

## *Capítulo 9*

# **CONCLUSIONES**

### **9.1.- RESUMEN Y CONCLUSIONES GENERALES.**

El acero inoxidable está siendo utilizado de manera creciente en los últimos años en los sectores de la industria y de la arquitectura gracias a su resistencia a la corrosión, facilidad de mantenimiento y apariencia agradable. Sin embargo, su empleo como material estructural resistente 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. Esta limitación ha inspirado a investigadores de todo el mundo a estudiar el comportamiento del material acero inoxidable y desarrollar nuevas expresiones de diseño para explotar de manera óptima las propiedades del material en aplicaciones resistentes.

El objetivo principal de este trabajo es contribuir al avance del conocimiento del acero inoxidable como material estructural, analizando el comportamiento en servicio y la evolución hasta rotura de estructuras de acero inoxidable trabajando fundamentalmente a flexión. Dicho objetivo principal queda plasmado en forma de posibles pautas de actuación y expresiones de diseño que permitan dimensionar tales estructuras de una manera eficiente.

El trabajo se centra en el estudio del comportamiento de piezas de acero inoxidable sometidas a flexión, ya que una de las funciones principales que puede exigirse al acero inoxidable es la de trabajar como material estructural de piezas flectadas. El estudio se ha enfocado, por un lado, hacia el cálculo de flechas y las correspondientes verificaciones frente al estado límite de deformabilidad y, por otro lado, hacia el estudio del comportamiento en estado límite último frente a cortante y la determinación de un mecanismo resistente que considere las peculiaridades del material acero inoxidable.

Se han realizado dos campañas experimentales sobre elementos estructurales de acero inoxidable en las que se ha caracterizado el comportamiento real del material utilizado en cada ensayo y se han instrumentado las vigas para poder medir las flechas y las deformaciones que se producen en diferentes puntos de las estructuras ensayadas durante los procesos de aplicación de carga.

La utilización de un modelo numérico basado en el método de los elementos finitos ha servido para proporcionar un mejor conocimiento sobre los fenómenos estudiados y poder optimizar la instrumentación utilizada durante los ensayos. El modelo numérico tiene en cuenta la ecuación constitutiva real del material, determinada experimentalmente, de modo que se pueden simular los ensayos y comparar los resultados numéricos y experimentales. Una vez validado el modelo numérico se utiliza de manera sistemática para generar una base de datos suficientemente amplia sobre la que establecer nuevas expresiones de diseño.

La información proporcionada por la instrumentación en las vigas ensayadas ha permitido observar el comportamiento no lineal del acero inoxidable y alcanzar una serie de conclusiones relativas al dimensionamiento de este tipo de estructuras. Los resultados experimentales han permitido observar también que las actuales expresiones de dimensionamiento de las normativas para estructuras de acero inoxidable son muy conservadoras.

Tras la realización de las campañas experimentales y la modelización de los ensayos mediante la utilización del modelo numérico se ha realizado un minucioso análisis de los resultados obtenidos y un profundo estudio del comportamiento de las estructuras ensayadas, de modo que se ha llegado a las siguientes conclusiones generales.

La no linealidad de la relación tensión-deformación del material complica el cálculo preciso de flechas en elementos de acero inoxidable ya que, en general, será necesario recurrir al uso de herramientas de análisis no lineal que dificultan el diseño. El cálculo de flechas mediante la utilización de un único valor del módulo de elasticidad secante a lo largo de todo el elemento propuesto en Eurocódigo 3, Parte 1-4 (1996), tiende a sobrestimar las flechas, dando lugar a dimensionamientos conservadores frente a estados límite de deformaciones.

Se propone una metodología de cálculo de flechas considerando la no linealidad del material, la cual se basa en una expresión analítica que permite obtener el diagrama momento-curvatura de una sección transversal de acero inoxidable. También se ha obtenido una expresión del módulo de elasticidad equivalente, representativo del comportamiento global de la viga, de manera que a partir de dicho valor y utilizando las expresiones habituales de cálculo lineal, se puede determinar la flecha máxima en vigas de acero inoxidable con suficiente precisión.

