

Capítulo 2

ESTADO DEL ARTE

2.1.- INTRODUCCIÓN.

El acero inoxidable es un material relativamente joven, que apareció hace menos de un siglo, y cuyas cualidades estéticas y de mantenimiento lo han convertido en sinónimo de construcción moderna. Su resistencia a la corrosión ha hecho de él un material muy versátil con aplicaciones en diferentes campos como la alimentación, la medicina y la automoción, entre otros.

Dentro del campo de la ingeniería civil y de la arquitectura, el acero inoxidable ofrece prestaciones de resistencia, ductilidad y resistencia al fuego tan buenas como otros materiales más comúnmente empleados en construcción. Sin embargo, la no linealidad de su comportamiento tenso-deformacional hizo que tardaran en aparecer recomendaciones de diseño para el uso del acero inoxidable como material estructural. Este retraso en la publicación de normativas se reflejó también en las realizaciones estructurales, que a principios de siglo aparecían básicamente como revestimiento sin capacidad portante.

Las primeras normativas sobre acero inoxidable se basaban en las reglas de diseño establecidas para acero al carbono, resultando en algunos casos demasiado conservadoras. En la última década se ha impulsado el estudio del comportamiento estructural del material y se han desarrollado reglas de diseño para explotar todo su potencial en construcción.

2.2.- EVOLUCIÓN HISTÓRICA DEL CONOCIMIENTO Y SITUACIÓN ACTUAL.

2.2.1.- Introducción.

Los aceros inoxidables son un producto típico del siglo XX y vieron la luz en las vísperas de la primera guerra mundial (Di Caprio, 1987). A continuación se presenta una breve descripción histórica de la aparición de dichos aceros y de las investigaciones relativas al comportamiento estructural de los mismos. Finalmente se presentan las investigaciones actuales más relevantes referentes al empleo del acero inoxidable como material resistente.

2.2.2.- Evolución histórica.

El inventor del acero inoxidable, Harry Brearley (Figura 2-1), nació en Sheffield, Inglaterra en 1871. Hijo de familia relacionada con el mundo de la siderurgia, se convirtió con los años en un experto conocedor del acero y de su producción.



Figura 2-1. Harry Brearley (www.tilthammer.com/bio/brear.html).

Una vez consolidada su reputación para resolver problemas metalúrgicos, fundó, en 1908, los Brown Firth Laboratories, con el fin de investigar sobre temas relacionados con el acero, bajo la financiación de las compañías líderes del sector en Sheffield.

En 1912, un pequeño productor de armas le pidió ayuda para resolver los problemas de erosión que se producían en el interior de los rifles a causa del calor y de los gases. Brearley empezó a buscar un acero con mayor resistencia a la erosión y no a la corrosión. Decidió entonces estudiar aceros con algún contenido en cromo, ya que tenían un punto de fusión superior al de los aceros ordinarios.

Entonces empezaron a producirse aleaciones de acero con diferentes contenidos en carbono y entre 6 y 15% de cromo. La primera colada industrial de acero inoxidable de tipo martensítico con adición exclusiva de cromo (0.24% carbono y 12.8% cromo) se efectuó el 13 de agosto de 1913. Brearley, siguiendo con sus investigaciones, descubrió que el nuevo acero era muy resistente a los ataques químicos y a los ácidos de comida como el vinagre y el limón.

En esa época, los utensilios de cocina eran de hierro o de níquel plateado. Los cuchillos eran de acero al carbono y debían lavarse cuidadosamente después de cada utilización para evitar que se estropearan. Brearley se dio cuenta inmediatamente de que su nuevo acero podría revolucionar la industria de la cubertería, así que consiguió fabricar cuchillos en una empresa local llamada R.F Mosley. Brearley llamó a su invento "rustless steel" debido a las propiedades inoxidables del mismo, y fue Ernest Stuart, el director de la empresa Mosley, quien se refirió por primera vez a los cuchillos como "stainless", después de fracasar en sus intentos por mancharlos con vinagre. De todos modos, el término correcto debería ser el de aceros resistentes a la corrosión.

Durante ese mismo año, la empresa alemana Krupp estaba investigando los efectos de la adición de níquel a la fundición. El acero resultante era más resistente a los ácidos, más dúctil y fácil de trabajar que el de Brearley, así que los investigadores de Krupp no tardaron en apropiarse del descubrimiento. El 17 de octubre y el 20 de diciembre de 1912 el metalúrgico Pasel de la empresa Krupp solicitó en Alemania dos patentes (concedidas posteriormente en 1918 con los números 304 126 y 304 159) en las que se habla de aceros inoxidable austeníticos al 18% de cromo y 8% de níquel. Los aceros inoxidable ferríticos con adición de cromo, son presentados en 1914, en EE.UU., por el investigador Dantsizen de la General Electric.

La presentación al público de estos materiales tuvo lugar en la Exposición de Malmö, donde los metalúrgicos Maurer y Strauss de la Krupp exponen los primeros aceros inoxidable producidos a escala industrial, basados en los estudios de Pasel.

La Primera Guerra Mundial supuso un paro en las investigaciones, pero a principios de los años 20 se realizaron una gran variedad de aleaciones con diferentes combinaciones de cromo y níquel. El sucesor de Brearley al frente de los Brown Firth Laboratories, el Dr W.H. Hatfield, patentó varias aleaciones de acero inoxidable todavía utilizadas por el sector metalúrgico.

La mayoría de las aleaciones que se utilizan actualmente se inventaron entre 1913 y 1935 en Inglaterra, Alemania, América y Francia. Una vez aceptadas las aleaciones, la investigación se concentró en hallar métodos de producción más económicos y popularizar el uso del material acero inoxidable. A pesar de que los esfuerzos por hallar nuevas aleaciones decrecieron, después de la Segunda Guerra Mundial se desarrollaron nuevos tipos con relaciones peso/resistencia mejores para los aviones, lo cual permitió desarrollar los grados de endurecimiento por precipitación.

A partir de 1970 se empezaron a desarrollar los aceros inoxidable Dúplex. Estos aceros tienen mayor resistencia a la corrosión y mayor resistencia mecánica que los desarrollados en 1920 y suponen el futuro para el crecimiento del empleo del acero inoxidable como material estructural (www.worldsteel.org/issf).

Las primeras aplicaciones, además de la cuchillería ya citada, aparecieron en el sector de los motores de combustión interna, en el que se empleaban para la construcción de válvulas durante la primera guerra mundial, mientras que su aplicación en otros sectores se inició en torno al año 1920; su desarrollo prosigue todavía en nuestros días. La aparición de los aceros inoxidable fue precedida por casi un siglo de estudios y tentativas, a veces infructuosas, de las que se deben destacar, además de las ya citadas, las realizadas por el francés Berthier, los ingleses Faraday y Stodard, quienes alrededor de 1820 llevaron a cabo las primeras experiencias de hierro y cromo, los franceses Brustlein, Chevenard y Portevin, el alemán Monnartz, los ingleses Giesen y Hatfield y los norteamericanos Armstrong, Baur, Becket y Haynes (Di Caprio, 1987).

Los avances efectuados han propiciado que los aceros inoxidable se utilicen actualmente en un gran número de aplicaciones como son el almacenamiento de productos alimentarios, contenedores de gases y aceites, industria nuclear, equipamiento médico, implantes, automóviles y arquitectura y construcción. Actualmente la producción de acero inoxidable representa un 2% aproximadamente de la producción total de acero (Olsson, 1998a).

