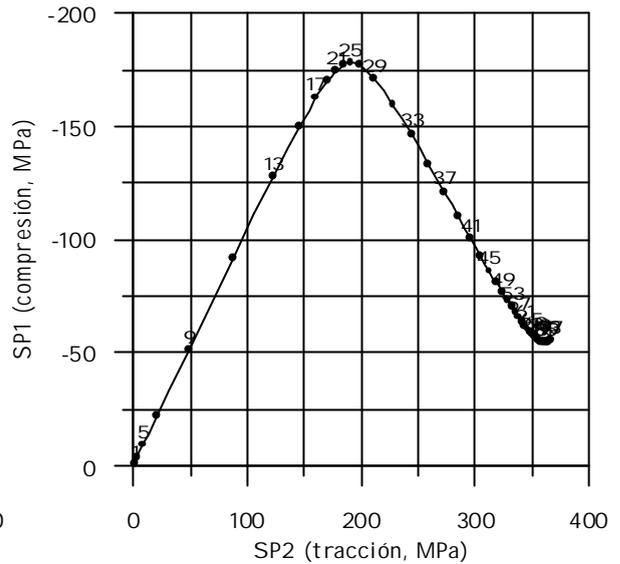


Figura 7-19. Tensiones principales en el punto central, viga ad2w8.

Un análisis de las vigas con relaciones de aspecto a/d de 0.5 pone de manifiesto que la evolución de las tensiones en el alma durante el proceso de carga es cualitativamente distinta a la evolución de las tensiones en los demás casos. En estas vigas existe una componente vertical de tensión, desde ya bajos niveles de carga, que desvirtúa el problema y no permite descomponer el comportamiento mediante un estado de corte puro acompañado de la posterior formación de un campo diagonal de tensiones. Es por ello que no se han utilizado los resultados de estas vigas (relaciones $a/d=0.5$) para analizar la abolladura por cortante en piezas de acero inoxidable, aunque se utilizarán posteriormente para la determinación de cargas últimas.

Finalmente, a modo de resumen puede decirse que el comportamiento de las vigas en función de su esbeltez (Tabla 7-1) es el siguiente:

Tabla 7-1. Esbeltez relativa \bar{I}_w de las vigas y comportamiento de las mismas.

Viga	Esbeltez relativa	Comportamiento
ad1w4	1.279	1° nlm, 2° nlg
ad15w4	1.465	1° nlm, 2° nlg
ad2w4	1.553	1° nlg, 2° nlm
ad1w6	0.932	Plastificación
ad15w6	1.068	Plastificación
ad2w6	1.131	1° nlm, 2° nlg
ad1w8	0.673	Plastificación
ad15w8	0.771	Plastificación
ad2w8	0.817	Plastificación

En la viga más esbelta (ad2w4) se produce la abolladura por no linealidad geométrica en el rango elástico, antes de que entre en juego la no linealidad del material. Las vigas ad1w4, ad15w4 y ad2w6 sufren un cambio de comportamiento en la relación carga-flecha en cuanto

entra en juego la no linealidad del material, aunque el punto central del alma se encuentra todavía en estado de corte puro y el alma deja de absorber compresiones para niveles de carga superiores en cuanto aparece la no linealidad geométrica. Finalmente, las vigas ad1w6, ad15w6, ad1w8, ad15w8 y ad2w8 plastifican prácticamente en estado de corte puro y la no linealidad geométrica entra en juego más allá de la capacidad resistente de la viga.

7.4.- ANÁLISIS DETALLADO DEL COMPORTAMIENTO HASTA ROTURA DE VIGAS ARMADAS DE ACERO INOXIDABLE.

El análisis general presentado en el apartado anterior ha puesto de manifiesto que existen tres comportamientos claramente diferenciados en las vigas ensayadas. Debido a la enorme cantidad de datos obtenidos para las doce vigas ensayadas a lo largo de toda la campaña experimental, se ha considerado oportuno presentar detalladamente el análisis de resultados de tres de las doce vigas con el fin de no cansar al lector exponiendo información repetida. Cada una de las vigas elegidas es representativa de uno de los tres modos de respuesta / comportamiento observados en los ensayos. En el siguiente capítulo se realizará un análisis general de todas las vigas, evaluando las cargas críticas de abolladura y las cargas últimas obtenidas experimentalmente, comparándolas con las obtenidas del modelo numérico y de la aplicación de la normativa.

Viga ad2w4

En esta viga se produce la abolladura en régimen lineal, de manera que luego se produce un incremento de capacidad de carga debido a la formación de un campo diagonal de tracciones "tension field" y a la formación de un mecanismo de marco por formación de rótulas en las alas y los rigidizadores. Estudiaremos, por tanto, la evolución del fenómeno a través de las gráficas correspondientes a las galgas de la viga, tanto en el ensayo como en el modelo numérico (Figura 7-20).

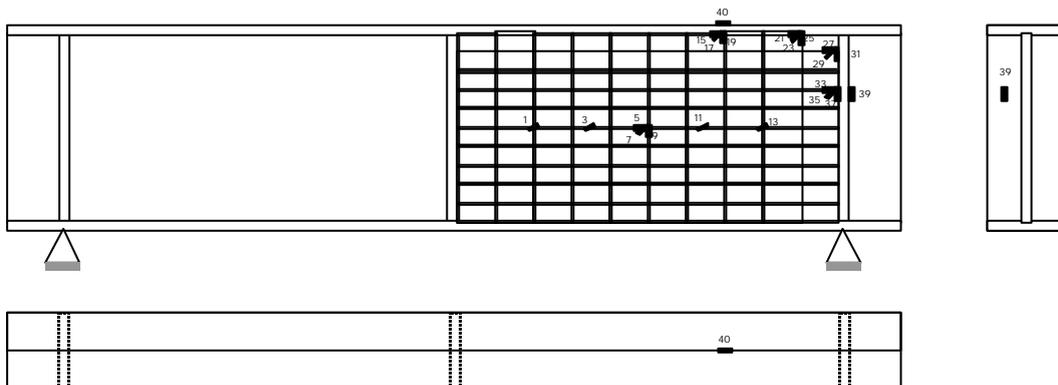


Figura 7-20. Esquema de instrumentación para la viga ad2w4.