Para el dimensionamiento a cortante de vigas de acero inoxidable es necesario tener en cuenta los aspectos diferenciales que introduce la no linealidad del diagrama tensión-deformación del acero inoxidable frente al acero al carbono. En acero inoxidable, la abolladura tiene lugar siempre dentro del régimen no lineal del material y el comportamiento postcrítico está igualmente afectado por dicha no linealidad, provocando una pérdida de capacidad resistente.

Los estudios realizados en este campo han conducido a la elaboración de nuevas expresiones de diseño para la determinación de cargas críticas iniciales en chapas de acero inoxidable. Asimismo se propone un método de dimensionamiento de vigas armadas de acero inoxidable sometidas a cortante basado en el método del campo diagonal de tracciones para acero al carbono.

Finalmente se plantean, resultantes de la propia evolución del conocimiento sobre el tema de estudio durante el período de experimentación y análisis, futuras líneas de trabajo en el campo del comportamiento a flexión de las estructuras de acero inoxidable.

## **9.2.- CONCLUSIONES ESPECÍFICAS.**

Al final de cada capítulo se han ido exponiendo las conclusiones más importantes derivadas de los estudios realizados en dicho capítulo. A continuación se presentan, de forma conjunta, dichas conclusiones específicas, obtenidas como resultado del trabajo realizado en cada uno de los capítulos de que consta la investigación.

### **9.2.1.- Campaña experimental de vigas de acero inoxidable a flexión. Determinación de flechas.**

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 (1996). 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 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.

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.

### 9.2.2.- Dimensionamiento de vigas de acero inoxidable frente al estado límite de deformaciones.

El estudio de las diferencias obtenidas en el cálculo de flechas, utilizando distintos métodos de análisis, permite concluir que calcular la flecha linealmente con el módulo de elasticidad secante de la sección más solicitada conlleva un error al considerar un módulo de elasticidad menor al que correspondería a dicha sección, que luego se extrapola a toda la viga y que conduce a diferencias considerables en el valor de las flechas. Cuanto más uniforme es la ley de momentos menos error se comete en las demás secciones ya que las solicitaciones son más parecidas.

El análisis del comportamiento de una sección transversal de acero inoxidable, bajo la aplicación de un momento flector, permite concluir que el cálculo de flechas en vigas de acero inoxidable, mediante expresiones lineales de teoría clásica y usando un módulo de elasticidad secante determinado linealmente tiende a sobrestimar las flechas. Ello es debido, entre otras cosas, a que la tensión máxima determinada linealmente es mayor que la tensión máxima real y por tanto le corresponde un módulo de elasticidad secante menor que conduce a valores de flecha superiores.

Se propone una metodología de cálculo de flechas considerando la no linealidad del material, la cual se basa en una expresión analítica que permite obtener el diagrama momento-curvatura de una sección transversal cualquiera de piezas de acero inoxidable (eq. [5-6]).

$$\chi = \frac{M}{E_0 I} + \chi_p \left( \frac{M}{M_{02}} \right)^{n-1} \quad ; \quad \chi_p = \frac{2}{h} \left( \frac{\sigma_{02}}{E_0} + 0.002 \right) - \frac{M_{02}}{E_0 I}$$

en donde  $\chi_p$  la curvatura plástica asociada a  $M_{02}$  y  $M_{02}$  es el momento que genera una tensión máxima igual al límite elástico convencional ( $f_y = \sigma_{02}$ ).

La utilización de esta fórmula no sólo permite obtener una estimación de las flechas mucho más ajustada a la realidad, sino que además permite determinar con suficiente precisión el nivel de tensiones al que está sometida la sección analizada. Dicha expresión se ajusta muy bien a los resultados derivados de los ensayos experimentales efectuados y a los resultados obtenidos de la aplicación de modelos numéricos para diferentes secciones transversales y distintos tipos de acero. Los errores cometidos en la determinación de la curvatura son menores del 5%, y ello es así para cualquier nivel de tensiones en cualquier sección y con todos los tipos de acero recogidos en Eurocódigo 3, Parte 1-4 (1996).