En España cobra cierta importancia la fabricación de productos largos (barras y pletinas) en acero inoxidable a finales de los años 50 y principios de los 60. Destacan por su especialización las empresas Olarra, S.A y Roldan, S.A. En 1970 inicia su actividad la Compañía Española para la fabricación del Acero Inoxidable "Acerinox", dedicada a la fabricación de productos planos. Esta empresa ha mantenido desde su fundación un ambicioso plan de inversiones hasta lograr ocupar, hoy en día, uno de los primeros puestos mundiales del sector (Di Caprio, 1987).

Las primeras referencias a estudios del comportamiento mecánico del acero inoxidable aparecen, de forma puntual, en la década de los años 50 y 60 en el ámbito de la ingeniería aeronáutica y en reuniones técnicas sobre hierro y acero (Hill, 1944), (Hammer y Petertson, 1955) y (Lula, 1965).

Aunque el acero inoxidable ya se estaba utilizando en aplicaciones arquitectónicas gracias a sus cualidades estéticas y de mantenimiento, su utilización como material con capacidad portante estaba limitada debido, entre otras cosas, a la falta de normativas y especificaciones de diseño.

El American Iron and Steel Institute (AISI) inició un proyecto de investigación en la Cornell University en 1963, bajo la dirección de George Winter, para proporcionar las bases de diseño necesarias para la utilización del acero inoxidable en aplicaciones estructurales (Johnson y Kelsen, 1969), del que deben destacarse la tesis doctoral de Johnson (1967) y el artículo (Johnson y Winter, 1966).

En base a estas investigaciones y a la experiencia del grupo en estructuras de acero al carbono conformadas en frío, se publicó, en 1968, la primera normativa relativa al empleo estructural de perfiles conformados de acero inoxidable "Specification for the Design of Light Gage Cold-formed Stainless Steel Structural Members" (AISI, 1968).

Ese mismo año la American Society for Testing Materials (ASTM) realiza en California un Simposium sobre el acero inoxidable para uso en arquitectura, en el que se presentan los últimos trabajos de investigación y las últimas tendencias en aplicaciones (ASTM, 1968).

Dado que la norma AISI de 1968 sólo hacía referencia a determinados aceros inoxidables y que la utilización de nuevos grados de endurecimiento iba aumentando debido a su mayor resistencia, Wang y Errera continuaron sus investigaciones en la Cornell University con el objetivo de obtener normas de diseño para estos grados superiores. De entre los artículos publicados durante dicha investigación puede destacarse el escrito por Wang, Errera y Winter en 1975 (Wang et al., 1975). También se llevaron a cabo estudios sobre el comportamiento de uniones soldadas y atornilladas en elementos estructurales de acero inoxidable (Errera et al., 1970) y (Errera et al. 1974). Como resultado de toda la investigación, se publica en 1974 una nueva edición de la norma "Specification for the Design of Cold-formed Stainless Steel Structural Members" (AISI, 1974).

En 1987 y 1988 se publican las tesis doctorales de Van der Merwe (Van der Merwe, 1987), en la University of Missouri-Rolla y Van den Berg (Van den Berg, 1988) en la Rand Afrikaans University en Johannesburgo, South Africa, abriéndose nuevos caminos en las investigaciones relativas al comportamiento estructural del acero inoxidable en EEUU y en Sudáfrica (Yu, 1991).

En la Universidad de Missouri-Rolla se publican una serie de informes técnicos desarrollados por S-H Lin, W-W Yu, T.V. Galambos, (Lin, et al., 1988a), (Lin, et al., 1988b) y (Lin, et al., 1989). Los trabajos de investigación, tanto experimentales como numéricos, eran relativos al comportamiento estructural de vigas de acero inoxidable, y fueron realizados por Lin, Yu y Galambos, Van der Merwe y Van den Berg y Rasmussen y Hancock. Dichos trabajos fueron la base de la actual normativa publicada por el ASCE "Specification for the Design of Cold-formed Stainless Steel Structural Members" (ANSI/ASCE-8-90, 1991).

En Europa, el Steel Construction Institute (SCI) inicia en 1988 un proyecto de investigación y desarrollo, consistente en la redacción de una guía de diseño europea sobre aplicaciones estructurales de acero inoxidable. Las recomendaciones de diseño obtenidas en este proyecto los publica Euroinox en 1994 en el "Design manual for structural stainless steel" (Euroinox, 1994). Los trabajos de investigación iniciados en Europa por el SCI son la base del Eurocódigo relativo al diseño de estructuras de acero inoxidable "Eurocode 3: Design of Steel Structures. Part 1.4: General Rules for Stainless Steel" (Eurocódigo 3, Parte 1-4, 1994).

A partir de este instante, aparecen de forma más o menos regular publicaciones relativas al empleo estructural del acero inoxidable desde los principales centros de investigación:

- Steel Construction Institute (SCI), (Inglaterra).
- Rand Afrikaans University, (Sudáfrica).
- University of Sydney, (Australia).
- University of Missouri-Rolla, (EEUU).

Además de algunos informes técnicos y de artículos en revistas, los eventos más importantes en los que se recogen publicaciones relativas al empleo del acero inoxidable en aplicaciones estructurales son:

- International Specialty Conference on Cold-formed Steel Structures. Recent Developments in Cold-formed Steel Design and Construction. W-W Yu and RA LaBoube, editors. University of Missouri-Rolla, 1990, 1992, 1994 y 1996 (Rasmussen y Hancock, 1990), (Rasmussen y Hancock, 1992), (Van den Berg y Van der Merwe, 1992) y (Reyneke y Van den Berg, 1996)
- En SSRC 1992 Annual Session, Earthquake Stability Problems in Eastern North America, Structural Stability Research Council. Pittsburgh, Pennsylvania, April 1992 (Carvalho, et al., 1992).
- Nordic Steel Construction Conference'95. Malmö, Sweden. June 1995 (Rasmussen, 1995) y (Salmi y Talja, 1995).
- 2nd World Conference on Steel in Construction. Journal of Constructional Steel Research, San Sebastian, Spain. May 1998 (Arnedo et al., 1998), (Olsson, 1998b), (Van den Berg, 1998) y (Bredenkamp et al., 1998).

Aparecen entonces nuevos grupos de investigación de los que destacan en Europa la Universidad de Lulea, en Suecia, el Technical Research Centre (VTT) de Finlandia y la Universitat Politècnica de Catalunya en España.

Las publicaciones más relevantes realizadas por los grupos de investigación anteriormente citados son las relativas a los trabajos realizados en el SCI (SCI, 1991), (Dier, 1991), (Burgan y Baddoo, 1999) y (Burgan et al., 2000), las relativas a los trabajos de Wei-Wen Yu y sus colaboradores (Yu, 1991) y (Lin et al., 1992), los trabajos de Rasmussen y Hancock (1993), un artículo de Man (1993), las publicaciones de los investigadores de la Rand Afrikaans University (Korvink et al., 1995) y (Van den Berg, 2000) y finalmente, cabe destacar las publicaciones derivadas de trabajos de investigación, experimentales y numéricos, llevados a cabo el Departamento de Ingeniería de la Construcción de la Universidad Politécnica de Cataluña (Arnedo, 1995), (Mirambell et al., 1998), (Real et al., 1999), (Mirambell y Real, 2000), (Real y Mirambell, 2000) y (Real et al., 2001).