En el apartado anterior se han presentado las gráficas correspondientes a las curvas carga-flecha del ensayo y del modelo numérico (Figura 7-6) y la gráfica de tensiones principales obtenidas mediante el modelo numérico en el punto central del alma de la viga (Figura 7-7).

Se ha comentado anteriormente que, en este caso, el modelo reproduce una respuesta algo más rígida que la que ofrece la viga ensayada. Mediante la observación directa de la curva

carga-flecha (Figura 7-6) se aprecia un cambio de comportamiento muy acusado en la evolución de la flecha en el incremento 12, correspondiente a un nivel de carga de 381.5 kN, con lo que se supone que este cambio de curvatura estará directamente relacionado con el momento en que tiene lugar la abolladura del panel del alma.

Por otro lado, la tensión tangencial en el alma puede calcularse, suponiendo una distribución uniforme de tensiones, como $\tau=(P/2)/(h*t_w)$. De este modo, se obtiene un valor de la tensión tangencial de $\tau = 95.4$ MPa. En este instante, el alma se encuentra sometida a un estado de cortante puro, y el valor de las tensiones principales es $|\sigma_t| = |\sigma_c| = \tau = 95.4$ MPa; el valor de la tensión de comparación es $\sigma_{co}=\sigma\sqrt{3}=165.2$ MPa.

Conocido el diagrama tensión-deformación del material (ver Figura 6-6) se puede concluir que, para este nivel de tensiones, el comportamiento del material se encuentra en una fase prácticamente lineal. Así, en el momento analizado todavía no ha entrado en juego la no linealidad del material, con lo que el cambio de comportamiento en la curva carga-flecha representada anteriormente (Figura 7-6) puede atribuirse directamente a la no linealidad geométrica de la viga. Puede establecerse este punto del proceso de carga como punto o instante en el que se desencadena la abolladura.

A partir de ese punto, conocido el valor aproximado de la carga para el cual abolla el alma, una valoración más precisa de la respuesta estructural de la viga requiere necesariamente un análisis tensional detallado. Dicho análisis se lleva a cabo estudiando los resultados derivados del modelo numérico (código Abaqus). Se realiza el análisis de las tensiones principales en el centro del alma de la viga (Figura 7-7), y se observa un cambio significativo en el comportamiento de las tensiones principales en el punto central del panel durante el proceso de carga.

En un primer período, el valor de las dos tensiones principales es igual y de signo contrario; la viga se encuentra, durante este intervalo de carga, sometida a un estado de corte puro. Dicho estado se mantiene hasta el incremento 12, instante en el que, para un valor de carga aplicada de 381.5 kN, las tracciones comienzan a crecer de manera significativa, mientras que las compresiones no sufren variaciones importantes. De esta forma, la carga crítica de abolladura es 381.5 kN, empezando a partir de este momento el desarrollo y evolución del campo diagonal de tracciones.

En la gráfica carga-flecha experimental correspondiente a la viga ensayada ad2w4 (Figura 7-21) la pérdida de linealidad se aprecia para una carga de aproximadamente 310 kN. Asimismo, en dicha gráfica se observa que una vez superada la carga de abolladura, la viga sigue absorbiendo carga, con lo que se verifica la formación de un nuevo mecanismo resistente.

A continuación se estudia la evolución de las deformaciones de las galgas en el punto central del panel del alma. La Figura 7-22 muestra la evolución de las deformaciones de flexión y de membrana en el centro del panel, a partir de las lecturas de deformaciones de las galgas 9 y 10 (ver Figura 7-20). Se observa que la componente de flexión aumenta de forma muy significativa para valores de carga próximos y superiores al valor de la carga que produce la abolladura.

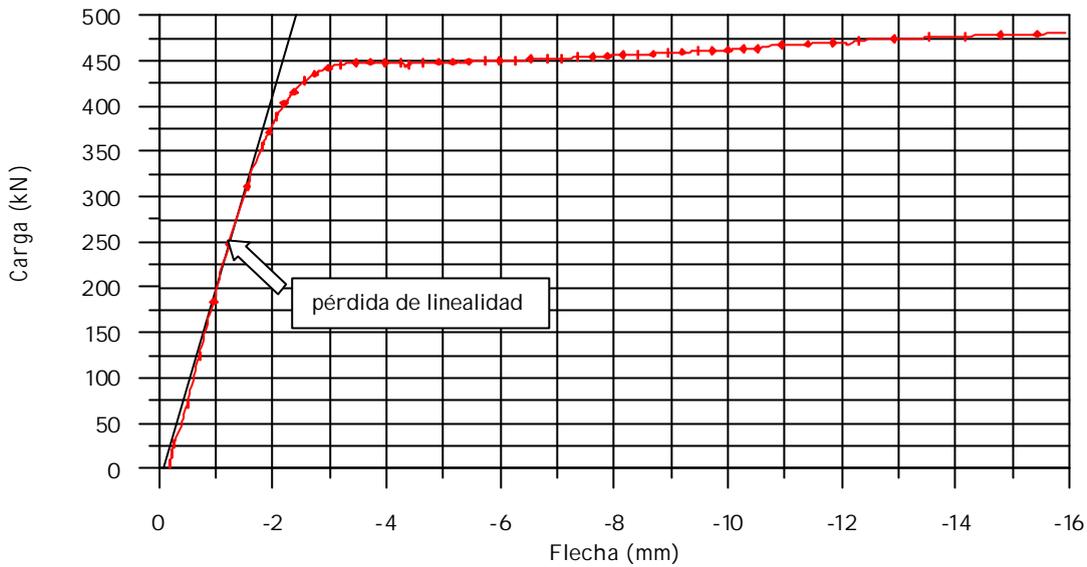


Figura 7-21. Curva carga-flecha experimental de la viga ad2w4.