Se presenta además una expresión que permite calcular el momento  $M_{02}$  de manera analítica, para secciones transversales en doble T y secciones transversales tubulares rectangulares, que son las secciones transversales utilizadas de forma más habitual en el conjunto de vigas de acero inoxidable:

$$M_{02}=(M_{02.alas}+M_{02.alma})/1.05 \quad [5-14]$$

En esta expresión  $M_{02.alas}$  y  $M_{02.alma}$  pueden determinarse a través de las expresiones [5-7] y [5-8] respectivamente.

$$M_{02.alas} = \sigma_{02} e_f (b - e_w)(h - e_f)$$

$$M_{02.alma} = 2 \int_0^{h/2} \sigma(z) z dA = 2 \int_0^{h/2} (A\chi^2 z^3 + B\chi z^2) e_w dz = h^3 \chi e_w \left( \frac{A\chi h}{32} + \frac{B}{12} \right)$$

$$A = \frac{-0.002E_0}{\epsilon_{02}^2} = \frac{-0.002E_0}{\left( \frac{\sigma_{02}}{E_0} + 0.002 \right)^2}$$

$$B=E_0$$

$$\chi = \chi_{02} = \frac{\epsilon_{02}}{\left( \frac{h}{2} \right)} = \frac{2}{h} \left( \frac{\sigma_{02}}{E_0} + 0.002 \right)$$

En el caso de secciones esbeltas es necesario, en primer lugar, clasificar la sección y posteriormente obtener expresiones para determinar el ancho eficaz de los elementos comprimidos y definir así la geometría de las secciones desde el punto de vista resistente.

En materiales no lineales como el acero inoxidable, sin un límite elástico claramente diferenciado, no es completamente aplicable el concepto de clasificación de secciones. La resistencia de la sección debe determinarse a través de curvas momento-rotación y estudiar la evolución del comportamiento hasta rotura independientemente de la clasificación de la sección. La utilización de la herramienta del diagrama momento-curvatura será adecuada para reproducir el comportamiento seccional y las condiciones de ductilidad y rotación de la pieza en función de la esbeltez de los elementos que la constituyen.

La utilización del diagrama momento-curvatura permite obtener flechas en vigas de acero inoxidable considerando la no linealidad del material. En el caso de vigas isostáticas en las que la ley de curvaturas sea fácilmente integrable, se pueden obtener directamente expresiones analíticas de la flecha; los demás casos se resuelven fácilmente mediante la utilización de modelos de análisis no lineal en los que se incluya la expresión del diagrama momento-curvatura.

En los casos en los que para la determinación de flechas no se quiera recurrir a modelos de análisis no lineal se ha obtenido una expresión del módulo de elasticidad equivalente, representativo del comportamiento global de la viga, de manera que a partir de dicho valor y utilizando las expresiones habituales de cálculo lineal, se puede determinar la flecha máxima en vigas de acero inoxidable con suficiente precisión.

La expresión del módulo de elasticidad equivalente es (eq. [5-12]):

$$E_{eq} = E_{m\chi}^s \left( 1 + k \left( \frac{\sigma}{\sigma_{02}} \right)^{n-1} \right)$$

siendo  $E_{m\chi}^s$  el módulo de elasticidad secante de la sección más solicitada determinado mediante el diagrama M- $\chi$  y k un coeficiente que depende del tipo de viga (carga y condiciones de contorno) y del tipo de acero.

Se han determinado diferentes valores del coeficiente k para un número elevado de casos, los más habituales en la práctica, incluyendo hipótesis de combinación de acciones.

**Tabla 5-4. Coeficientes k para aceros S220 y S480.**


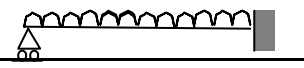
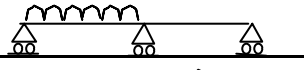

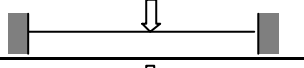
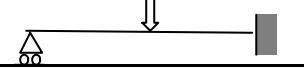
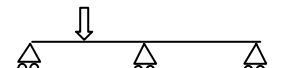
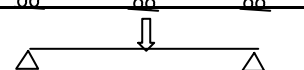
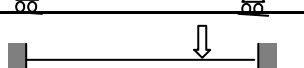
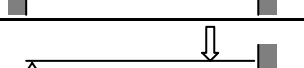
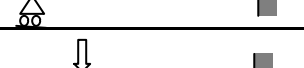
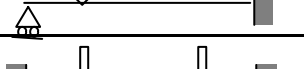
Viga	S220- <b>Dk =0.25</b>		S480- <b>Dk =0.1</b>	
		<b>k</b>		<b>k</b>
	r1	1.25	r1b	0.6
	r2	1.25	r2b	0.6
	cr	0.75	crb	0.3
	r3	0.5	r3b	0.2
	p1	0.75	p1b	0.4
	p2	1.0	p2b	0.5
	cp	1.0	cpb	0.5
	p3	0.75	p3b	0.4
	pd1	1.25	pd1b	0.6
	pd2	1.25	pd2b	0.6
	pd3	1.0	pd3b	0.4
	2p1	1.25	2p1b	0.6