2.2.3.- Situación actual.

Como se desprende de la breve cronología presentada anteriormente, el conocimiento del acero inoxidable como material estructural es relativamente reciente. Actualmente varios son los grupos de investigación, en el ámbito internacional, que están estudiando el comportamiento de las estructuras de acero inoxidable y, en particular, aspectos relacionados con el dimensionamiento y verificación de las mismas.

Las primeras investigaciones se han centrado, en su mayoría, en el análisis de las características mecánicas, la evolución de los diagramas tensión-deformación y en el cálculo de flechas. En este momento, las principales líneas de investigación centran sus estudios en la inestabilidad de piezas comprimidas y flectadas: pandeo de soportes, abolladura de chapa y efectos locales.

Actualmente ha finalizado en Europa el Proyecto de Investigación "Development of the Use of Stainless Steel in Construction", Contract 7210-SA/842 (ECSC, 2000), subvencionado por la European Coal and Steel Community, el Nickel Development Institute y productores de acero de Inglaterra, Suecia, Finlandia, Francia, Alemania y Italia. El proyecto se inició en 1997 con el fin de realizar campañas experimentales y desarrollar modelos numéricos para desarrollar una guía de diseño de estructuras de acero inoxidable. Los centros de investigación que han participado en el mismo son el SCI de Inglaterra, la fundación Avesta Sheffield AB Research y Universidad de Lulea en Suecia, el Outokumpu Polarit Oy y el Technical Research Centre (VTT) de Finlandia, el Centro Sviluppo Materiali (CSM) de Italia, Ugine SA y el Centre Technique Industriel de la Construction Métallique (CTICM) en Francia y, finalmente, el Studiengesellschaft Stahlanwendung e. V. y el Institute of Steel Construction (RWTH) de Alemania.

En la Universidad de Lulea parte de la investigación que se está efectuando se dirige hacia la modelización del comportamiento del material a través de la determinación de ecuaciones constitutivas biaxiales (Olsson, 1998a) y hacia la obtención de la capacidad última de vigas armadas considerando los efectos de la abolladura local y de la abolladura por cortante (ECSC, 2000). En el Reino Unido, las investigaciones se centran principalmente en las recomendaciones de diseño, su evolución y la aplicación de los resultados del proyecto a las mismas (Burgan et al., 2000). También en esta misma línea de trabajo cabe destacar los trabajos experimentales desarrollados por el VTT de Finlandia (Salmi y Talja, 1995).

Por otra parte, cabe destacar los trabajos realizados en la Universidad de Sydney por Rasmussen y Hancock (Rasmussen y Hancock, 1993), relativos al comportamiento a flexión

de vigas de acero inoxidable y (Rasmussen y Rondal, 1998) referentes a la determinación de cargas críticas de pandeo en columnas de acero inoxidable.

En la Rand Afrikaans University de Johannesburgo, en Sudáfrica, se investiga principalmente sobre la capacidad estructural de secciones ligeras de acero inoxidable conformadas en frío (Van der Merwe y Van den Berg, 1992)

En el Departamento de Ingeniería de la Construcción de la UPC se inició en 1996 el Proyecto de Investigación PB95-0604 subvencionado por la DGES titulado "Estudio teórico y experimental de inestabilidad de estructuras de acero inoxidable. Criterios de diseño y aplicaciones estructurales", relativo al estudio del comportamiento estructural de elementos de acero inoxidable. Dicho proyecto finalizó en marzo del 2000 e incluyó campañas experimentales para cuantificar la influencia de la no linealidad del material y de los efectos locales de la abolladura en el comportamiento en estados límite de servicio y estados límite últimos de vigas de acero inoxidable trabajando a flexión.

En 1998, el Profesor Hans Nordberg de la Avesta Sheffield Research Foundation organizó en la Institution of Structural Engineers de Londres un Seminario Internacional de Expertos en Acero Inoxidable. A dicho seminario fueron invitados los principales investigadores del momento y se presentaron los resultados más recientes y las últimas investigaciones relativas al comportamiento estructural del acero inoxidable en el mundo (Japón, Alemania, España, Australia, Suecia, Sudáfrica, Italia, Finlandia y Inglaterra). Las ponencias presentadas en el Seminario se han publicado en un número especial de la revista Journal of Constructional Steel Research dedicado exclusivamente al acero inoxidable (JCSR, April 2000).

Se ha iniciado recientemente el Proyecto Europeo: "Valorisation Project. Development of the Use of Stainless Steel in Construction". Commission of the European Communities. Directorate General XII for Science, Research and Development. Unit C-2: Materials & Steel. MO75 1/21, financiado por la European Coal and Steel Community. Dicho proyecto pretende difundir los conocimientos técnicos adquiridos principalmente en el proyecto europeo mencionado anteriormente. Los objetivos principales son la realización de un Manual de Diseño traducido a varios idiomas, la creación de una página Web en la que aparezca todo el Manual y conexiones a las páginas más relevantes de acero inoxidable y la organización de "Workshops" Nacionales para dar publicidad al Manual y a la página Web. En el proyecto participan centros de investigación de diferentes países europeos (Inglaterra, Bélgica, Suecia, Finlandia, Italia, Alemania, Francia y España).

Por último, en enero del 2001 arranca, en el seno del Departamento de Ingeniería de la Construcción de la UPC, el Proyecto Nacional de Investigación MAT2000-1000 titulado "Estructuras de chapa de acero inoxidable. Aplicaciones al sector de la construcción en edificación y obra pública" como continuación natural del Proyecto DEGS anterior, finalizado en marzo del 2000.

2.3.- NORMATIVAS Y GUÍAS DE DISEÑO.

Tal y como se ha comentado anteriormente, la primera norma relativa al uso del acero inoxidable en aplicaciones estructurales la publicó en 1968 el AISI y se tituló: "Specification for the Design of Light Gage Cold-Formed Stainless Steel Structural Members", (AISI, 1968) En 1974 apareció publicada una nueva edición titulada "Specification for the Design of Cold-

formed Stainless Steel Structural Members" (AISI, 1974) y actualmente está vigente la normativa americana "Specification for the Design of Cold-formed Stainless Steel Structural Members" (ANSI/ASCE-8-90, 1991) para estructuras ligeras de acero inoxidable que se fundamenta en la norma "Specification for the Design of Cold-formed Steel Structural Members" (AISI, 1986) de estructuras ligeras de acero al carbono.

En Europa, Eurocódigo 3, Parte 1-4 "General rules - Supplementary Rules for Stainless Steel, ENV-1993-1-4" (1996) proporciona reglas complementarias para el diseño de estructuras de aceros inoxidables austeníticos y austenítico-ferríticos. Las reglas de diseño estructural para acero inoxidable que aparecen en Eurocódigo 3, Parte 1-4 (1996) se utilizan conjuntamente con otras partes de Eurocódigo 3, correspondientes a estructuras de acero al carbono y a estructuras ligeras. La tendencia europea actual es no tener normativas distintas para el acero inoxidable y para el acero al carbono, sino disponer de un número limitado de reglas de diseño que sustituyan a las del acero al carbono en aquellos elementos que se vean afectados por las diferencias mecánicas existentes entre los dos materiales.