Mediante los datos recogidos por las galgas 7 y 8 se puede conocer la deformación de membrana en una dirección a 45°, y, al tener los resultados de deformaciones en tres direcciones, puede calcularse la deformación principal de membrana a tracción (Figura 7-23). En dicha figura se marcan instantes de tiempo coincidentes en ambas curvas durante el ensayo y se observa como al principio del ensayo las deformaciones principales están a 45° ya que las deformaciones calculadas como deformaciones principales coinciden con las deformaciones medidas por las galgas 7 y 8. A medida que aumenta la carga y empieza a desarrollarse el "tension field" aumentan las deformaciones principales de tracción.

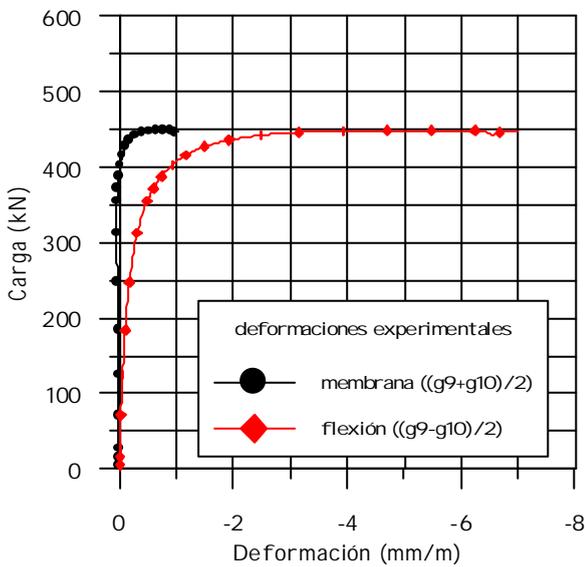


Figura 7-22. Deformaciones experimentales de membrana y de flexión en el centro del panel.

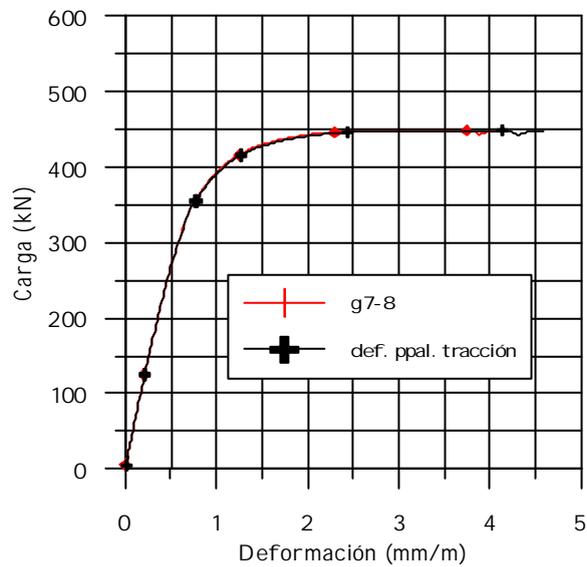


Figura 7-23. Deformaciones de membrana principales de tracción y a 45°.

La evolución del campo diagonal de tracciones, y del estado tensional del panel, se refleja de forma clara en la Figura 7-24. En dicha figura se presenta un esquema de las galgas situadas en la línea media horizontal del panel y las curvas correspondientes a las deformaciones de membrana medidas por dichas galgas, situadas todas ellas en la dirección de la diagonal. Así,

las galgas 1, 2, 13 y 14 corresponden a la diagonal extrema, las galgas 3, 4, 11 y 12 corresponden a la diagonal media, y las deformaciones principales de la roseta central (galgas 5, 6, 7, 8, 9 y 10) corresponden a la diagonal central.

En la gráfica puede verse que al principio del ensayo el comportamiento de todas ellas es muy similar, pues nos encontramos ante un estado de corte puro. Conforme aumenta el nivel de carga aplicada, se ve que se pierde la homogeneidad de deformaciones en todas ellas, especialmente a partir de la carga para la que se produce la abolladura (381.5 kN). En este momento es la galga central la que registra el mayor nivel de deformaciones hasta el final del ensayo. Las demás galgas miden deformaciones de forma continua durante todo el proceso de carga que son mayores cuanto más próximas se encuentran al centro del panel. Estos resultados confirman que, al ser la curva tensión-deformación del material monótona creciente, durante la evolución del campo diagonal de tracciones se producen simultáneamente dos fenómenos: se incrementa el ancho de la banda y las tensiones aumentan en todos los puntos. Así, los valores máximos de tensiones aparecen en el eje central de la banda tendiendo a un estado tensional con una distribución simétrica respecto de dicho eje.

Este fenómeno de ampliación de la banda diagonal de tracciones hacia la zona central y el cambio de inclinación de las deformaciones principales se aprecia también en el modelo numérico.