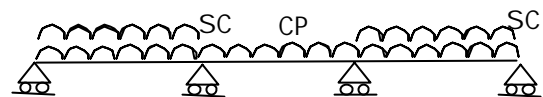
Tabla 5-5. Coeficientes k para aceros S220 y S480, en vigas continuas de dos y tres vanos con sobrecarga.

2 vanos - S220	
SC	k
$0.00CP \leq SC \leq 0.35CP$	1.25
$0.35CP < SC \leq 0.85CP$	1.00
$0.85CP < SC \leq 1.35CP$	0.75
$1.35CP < SC \leq 3.75CP$	0.50
$3.75CP < SC \leq 4.00CP$	0.75

3 vanos - S220	
SC	k
$0.00CP \leq SC \leq 0.10CP$	1.00
$0.10CP < SC \leq 0.25CP$	0.75
$0.25CP < SC \leq 0.95CP$	0.50
$0.95CP < SC \leq 4.00CP$	0.75

2 vanos - S480	
SC	k
$0.00CP \leq SC \leq 0.20CP$	0.6
$0.20CP < SC \leq 0.60CP$	0.5
$0.60CP < SC \leq 1.15CP$	0.4
$1.15CP < SC \leq 4.00CP$	0.3

3 vanos - S480	
SC	k
$SC = 0.00CP$	0.5
$0.00CP < SC \leq 0.20CP$	0.4
$0.20CP < SC \leq 4.00CP$	0.3



Asimismo, se realiza un estudio de la aplicación de otros métodos de cálculo de flechas algo más simples que el aquí propuesto, llegando a la conclusión de que, a pesar de que proporcionan resultados ajustados de flechas, los valores de tensión y deformación que se utilizan para su determinación no informan adecuadamente del estado tensional de las piezas en régimen de servicio.

### 9.2.3.- Campaña experimental de vigas armadas de acero inoxidable a flexión. Agotamiento por cortante.

Los resultados obtenidos experimentalmente se ajustan muy bien a los resultados derivados de la aplicación de un modelo numérico, que se han utilizado para la preparación de la campaña experimental. Esto permitirá, en el siguiente capítulo, utilizar los resultados numéricos y experimentales para realizar análisis más detallados del comportamiento de las vigas.

La materialización física de elementos como los aparatos de apoyo, la viga de entrega de carga, y en definitiva todos los detalles influye en la reproducción correcta de las condiciones de contorno del fenómeno que se quiere estudiar.

En campañas experimentales en las que se prevea alcanzar cargas elevadas, y las rigideces de los elementos que trabajan a flexión sean comparables a las rigideces de los elementos auxiliares del ensayo, es necesario utilizar transductores de desplazamiento para localizar posibles descensos de apoyo.

Los tablonos de madera del panel no instrumentado cumplieron con el objetivo de impedir los desplazamientos del alma fuera de su plano. El grado de efectividad dependía en gran parte del grado de encaje de la madera entre los rigidizadores y el alma.

Por último, cabe destacar que el hecho de que en algunos casos, la onda de abolladura se propagará más allá del rigidizador, se debía a la falta de capacidad resistente del mismo para permitir el anclaje completo del campo diagonal de tracciones.

#### **9.2.4.- Análisis de resultados de la campaña experimental de vigas armadas de acero inoxidable a flexión. Agotamiento por cortante.**

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 de la diagonal geométrica del panel.

#### **9.2.5.- Agotamiento por cortante. Dimensionamiento de vigas.**

El factor de reducción plástica que mejor aproxima los resultados de cargas críticas iniciales de abolladura en placas de acero inoxidable apoyadas en los cuatro lados es  $\eta=(G_t/G_0)^{1/2}$ . La aproximación con dicho factor de reducción plástica no depende de la relación de aspecto de la placa y varía muy poco con el tipo de acero inoxidable utilizado.