Los primeros borradores de esta norma aparecen en 1994 (prENV-93-1-4, 1994) junto con dos importantes guías de diseño.

La primera guía de diseño estructural de acero inoxidable es la Guía de Diseño del Steel Construction Institute (SCI) (Burgan, 1993). 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 (1990). 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 publicó un manual de diseño (Euroinox, 1994) para aceros inoxidables estructurales. Dicho manual, conocido como Manual de Euroinox, se basa en los primeros borradores de Eurocódigo 3, Parte 1-4 (prENV-93-1-4, 1994). 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. Tal y como se ha comentado anteriormente está en marcha un nuevo Proyecto Europeo para actualizar dicho Manual.

Existen además las normativas propias al empleo del acero inoxidable como material estructural de algunos países como por ejemplo Sudáfrica (SABS, 1996) basada principalmente en la norma americana.

2.4.- EL ACERO INOXIDABLE COMO MATERIAL ESTRUCTURAL.

2.4.1.- Introducción.

Con el fin de comprender mejor el comportamiento del material acero inoxidable se exponen a continuación las principales características del mismo.

Se entiende como acero inoxidable todo aquel material perteneciente a la familia de aleaciones de hierro resistentes a la corrosión y que contiene un mínimo de un 11% de cromo. El contenido en cromo es el que confiere al material resistencia a la corrosión a través de la formación de una película superficial pasivante muy adherente que se autosella cuando es dañada. Un mayor contenido en cromo supone un aumento de la resistencia a la corrosión, y la adición de níquel u otros elementos como el molibdeno puede aumentar la protección ofrecida por la película pasivante.

La resistencia a la corrosión hace del acero inoxidable un material muy adecuado en aplicaciones medioambientales ya que tiene un ciclo de vida mayor y requiere un menor mantenimiento que otros tipos de acero. Por lo tanto, la resistencia a la corrosión será un factor primordial en la elección del tipo de acero inoxidable adecuado para cada aplicación.

Cabe destacar aquí que aunque la denominación inoxidable pudiera hacer pensar que estos aceros son totalmente resistentes a los agentes oxidantes, hay que tener en cuenta que éstos pueden sufrir corrosión bajo ciertas circunstancias, debidas principalmente a una incorrecta observación del medio en el que se ubica la estructura y, por tanto, a una mala elección del tipo de acero inoxidable utilizado y/o a un modo inadecuado de trabajo del acero que puede traducirse en un mal acabado superficial.

2.4.2.- El material acero inoxidable.

Los aceros inoxidables se clasifican en cinco grupos básicos atendiendo a su estructura metalúrgica y a su composición química llamados martensíticos, ferríticos, austeníticos, austenítico/ferríticos (dúplex) y de endurecimiento por precipitación. La Figura 2-2 muestra una gráfica de los grupos en función de su contenido en cromo y níquel. Cada uno de los grupos presenta unas características propias, sobretodo en cuanto a capacidad resistente, resistencia a la corrosión y facilidad de fabricación (Euroinox, 1994).

Actualmente existen más de 60 tipos de acero inoxidable pero, a pesar del gran número de aleaciones disponibles, sólo un número reducido de las mismas es adecuado para aplicaciones estructurales, especialmente cuando se plantea la necesidad de soldar. Los aceros inoxidables utilizados en tal caso son los austeníticos y los dúplex debido a su resistencia a la corrosión, sus propiedades mecánicas, su soldabilidad y trabajabilidad. Eurocódigo 3, Parte 1-4 (1996), permite además la consideración de los aceros inoxidables ferríticos en su anejo D.

Además de la gran variedad de tipos de acero inoxidable existentes, hay también una gran variedad de nomenclaturas de los mismos, lo cual dificulta la labor del proyectista en lo referente a la elección del tipo de acero inoxidable más adecuado en cada situación concreta. La tendencia actual es la de unificar los sistemas de designación de los diferentes tipos de acero inoxidable y especificar la composición y propiedades de las aleaciones consideradas.

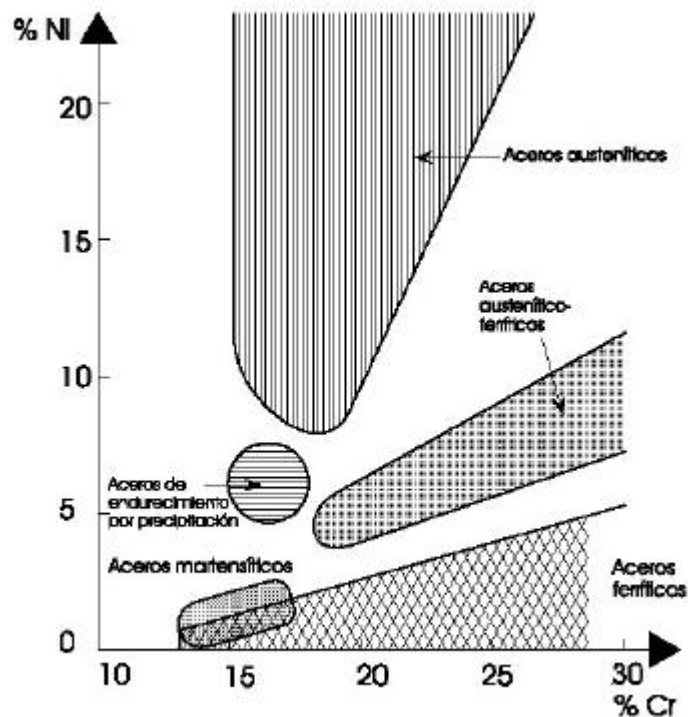


Figura 2-2. Clasificación de los aceros inoxidables en función de su contenido en cromo y níquel (ESDEP, 2000).

En la Tabla 2-1 se presentan los tipos de aceros inoxidables considerados en Eurocódigo 3, Parte 1-4 (1996), junto con la nomenclatura correspondiente en los diferentes países. En la tabla, el tipo de acero hace referencia a la estructura metalúrgica, designando a los aceros austeníticos con A y a los austenítico-ferríticos (Dúplex) con A/F. La EN 10088 (1995) es la norma europea referente a los tipos de acero inoxidable existentes, su composición y su nomenclatura. Las siglas BSI, AISI y UNS corresponden respectivamente a British Standard Institution, American Iron and Steel Institute y Unified Numbering System. Tal y como se desprende de la tabla, los sistemas de designación son diferentes en cada una de las normativas; una explicación de cada uno de los sistemas puede encontrarse en el anejo A de Eurocódigo 3, Parte 1-4 (1996), en el manual de Euroinox (1994) y en el capítulo dedicado al acero inoxidable del ESDEP (2000).

Los tipos más usados son los aceros inoxidables austeníticos, denominados según la norma americana, AISI 304, 304L, 316, 316L y Dúplex 2205 y según Eurocódigo S220, S240 y S480 respectivamente. Los aceros 316 tienen molibdeno y un mayor contenido en cromo que los aceros 304, cosa que los hace más resistentes a la corrosión. La designación L indica un bajo contenido en carbono y por tanto una mejor soldabilidad. El acero Dúplex 2205 es el acero con mayor resistencia a la corrosión y mayor capacidad resistente de los presentados en la tabla.

Tabla 2-1. Correlación entre nomenclaturas para acero inoxidable (Eurocódigo 3, Parte 1-4, 1996).