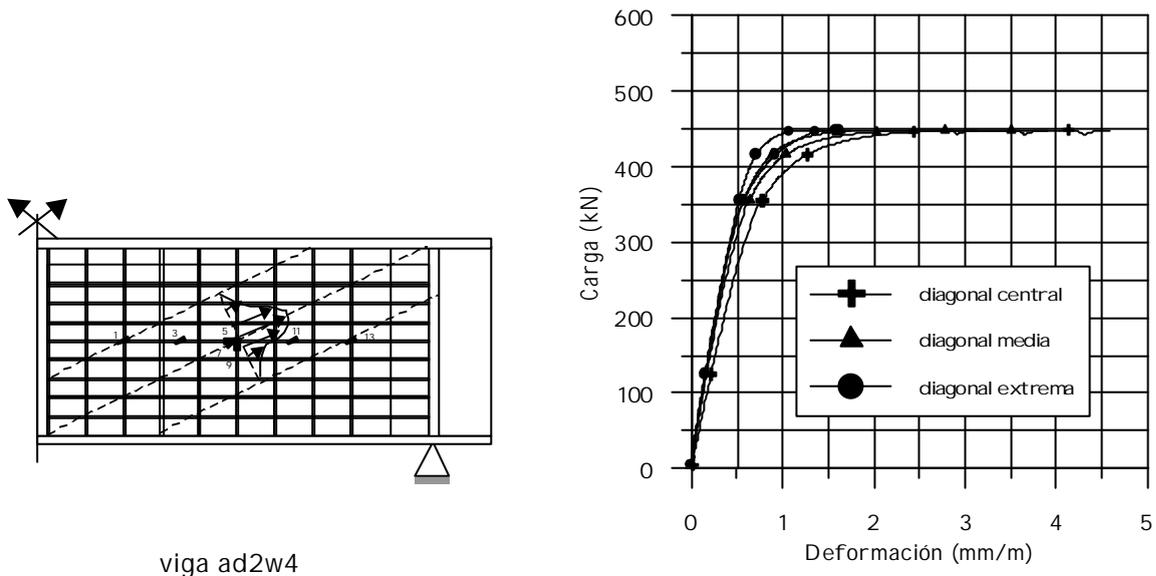


Figura 7-24. Deformaciones de membrana en la línea media horizontal, viga ad2w4.

A partir de los resultados de deformaciones medidos en una roseta se puede conocer, además del valor de las deformaciones principales de tracción y compresión, el ángulo que forman las direcciones principales con la posición de la galga. De este modo, si se calculan las deformaciones de membrana para cada pareja de galgas de la roseta (horizontal = ϵ_{mh} , diagonal = ϵ_{m45} , vertical = ϵ_{mv}) se puede obtener:

$$\theta_{p,q} = \frac{1}{2} \arctg \left[\frac{(\epsilon_{m45} - \epsilon_{mv}) - (\epsilon_{mh} - \epsilon_{m45})}{\epsilon_{mh} - \epsilon_{mv}} \right] \quad [7-3]$$

El análisis de la evolución de estos ángulos para cada una de las rosetas estudiadas corrobora las conclusiones extraídas del análisis de modo que, durante los estados de corte puro, las

direcciones principales de deformación forman 45° con la horizontal, mientras que, en cuanto aparece el fenómeno de la abolladura, se aprecia un cambio en la dirección de las tensiones. Dicho cambio se manifiesta de manera que el ángulo de inclinación se va tendiendo cada vez más hasta colocarse en la dirección de la diagonal geométrica del panel.

El campo diagonal de tracciones continúa su evolución mientras las alas y los rigidizadores permiten el anclaje de las tracciones que se desarrollan en el alma. Para estudiar este efecto de anclaje se analizan los resultados de deformaciones medidas en las galgas situadas en el rigidizador y en el ala respectivamente y las deformaciones medidas en las rosetas situadas en el extremo del panel.

Se analizan en primer lugar los resultados obtenidos en la roseta situada en la zona lateral inferior del panel de alma (galgas 33, 34, 35, 36, 37 y 38) (ver Figura 7-20). Tal y como se ha comentado anteriormente, el análisis de tensiones en la roseta debe realizarse a través del modelo numérico previa comparación con las deformaciones principales del ensayo. La Figura 7-25 muestra la evolución de las tensiones principales en el punto en el que está situada la roseta. En esta figura se observa que a partir del incremento 20, correspondiente a una carga de 482.5 kN, se produce un cambio en el comportamiento tensional de modo que dejan de aumentar las tensiones principales de compresión y se incrementan considerablemente las tracciones. Este aumento de las tensiones principales de tracción indica que en dicho punto se produce el anclaje del campo diagonal de tracciones.

Este efecto de anclaje del campo diagonal se refleja también en la gráfica correspondiente a las deformaciones de la galga 39 situada a la misma altura en el rigidizador (ver Figura 7-20). La Figura 7-26 muestra las curvas carga-deformación de la galga situada en el rigidizador durante el ensayo y del punto correspondiente en el modelo numérico. Puede determinarse que el campo se ancla en dicho punto durante el ensayo para una carga de 448.1 kN.

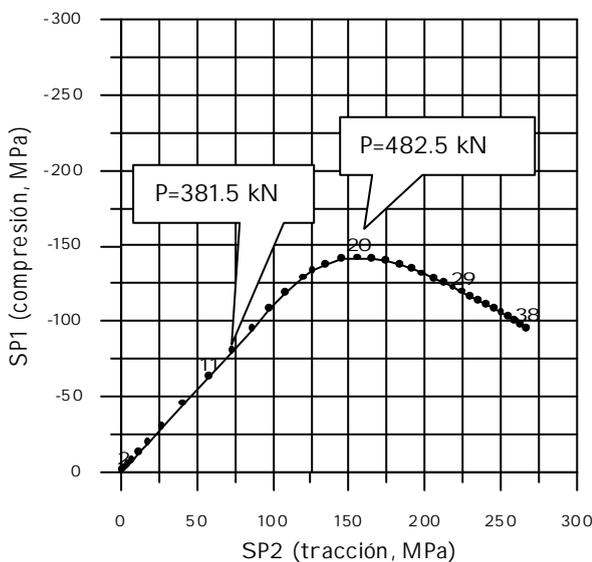


Figura 7-25. Tensiones principales en la roseta lateral inferior, viga ad2w4.