La expresión propuesta en Eurocódigo 3, Parte 1-4 (1996) para la determinación de la carga crítica inicial de abolladura se obtiene a partir de la aproximación de la curva derivada de la utilización de un factor de reducción plástica  $\eta=(G_t/G_0)$  y proporciona valores excesivamente conservadores.

Se define una expresión de la tensión crítica inicial de abolladura en placas de acero inoxidable apoyadas en los cuatro lados, que aproxima la curva derivada de la utilización del factor de reducción plástica  $\eta=(G_t/G_0)^{1/2}$ . La tensión crítica inicial de abolladura  $\tau_{bb}$  se determinará según las expresiones de la Tabla 8-4.



**Tabla 8-4. Formulación propuesta para la determinación de la tensión crítica inicial de abolladura  $t_{bb}$ .**

Esbeltez relativa	$t_{bb}$
$\bar{\lambda}_w \leq 0.4$	$(f_y / \sqrt{3})$
$0.4 < \bar{\lambda}_w \leq 0.9$	$[1 - 0.7(\bar{\lambda}_w - 0.4)](f_y / \sqrt{3})$
$0.9 < \bar{\lambda}_w \leq 2.2$	$\left[ \frac{3.9 - \bar{\lambda}_w}{2.1 + 2.8\bar{\lambda}_w} \right] (f_y / \sqrt{3})$
$\bar{\lambda}_w > 2.2$	$(1/\bar{\lambda}_w^2)(f_y / \sqrt{3})$

El estudio de la influencia de las alas en el comportamiento de las placas de acero inoxidable bajo solicitaciones de cortante ha permitido observar que la evolución de las tensiones en la placa, una vez desencadenada la abolladura, depende entre otras cosas del grado de empotramiento entre la placa y las alas y los rigidizadores.

Se determinan las cargas últimas a cortante en vigas de acero inoxidable derivadas de la aplicación del método del campo diagonal de tracciones propuesto en Eurocódigo 3, Parte 1-1 (1993) para acero al carbono, adaptado al acero inoxidable. La adaptación al acero inoxidable se basa principalmente en utilizar las mismas expresiones de diseño que las propuestas para acero al carbono (Eurocódigo 3, Parte 1-1) pero considerando las características mecánicas y las cargas críticas iniciales de abolladura del acero inoxidable.

La comparación de los resultados derivados de la aplicación de estos métodos permite concluir que:

- El modelo numérico aproxima muy bien los resultados experimentales en los ensayos en los que se alcanzó la carga última.
- Los resultados obtenidos al aplicar el método del campo diagonal de tracciones adaptado al acero inoxidable con la expresión de la carga crítica inicial de abolladura que propone Eurocódigo 3, Parte 1-4 (Campo diagonal 1) y con las expresiones de carga crítica inicial propuestas en este trabajo (Campo diagonal 2) son tanto más parecidos cuanto mayor es la esbeltez del alma de la viga. Ello es así porque la diferencia entre la carga crítica inicial de abolladura de Eurocódigo 3, Parte 1-4 y la propuesta en este trabajo disminuye al aumentar la esbeltez.
- El método que mejor aproxima los resultados numéricos y experimentales es el que se basa en las expresiones de tensión crítica inicial de abolladura propuestos anteriormente (Campo diagonal 2).
- La curva propuesta por Eurocódigo 3, Parte 1-4 (1996) para el dimensionamiento de vigas de acero inoxidable sometidas a cortante, basada en el método postcrítico simple, es muy conservadora porque no tiene en cuenta la contribución de las alas en la resistencia última de las vigas armadas sometidas a cortante.
- El método rotacional proporciona valores del cortante último inferiores a los derivados de la aplicación del campo diagonal de tracciones propuesto en este trabajo. Las diferencias

entre ambos métodos disminuyen a medida que disminuye la esbeltez de las piezas. En cualquier caso, la evolución de las tensiones una vez formada la banda diagonal juega un papel importante en la determinación de la capacidad última de la viga.