	Tipo	EN 10088 (1995)		España	UK	USA	
		Nombre	Número	UNE	BSI	AISI	UNS
S220	A	X5CrNi18-10	1.4301	3504	304 S 15	304	S 30400
		X2CrNi19-11	1.4306	3503	304 S 11	304 L	S 30403
		X2CrNi18-9	1.4307	-	-	-	-
		X6CrNiTi18-10	1.4541	3523	321 S 31	321	S 32100
S240	A	X5CrNiMo17-12-2	1.4401	3534	316 S 31	316	S 31600
		X2CrNiMo17-12-2	1.4404	3533	316 S 11	316 L	S 31603
		X2CrNiMo17-12-3	1.4432	-	-	-	-
		X2CrNiMo18-14-3	1.4435	3533	316 S 13	316 L	S 31603
		X1NiCrMoCu25-20-5	1.4539	-	-	904 L	N 08904
		X6CrNiMoTi17-12-2	1.4571	3535	320 S 31	316 Ti	S 31635
S290	A	X2CrNi18-10	1.4311	-	304 S 61	304 LN	S 30453
		X2CrNiMoN17-11-2	1.4406	-	316 S 62	316 LN	S 31653
		X2CrNiMoN17-13-5	1.4439	-	-	317 LMN	S 317 26
		X1NiCrMoCuN25-20-7	1.4529	-	-	-	-
S350	A	X2CrNi18-7	1.4318	-	-	301 LN	
S480	A/F	X2CrNiMoN22-5-3	1.4462	-	Dúplex 2205	-	S 31803

Las propiedades mecánicas del acero inoxidable son, en general, distintas a las del acero al carbono, si bien los parámetros que definen tales propiedades son similares para ambos tipos de acero. Por otra parte, las propiedades mecánicas de este material dependen del tipo de aleación y son función del proceso de fabricación y de los tratamientos superficiales a los que ha sido sometido.

La principal diferencia entre el acero inoxidable y el acero al carbono es la forma del diagrama tensión-deformación. Mientras que el acero al carbono tiene un comportamiento elástico lineal hasta el límite elástico y luego presenta, en la mayoría de los casos, un claro escalón de cedencia, la curva del acero inoxidable es claramente no lineal, sin límite elástico diferenciado (Figura 2-3). Como consecuencia de este comportamiento no lineal del material, el acero inoxidable pierde rigidez a partir de bajos niveles de tensión. El límite elástico en acero inoxidable se determina como la tensión correspondiente a un determinado valor de la deformación plástica remanente, generalmente del 0.2%.

Por otra parte, el acero inoxidable muestra un comportamiento anisótropo y asimétrico en tracción y compresión, dando lugar a la caracterización del material acero inoxidable mediante cuatro curvas tensión-deformación (Figura 2-3).

El tipo de acabado superficial con operaciones de laminado en frío o en caliente y operaciones de reblandecimiento afecta al comportamiento tenso-deformacional del material. Otro factor influyente en el comportamiento tenso-deformacional es el conformado en frío. Como la dureza aumenta con el laminado en frío, se produce un incremento en la tensión última, con el correspondiente descenso de la ductilidad y aumento de la anisotropía. La susceptibilidad extrema del acero inoxidable austenítico al trabajo en frío es también aparente en las curvas tensión-deformación para el material de las esquinas de cualquier sección conformada (Figura 2-3).

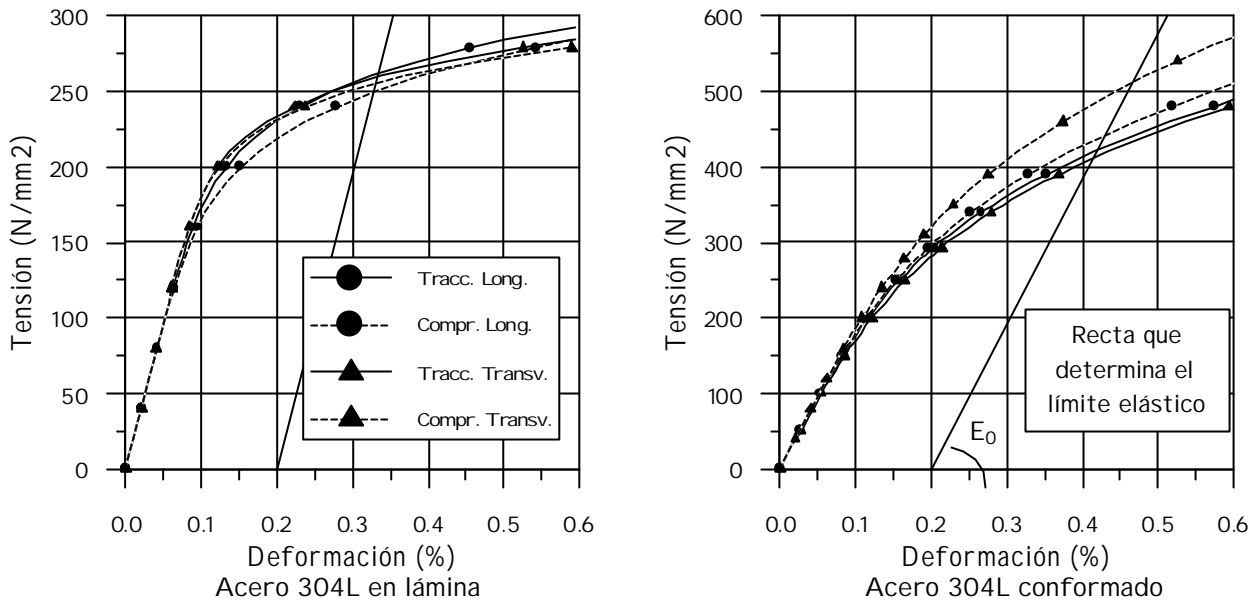


Figura 2-3. Curvas tensión-deformación del acero inoxidable 304L.

Las propiedades de asimetría, anisotropía y especialmente la no linealidad de las curvas tensión-deformación del acero inoxidable hacen que no sean directamente aplicables muchos de los procedimientos usuales clásicos de la resistencia de materiales y el cálculo de estructuras. La determinación de flechas y cargas críticas de abolladura y pandeo que se han obtenido sobre la base de un módulo de elasticidad constante son un buen ejemplo. Las normativas actuales sobre aplicación estructural del acero inoxidable siguen las pautas de las de acero al carbono con ligeras modificaciones, resultando conservadoras, dada la falta de base experimental.

Las recomendaciones de diseño asumen en general que se pueden despreciar los efectos de la asimetría de comportamiento en tracción y compresión y de la anisotropía del material, siendo la no linealidad del comportamiento tenso-deformacional la característica diferenciadora más importante del acero inoxidable (Burgan y Baddoo, 1999).

2.4.3.- Caracterización mecánica.

Tal y como se ha comentado anteriormente, la característica más importante del comportamiento tenso-deformacional del acero inoxidable radica en la no linealidad de su relación tensión-deformación, cosa que introduce dificultad en el dimensionamiento de estas estructuras al no disponer de funciones lineales para representar su comportamiento. De todos modos, es interesante poder disponer de expresiones analíticas que describan el comportamiento del material. La mayoría de normativas y guías de diseño permiten representar la ecuación constitutiva del acero inoxidable mediante la ecuación de Ramberg-Osgood [2-1] y [2-2].