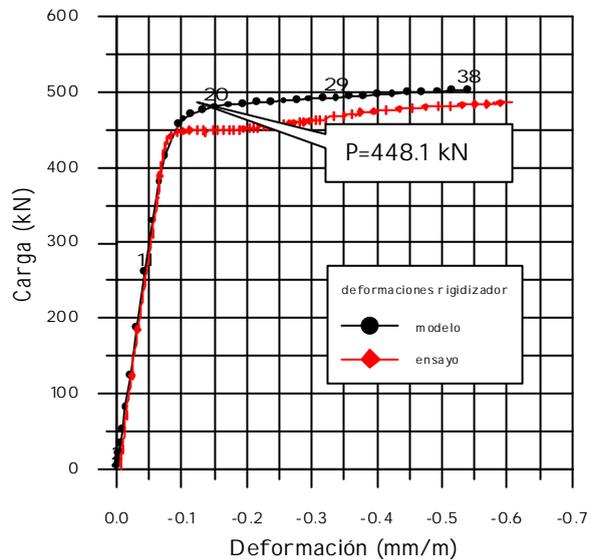


Figura 7-26. Curva carga-deformación de la galga del rigidizador, viga ad2w4.

Asimismo, este efecto del anclaje del campo de tracciones queda reflejado en las curvas carga-flecha del modelo y del ensayo (Figura 7-27).

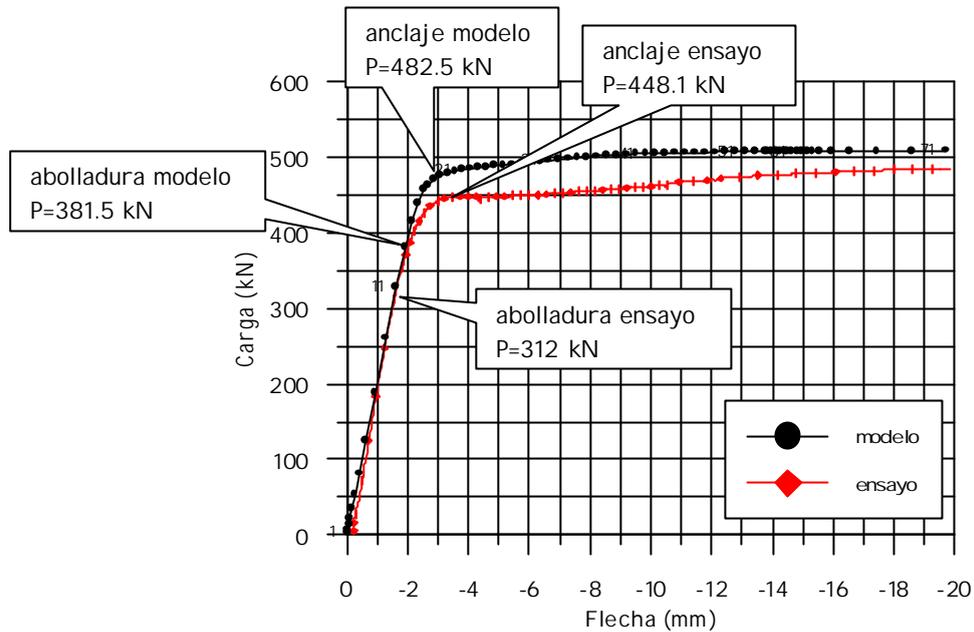


Figura 7-27. Curvas carga-flecha experimental y numérica, viga ad2w4.

Las deformaciones medidas en las rosetas más cercanas a la esquina superior derecha del panel son similares a las deformaciones medidas por la roseta estudiada anteriormente; no obstante, las deformaciones medidas por las galgas, al estar más próximas a la esquina revelan que el anclaje del campo diagonal tiene efecto con un cierto retraso con respecto a lo observado anteriormente.

La roseta superior izquierda (galgas 15, 16, 17, 18, 19 y 29) (ver Figura 7-20) y la galga situada a la misma altura en el ala superior (galga 40) (ver Figura 7-20) proporcionan información adicional que corrobora el comportamiento descrito anteriormente.

Las Figuras 7-28 y 7-29 muestran la evolución de las tensiones principales en el punto en el que está situada la roseta indicada y la curva carga-deformación correspondiente a la galga del ala. En ellas se observa que el campo diagonal se ancla aproximadamente para el mismo valor de la carga (incremento 20) que en las galgas estudiadas anteriormente. La deformación (tensión) en el ala va aumentando de forma gradual hasta el instante en el que se produce el anclaje (incremento 20) desarrollándose entonces un aumento considerable de las deformaciones.

Entonces el comportamiento de la viga armada pasa a ser similar al de una celosía, con lo que se reduce el módulo resistente de la viga y el ala, que empieza a trabajar como cordón comprimido, aumenta considerablemente sus compresiones. A partir de este instante, se empiezan a formar rótulas plásticas en las alas y en el rigidizador hasta que la viga colapsa.