- Para todos los métodos presentados, se observa la existencia de una cierta relación lineal entre la resistencia última a cortante y la esbeltez relativa para almas de vigas con el mismo espesor y diferentes relaciones de aspecto  $a/d$ .
- En las vigas con relaciones de aspecto  $a/d=0.5$  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. El mismo efecto influye en las hipótesis del método rotacional.
- El campo diagonal de tracciones desarrollado al entrar en juego la no linealidad del material tiene una inclinación de  $45^\circ$  respecto a la horizontal, y en cuanto aparece la no linealidad geométrica, el campo va girando hasta alcanzar, en las vigas estudiadas, la diagonal geométrica del panel debido a la falta de capacidad portante del rigidizador. Este efecto se ha observado tanto en las vigas ensayadas, en las que se determina la inclinación del campo diagonal a partir de los datos recogidos por las rosetas centrales del alma, como en los resultados de las vigas del modelo numérico.

Una vez analizados los resultados de las vigas estudiadas y comparados los distintos métodos de determinación de cargas últimas a cortante en vigas armadas de acero inoxidable se puede concluir que el método de determinación de cortante último que proporciona mejores resultados es el método basado en el campo diagonal de tracciones adaptado al acero inoxidable.

El análisis presentado ha puesto de manifiesto que en los paneles de alma de vigas armadas de acero inoxidable se desarrolla un campo diagonal debido a la no linealidad del material antes de que aparezca la no linealidad geométrica cuando la abolladura se produce en régimen anelástico y que en la banda diagonal de tracciones formada después de la abolladura durante el desarrollo de un nuevo mecanismo resistente, las tensiones son variables alcanzándose el valor máximo en la línea diagonal central del panel de alma.

### **9.3.- PERSPECTIVAS FUTURAS.**

Una vez finalizada la investigación se han puesto de manifiesto diversas líneas de trabajo en las que se podría trabajar en el futuro para avanzar hacia un mejor y más amplio conocimiento del acero inoxidable como material estructural resistente. En esta línea se han empezado a desarrollar trabajos de investigación materializados en tesinas y en una tesis doctoral. Los aspectos fundamentales en los que se debería avanzar son:

- Utilización sistemática de la fórmula propuesta para la determinación del diagrama momento-curvatura en las secciones transversales de acero inoxidable para establecer el grado de veracidad de la misma. Adaptación de la formulación propuesta al caso de secciones simplemente simétricas, plásticas y compactas.

- Acotar los errores máximos cometidos en la determinación del coeficiente  $M_{02}$  (momento flector actuante en la sección cuando la tensión máxima alcanza el límite elástico) en función de la variación de las dimensiones de la sección transversal.
- Desarrollar modelos que determinen la relación momento-rotación de una sección como alternativa para estudiar la evolución del comportamiento hasta rotura, y predecir la resistencia última independientemente de la clasificación de la sección en materiales con comportamiento no lineal como el acero inoxidable o el aluminio. Utilizar el diagrama momento-curvatura para reproducir el comportamiento seccional y las condiciones de ductilidad y rotación de la pieza en función de la esbeltez de los elementos que la constituyen.
- Utilización del diagrama momento-curvatura y del módulo de elasticidad secante equivalente para el cálculo no lineal de flechas en vigas de acero inoxidable acotando las diferencias máximas producidas frente a métodos de cálculo no lineales para diferentes estados de carga.
- Llevar a cabo un estudio más extenso de la adaptación al acero inoxidable del método del campo diagonal de tracciones, analizando el efecto de la no linealidad del material cuando la abolladura se produce en régimen anelástico, la formación del campo diagonal de tracciones debido a la no linealidad geométrica, el estado tensional del alma de la viga y el ancho de banda de tracciones teniendo en cuenta la influencia de las alas y los rigidizadores en todo el proceso. Determinar las cargas críticas iniciales de abolladura en paneles de alma considerando el grado de empotramiento de la misma y determinar la carga última en vigas armadas de acero inoxidable bajo sollicitaciones de cortante.
- Paralelamente se propone el planteamiento de futuras campañas experimentales para el ensayo de paneles más esbeltos y con elementos de anclaje con mayor capacidad para resistir el anclaje de las tracciones del campo diagonal de tracciones y poder determinar el ángulo de inclinación de la banda diagonal. Estudiar la influencia de la esbeltez del alma en la fatiga de la misma producida por el fenómeno de respiración del alma y determinar las flechas y la resistencia seccional frente a esfuerzos de flexión contemplando la posible interacción con el cortante.