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E_0} + 0.002 \left(\frac{\sigma}{f_y} \right)^n \tag{2-1}$$

$$n = \frac{\log(\epsilon_y/\epsilon_p)}{\log(f_y/\sigma_p)} \tag{2-2}$$

en donde ϵ es la deformación, σ la tensión, E_0 el módulo de elasticidad inicial, f_y el límite elástico, σ_p el límite de proporcionalidad y n una constante que tiene en cuenta el grado de no linealidad del acero, de modo que para valores pequeños de n el grado de no linealidad es más significativo.

Se toma como límite elástico convencional la tensión correspondiente a una deformación plástica remanente del 0.2% y como límite de proporcionalidad la tensión correspondiente a una deformación plástica remanente del 0.01%. En muchos casos se hace referencia al límite elástico f_y como $\sigma_{0.2}$ (esta nomenclatura se utilizará indistintamente en todo el documento, adoptando la expresión más adecuada en cada caso).

El grado de no linealidad, asimetría y anisotropía varía para cada acero inoxidable. En la Tabla 2-2 se presentan las características mecánicas para los tipos de acero inoxidable más utilizados, derivadas de una campaña experimental realizada por el SCI (Euroinox, 1994). De la tabla se desprende la importancia práctica de la no linealidad del material frente a la asimetría y la anisotropía.

Tabla 2-2. Valores característicos de las propiedades mecánicas (Euroinox, 1994).

Material	Dirección tensión	$s_{0.2}$ (MPa)	E_0 (MPa)	n	$s_{0.01}/s_{0.2}$
304L	Tracc. Long.	262	194000	7.1	0.65
	Comp. Long.	250		6.3	0.62
	Tracc. Trans.	259	198000	8.8	0.71
	Comp. Trans.	255		9.0	0.72
316L	Tracc. Long.	277	193000	6.9	0.65
	Comp. Long.	285		8.6	0.71
	Tracc. Trans.	286	198000	8.5	0.70
	Comp. Trans.	297		10.0	0.74
Dúplex 2205	Tracc. Long.	518	199000	5.4	0.57
	Comp. Long.	525		5.2	0.56
	Tracc. Trans.	544	207000	4.8	0.54
	Comp. Trans.	540		5.7	0.59

Eurocódigo 3, Parte 1-4 (1996) uniformiza esta variedad de resultados adoptando los valores presentados en la Tabla 2-3.

Tabla 2-3. Valores característicos de las propiedades mecánicas según Eurocódigo 3, Parte 1-4 (1996).

Material	Dirección Tensión	$s_{0.2}$ (MPa)	E_0 (MPa)	n
S220	Longitudinal	220	200000	6.5
	Transversal	220		8.5
S240	Longitudinal	240	200000	7.0
	Transversal	240		9.0
S480	Longitudinal	480	200000	5.0
	Transversal	480		5.0

2.4.4.- Realizaciones estructurales.

La aparición a principios del siglo XX de un nuevo material con cualidades estéticas y de mantenimiento tan buenas como es el acero inoxidable, ha hecho que se extienda rápidamente su uso en aplicaciones arquitectónicas y de construcción civil.

La cúpula del Edificio Chrysler de New York (Figura 2-4) es un buen ejemplo de la afirmación de la longevidad del acero inoxidable. Fue construido en 1929 con acero inoxidable AISI 304 y se procedió a su limpieza por primera vez en 1961 comprobándose que se encontraba en perfecto estado, a pesar de la agresividad de la atmósfera de New York y de la proximidad al mar. A partir de entonces y gracias a las continuas investigaciones por mejorar el material, han sido muchas las realizaciones en acero inoxidable con diferentes aplicaciones del material de las que se pueden destacar, entre otras, mobiliario urbano, esculturas, chimeneas, interiores de edificios (barandillas, escaleras) y fachadas. Dentro del campo de la construcción cabe destacar la cubierta del Planetario de Stuttgart, construido en 1977, soportada por una estructura tubular de acero AISI 316 (Figura 2-5).



Figura 2-4. Edificio Chrysler (ESDEP, 2000).



Figura 2-5. Planetario de Stuttgart (ESDEP, 2000).

Otra realización relevante es la Iglesia de Vimodrone en Milan (Italia), construida en 1991, cuya cubierta es una membrana de hormigón armado soportada parcialmente por dos péndolas de 70 mm de diámetro y 18 m de longitud de acero inoxidable AISI 316N (Figura 2-6). La cubierta de la Terminal Internacional de Watwerloo en Londres (1993) es otro ejemplo más de realización estructural en acero inoxidable (Figura 2-7).



Figura 2-6. Iglesia de Vimodrone. (Euroinox, 2000). Figura 2-7. Estación de Waterloo (ESDEP, 2000).

También en nuestro país cabe destacar la existencia de diferentes construcciones recientes en las cuales el acero inoxidable ha sido empleado como material resistente.

En el metro de Bilbao, Foster utiliza el acero inoxidable, junto con otros materiales como el hormigón y el vidrio, para el diseño de las estaciones. Aunque el acero inoxidable está presente en todos los espacios, cabe destacar las plataformas que conectan los andenes por medio de unas escaleras imperiales (Figura 2-8). Los aceros inoxidables empleados han sido el AISI 316L y el AISI 310 debido a sus buenas propiedades de resistencia a la corrosión y de resistencia al fuego (Cedinox, 1995).

El arquitecto Sánchez-Cuenca es el autor de una cúpula de acero inoxidable construida durante el año 2000, como cubierta de un polideportivo situado en Quart (Girona). La estructura está constituida básicamente por tubos de acero inoxidable AISI 304 y se sitúa en el exterior de manera que la cubierta que cuelga de ella se configura como una barrera al fuego (Cedinox, 1999) (Figura 2-9). Existen otras muchas realizaciones de cubiertas de las que se pueden destacar, entre otras, la Estación de Ametzola en Bilbao, la Cúpula del Teatre-Museu Dalí en Figueres y la Piscina Municipal de Pinto en Madrid.



Figura 2-8. Metro de Bilbao (Cedinox, 1995). Figura 2-9. Polideportivo de Quart (Cedinox, 1999).

Finalmente cabe destacar aquí la Pasarela peatonal de Abandoibarra en Bilbao, de 142.45 m de longitud total y 84.00 m de luz del vano central, y solución de lámina plegada en célula triangular, con sección resistente en acero inoxidable de elevadas prestaciones mecánicas. La

pasarela fue proyectada por un grupo de ingenieros de caminos y arquitectos encabezado por el ingeniero de caminos Fernández Ordoñez, en un concurso convocado por "Bilbao Ría 2000" para salvar el paso sobre la ría de Bilbao cerca del área universitaria de Deusto y del Museo Guggenheim. Actualmente se encuentra en construcción.

La estructura combina materiales como el acero inoxidable, el hormigón y la madera, de manera que se obtiene la máxima economía mediante la utilización más apropiada de cada uno de ellos en cada elemento de la pasarela. Tal y como cita uno de los autores de proyecto "El recurso al acero inoxidable como elemento estructural principal constituye una aplicación singular de un material con importantes cualidades mecánicas, estéticas y de mantenimiento, todavía poco explotadas en el ámbito de la obra civil pero con indudable proyección en un futuro inmediato" (Millanes, 2000); y en la página web de Avesta Sheffield dice que "Es la primera pasarela realizada en el mundo con todo el revestimiento exterior hecho exclusivamente de acero inoxidable. La pasarela situada en Bilbao lleva al acero inoxidable a nuevos niveles de expresión y sofisticación técnica".