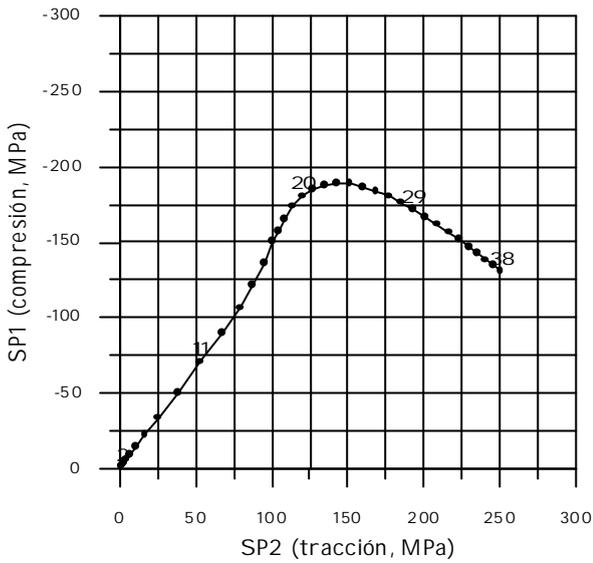


Figura 7-28. Tensiones principales en la roseta superior izquierda, viga ad2w4.

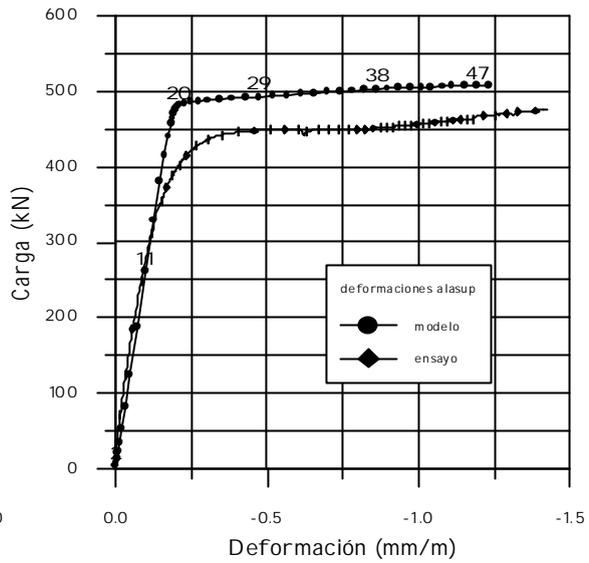


Figura 7-29. Curva carga-deformación de la galga del ala, viga ad2w4.

Como ya se ha ido comentando a lo largo del capítulo, el modelo numérico ha reproducido de manera muy satisfactoria todos los ensayos. En la Figura 7-30 se muestra, a modo de ejemplo, una fotografía del estado de la viga ad2w4 al final del ensayo, junto con la imagen de la deformada del modelo en la misma situación.

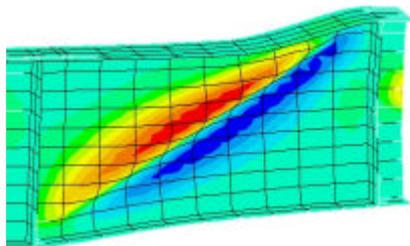


Figura 7-30. Deformada numérica y experimental de la viga ad2w4 al final del proceso de carga.

Viga ad15w4

A continuación se analiza, de forma algo más resumida, el comportamiento y respuesta de la viga ad15w4 (Figura 7-31) en la que, como se ha comentado anteriormente, entra en juego la no linealidad del material antes de producirse la inestabilidad del alma por no linealidad geométrica.

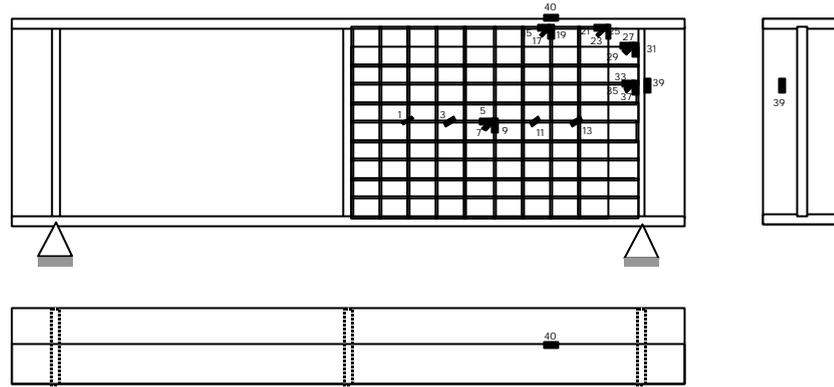


Figura 7-31. Disposición de la instrumentación en la viga ad15w4.

En las Figuras 7-4 y 7-5 del apartado anterior puede apreciarse que la curva carga-flecha pierde la linealidad en el incremento 11, correspondiente a un valor de la carga aplicada de 464.3 kN, y que las tensiones principales en el punto central de la placa cambian de comportamiento en el incremento 16, para un valor de la carga aproximadamente igual a 506.2 kN. En el incremento 11, la tensión de comparación es $\sigma_{co}=200$ MPa, valor a partir del cual se pierde la linealidad en la curva tensión-deformación del material.

A partir de este instante, hasta que entra en juego la no linealidad geométrica (incremento 16) se forma un campo diagonal en el alma como consecuencia de las redistribuciones producidas por la no linealidad del material. El punto central del alma se mantiene en un estado de corte puro (Figura 7-5), pero al igual que en el caso anterior las galgas situadas en la línea media del alma demuestran que el comportamiento no es uniforme, sino que en el centro del alma aparecen tensiones mayores que en los extremos.

Por otro lado, cabe destacar que entre los incrementos 11 y 16, el campo diagonal mantiene las tensiones principales a 45° , y que empiezan a inclinarse, en la dirección de la diagonal en cuanto entra en juego la no linealidad geométrica (incremento 16) y se forma el campo diagonal de tracciones.

La evolución de las tensiones y deformaciones en el alma debidas a la formación del campo diagonal a partir de ese instante es similar al expuesto para la viga ad2w4. A continuación se presentan las curvas correspondientes a las rosetas de las esquinas y a las galgas situadas en el ala superior y en el rigidizador.

Las Figuras 7-32 y 7-33 corresponden a la evolución de las tensiones principales en los puntos en los que están situadas las rosetas superior izquierda y lateral inferior del alma, en las que primero se ancla el campo diagonal (incremento 20) (ver Figura 7-31).

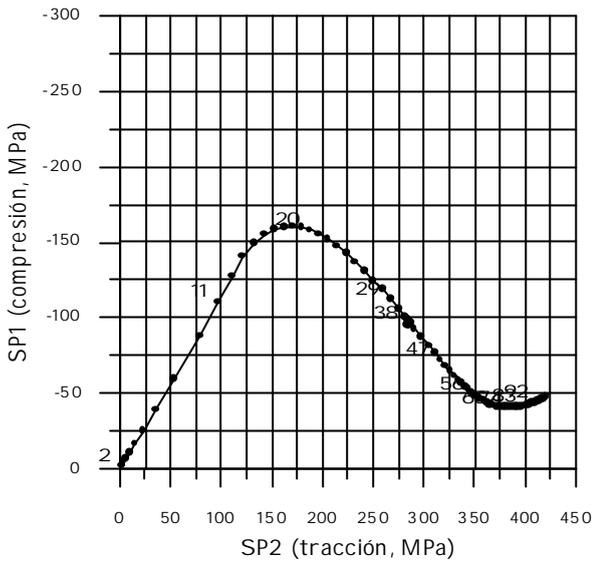


Figura 7-32. Tensões principais na roseta superior esquerda, viga ad15w4.

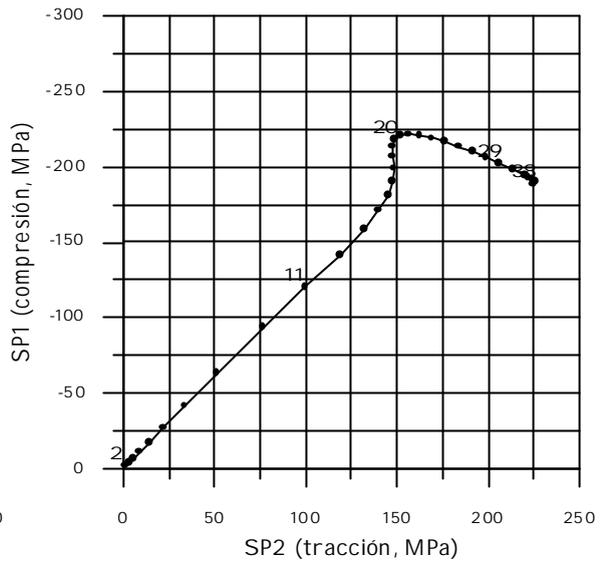


Figura 7-33. Tensões principais na roseta lateral inferior, viga ad15w4.

Las siguientes figuras (Figuras 7-34 y 7-35) muestran las tensiones principales en los puntos que están situadas las rosetas superior derecha y lateral superior, más cercanas a la esquina y en las que el anclaje del campo diagonal se produce para niveles de carga superiores (incremento 23).

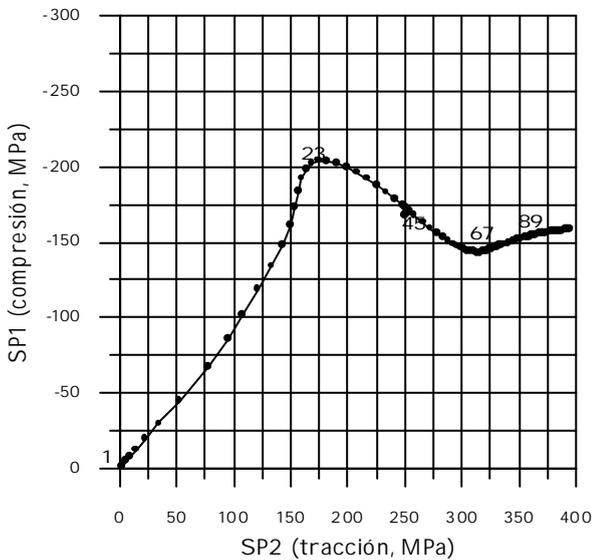


Figura 7-34. Tensões principais na roseta superior direita, viga ad15w4.

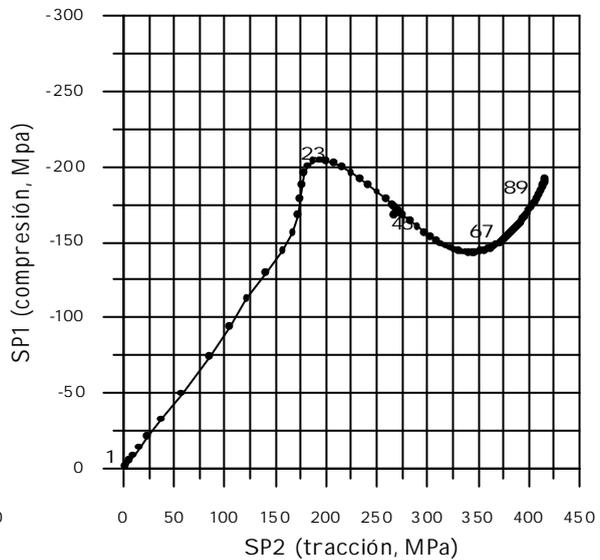


Figura 7-35. Tensões principais na roseta lateral superior, viga ad15w4.

Las curvas carga-deformación de las galgas situadas en el ala superior y en el rigidizador se muestran en las Figuras 7-36 y 7-37 respectivamente.