Otras aplicaciones estructurales, aunque queden fuera del ámbito de esta tesis, son las que ofrece la barra corrugada de acero inoxidable, especialmente en restauración de monumentos y para armaduras de puentes, utilizada como elemento resistente en obras de refuerzo y reparación.

2.5.- COMPORTAMIENTO A FLEXIÓN DE ESTRUCTURAS DE ACERO INOXIDABLE.

2.5.1.- Introducción.

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 estudios y normativas referentes al acero inoxidable se han basado, hasta la fecha, en estudios previos y normativas ya existentes en donde quedan perfectamente establecidas las bases para el dimensionamiento de estructuras metálicas de acero al carbono. Dicha forma de proceder ha conducido a reglas de diseño excesivamente conservadoras para el acero inoxidable y no ha propiciado, en general, el avance en el conocimiento de dicho material como material resistente para su utilización en construcción metálica.

Tal como se ha mencionado en el capítulo de objetivos, este trabajo pretende realizar una serie de aportaciones que permitan avanzar en el conocimiento de este material como material estructural y proporcionar pautas para el proyecto y dimensionamiento de estructuras de acero inoxidable. Dicho avance se contextualiza en este trabajo en el estudio del comportamiento de piezas de acero inoxidable sometidas a flexión, por entender que una de las funciones principales que puede exigirse al acero inoxidable es la de trabajar como material estructural de piezas flectadas. Y en este ámbito, el trabajo se enfoca, por una parte, hacia el cálculo de flechas y hacia las verificaciones del estado límite de deformabilidad; ya que, en no pocas

ocasiones, este ámbito condiciona la solución definitiva. Por otro lado, parte de los trabajos realizados se dirigen hacia el estudio del comportamiento en estado límite último frente a cortante en vigas armadas de acero inoxidable y hacia la determinación de un mecanismo resistente que considere las peculiaridades de dicho material.

A continuación, se hace un breve repaso a aquellas aportaciones más relevantes, referentes a estos dos temas mencionados en el párrafo anterior.

2.5.2.- Cálculo de flechas. Verificación del estado límite de deformaciones.

El cálculo preciso de flechas en elementos de acero inoxidable es complejo ya que la deformación de la estructura se ve afectada por la no linealidad de la relación tensión-deformación del material y por los efectos de la abolladura local en las zonas comprimidas. Para elementos de acero al carbono el módulo de elasticidad es constante en toda la viga; sin embargo, para elementos de acero inoxidable el módulo de elasticidad varía dependiendo del valor de la tensión en cada punto. Por lo tanto, para calcular de una manera más o menos precisa la flecha en vigas de acero inoxidable, será necesario, en general, recurrir al uso de herramientas de análisis no lineal, hecho éste que dificulta el diseño.

La mayoría de normativas recoge en su articulado la necesidad de considerar la no linealidad del material y la sección eficaz en el cálculo de flechas; no obstante, preconizan la posibilidad de calcular flechas mediante un método simplificado que utiliza un único módulo secante E_s para toda la viga.

Johnson y Winter fueron los primeros en estudiar el comportamiento a flexión de vigas de acero inoxidable (Johnson y Winter, 1966). En su artículo comparan las flechas reales de una viga ensayada experimentalmente con las calculadas mediante un análisis lineal elástico, observando diferencias de hasta un 80%. Los autores del trabajo destacan la necesidad de desarrollar métodos de cálculo para la determinación de flechas considerando los efectos de la no linealidad del material y de la sección eficaz. Basan la determinación de las flechas en la obtención de diagramas momento-curvatura que tengan en cuenta la no linealidad del material y la sección eficaz. Para ello proponen calcular una rigidez reducida (IE_r) que, de manera sencilla, permita calcular las flechas con suficiente precisión, de modo que I es la inercia de la sección eficaz y E_r es la media aritmética de los módulos secantes de las fibras más traccionadas y más comprimidas de la sección más solicitada.

El método propuesto por Johnson y Winter sigue siendo aceptado hoy en día por la mayoría de normativas y guías de diseño. Según Eurocódigo 3, Parte 1-4 (1996), para el cálculo de flechas en vigas de acero inoxidable, deben tenerse en cuenta los efectos de la no linealidad de la ecuación constitutiva del acero inoxidable y la 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 desprestigiar la variación de dicho módulo de elasticidad a lo largo del elemento y utilizar el mínimo valor de E_s , correspondiente a la sección de máxima tensión.

Este método proporciona resultados aceptables para cargas bajas, sin embargo, se ha demostrado (Mirambell y Real, 2000) que, aún siendo mejor que un cálculo lineal elástico, el cálculo de flechas mediante la utilización de un único valor del módulo de elasticidad secante

a lo largo de todo el elemento tiende a sobrestimar las flechas, dando lugar a un dimensionamiento algo conservador frente a estados límite de deformaciones.

Rasmussen y Hancock presentan en 1993 un método sencillo de cálculo, de manera que, sin necesidad de iterar, permite obtener una buena aproximación de las flechas en vigas tubulares de acero inoxidable (Rasmussen y Hancock, 1993).

Investigadores del RWTH de Alemania defienden que el concepto de clasificación de secciones no es completamente aplicable al acero inoxidable porque es un material no lineal sin un límite elástico claramente diferenciado y abogan por utilizar resultados de un "four point bending test" para desarrollar modelos que determinen la relación momento-rotación de una sección, como alternativa para predecir la resistencia última en materiales con comportamiento no lineal como el acero inoxidable (ECSC, 2000).

2.5.3.- Estudio del cortante. Verificación del estado límite último de cortante.

Es habitual en ingeniería encontrarnos con grandes vigas diseñadas para resistir cargas elevadas sobre luces importantes, de modo que deban resistir esfuerzos que exceden la capacidad resistente de los perfiles comerciales. Es entonces cuando se debe recurrir al uso de vigas armadas formadas por chapas, de manera que las alas resistan los esfuerzos axiales de tracción y compresión originados por el momento flector, mientras que el alma debe resistir el cortante.

Al contrario que en las vigas laminadas, el alma de las vigas armadas suele ser muy esbelta, y por tanto, susceptible de verse afectada por fenómenos de inestabilidad, incluso para valores reducidos del cortante. Sin embargo, es conocido que, con unas adecuadas condiciones de contorno, las almas de las vigas armadas pueden desarrollar, después de la abolladura, una reserva de resistencia significativa, que debe tenerse en cuenta en el diseño de las mismas. Si bien este tema ha sido ampliamente estudiado en el campo del acero al carbono no ocurre lo mismo en el caso del acero inoxidable.

A continuación se realiza una breve descripción del estado del conocimiento relativo al comportamiento a cortante en almas de vigas armadas de acero al carbono y de los métodos de dimensionamiento adoptados por la normativa europea, para finalmente centrar el estudio en los elementos de acero inoxidable.