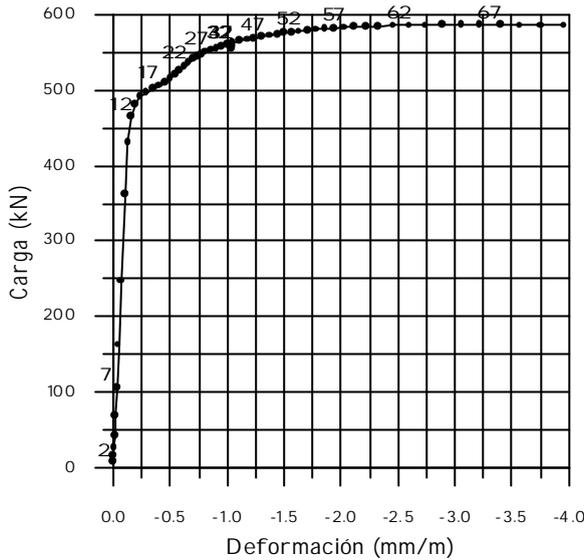


Figura 7-36. Curva carga-deformación de la galga del ala superior, viga ad15w4.

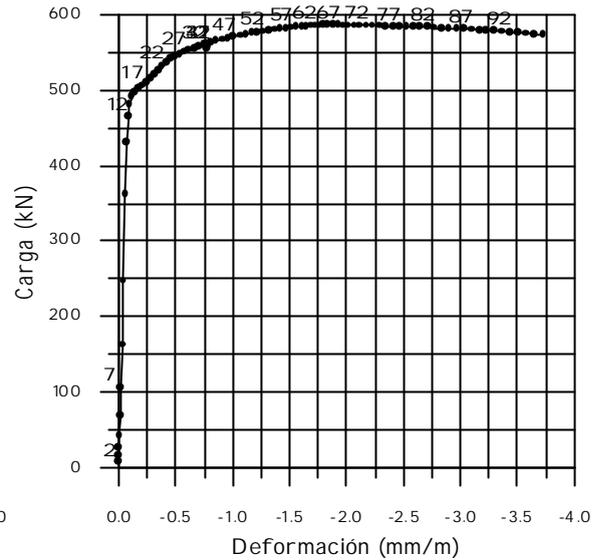


Figura 7-37. Curva carga-deformación de la galga del rigidizador, viga ad15w4.

Del análisis de estas curvas se desprende que, durante la formación del campo diagonal debido a no linealidad del material entre los incrementos 11 y 16, se aprecia un cambio de comportamiento en las galgas situadas los elementos de anclaje (alas y rigidizadores). En el incremento 20 aparece el efecto del anclaje del campo diagonal en el punto en el que se encuentran las rosetas, situadas a la altura de las galgas estudiadas; en el incremento 23 se observa también un cambio de comportamiento debido al anclaje del campo diagonal en las esquinas y al inicio, por tanto, de la formación del mecanismo de marco.

Viga ad15w8

El esquema de instrumentación utilizado para esta viga (Figura 7-38) responde al de un estado de corte puro para el alma de la misma.

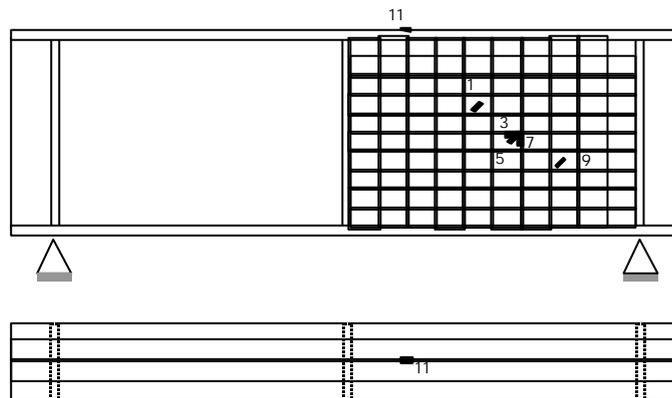


Figura 7-38. Disposición de la instrumentación en la viga ad15w8

Tal y como se ha comentado en el apartado anterior, en esta viga se produce la plastificación del alma antes de que entre en juego la no linealidad geométrica, es decir ante un estado de corte puro. Este comportamiento queda perfectamente reflejado en las curvas carga-flecha y en las curvas de tensiones principales presentadas anteriormente en las Figuras 7-16 y 7-17.

7.5.- CONCLUSIONES.

Del análisis cualitativo y cuantitativo de la evolución de las tensiones en las vigas ensayadas se desprenden las siguientes conclusiones.

En vigas armadas de acero inoxidable, a diferencia de las vigas de acero al carbono, la no linealidad del diagrama tensión-deformación del material hace que las tensiones, en la banda diagonal de tracciones formada después de la abolladura durante el desarrollo de un nuevo mecanismo resistente, sean variables alcanzándose el valor máximo en la línea diagonal central del panel de alma.

Para vigas suficientemente esbeltas, en las que entra en juego la no linealidad geométrica antes que la no linealidad del material, el comportamiento del alma hasta que aparece la abolladura es muy parecido al de las vigas de acero al carbono.

Para vigas en las que se produce la plastificación del alma en un estado de corte puro hay que tener en cuenta el efecto de la no linealidad del material en la curva carga-flecha, no entrando en juego la no linealidad geométrica.

En las vigas en las que aparece la no linealidad del material antes que la no linealidad geométrica se forma un primer campo diagonal, con una inclinación de 45° , debido a la redistribución de tensiones por no linealidad del material y posteriormente un segundo campo diagonal debido a la formación de un nuevo mecanismo resistente cuando el alma deja de absorber compresiones debido a los efectos de la no linealidad geométrica. Este segundo campo diagonal se va inclinando hasta coincidir con el ángulo de inclinación la diagonal geométrica del panel.