La carga crítica ideal de abolladura a cortante de una placa rectangular sometida a cortante puro viene dada por la expresión [2-3] en la que el coeficiente de abolladura k_s depende de la relación de aspecto de la placa y de las condiciones de contorno.

$$t_{cr,i} = k_s \frac{P^2 E}{12(1 - \nu^2)} \left(\frac{t_w}{d} \right)^2 \quad [2-3]$$

Esta expresión solamente es válida en el rango elástico del material. Es decir, si la tensión crítica ideal de abolladura supera el límite de proporcionalidad del material, es necesario introducir el concepto de tensión crítica reducida de abolladura para tener en cuenta la influencia de la zona de no linealidad. Se han propuesto varios métodos a lo largo de la literatura para tener en cuenta este efecto, aunque las diferencias resultantes entre ellos no son significativas (Maquoi, 1992). Los primeros métodos usaban un factor corrector en función

del módulo de elasticidad tangente basándose en la teoría anelástica de Bleich (Bleich, 1952). La mayoría de expresiones propuestas tiene en cuenta además el efecto que producen el endurecimiento por deformación del acero y las tensiones residuales (Marco, 1997).

Eurocódigo 3, Parte 1-1 (1993) define tres zonas claramente diferenciadas de comportamiento a cortante en función de la esbeltez relativa del alma $\bar{\lambda}_\omega$. Dicha esbeltez se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$\mathbf{I}_\omega = \left[\frac{f_{yw}}{\sqrt{3}} / t_{cr,i} \right]^{1/2} \quad [2-4]$$

Las zonas claramente diferenciadas son las siguientes:

a) $\bar{\lambda}_\omega \leq 0.8$	→	$\tau_{cr,r} = (f_y / \sqrt{3})$
b) $0.8 < \bar{\lambda}_\omega < 1.25$	→	$\tau_{cr,r} = [1 - 0.8(\bar{\lambda}_\omega - 0.8)](f_{yw} / \sqrt{3})$
c) $\bar{\lambda}_\omega \geq 1.25$	→	$\tau_{cr,r} = [1 / \bar{\lambda}_\omega^2](f_{yw} / \sqrt{3})$

En la zona a) se supone que el acero plastifica antes de que se produzca la abolladura. La limitación de esbeltez está condicionada por los procesos de fabricación y las tensiones residuales de la sección (Marco, 1997). Para esbelteces mayores a 0.8 se produce abolladura del alma, pudiendo diferenciar dos zonas; una zona b) en la que aparece la influencia de la no linealidad del material por encima del límite de proporcionalidad y otra en la que las esbelteces son tan grandes que la abolladura se produce para valores de la tensión muy inferiores al límite elástico y, por tanto, en régimen lineal elástico, de modo que la tensión crítica reducida resulta igual a la tensión crítica ideal

En la Figura 2-10 se observa una representación gráfica de las zonas definidas anteriormente. La expresión utilizada para describir el comportamiento anelástico del material se obtiene ajustando una recta que pasando por el punto A ($\bar{\lambda}_\omega = 0.8$), sea tangente a la curva de tensión crítica ideal en el punto B ($\bar{\lambda}_\omega = 1.25$).

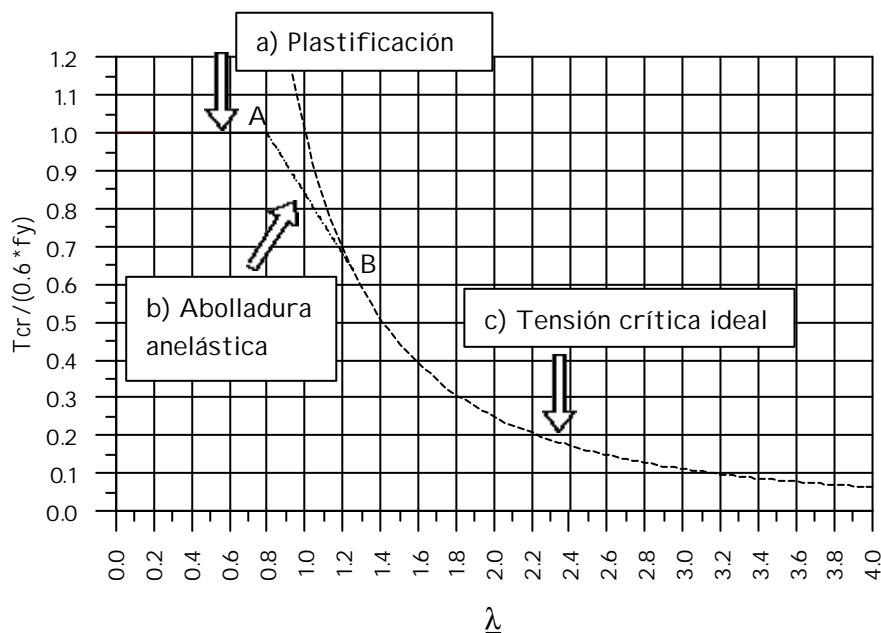
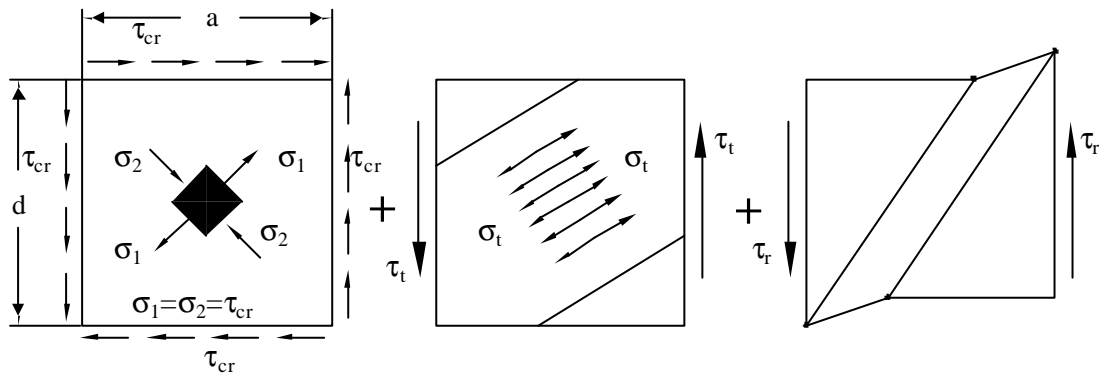


Figura 2-10. Tensión crítica real de abolladura según Eurocódigo 3, Parte 1-1 (1993).

La experiencia ha demostrado sobradamente que las almas de las vigas armadas no colapsan una vez han alcanzado su carga crítica de abolladura, sino que, debido al trabajo en dos direcciones y a los esfuerzos de membrana que aparecen, la placa puede resistir tensiones superiores ofreciendo una reserva de resistencia postcrítica.

La primera teoría conocida en la que se explica el fenómeno del incremento de capacidad portante fue desarrollada por Rode en 1916 y posteriormente fueron desarrolladas diferentes teorías sobre la capacidad última a cortante en vigas armadas. Los modelos iniciales no tenían en cuenta la rigidez de las alas (Wagner en 1929, Basler en 1950), pero posteriormente se puso de manifiesto la importancia de considerar dicha influencia, especialmente en el campo de la ingeniería civil. Las teorías más relevantes son las desarrolladas por Takeuchi en 1964, Fujii en 1968 y 1971, Komatsu en 1971, Chern y Ostapenko en 1969, Sharp y Clark en 1971, Steinhardt y Schroter en 1971, Höglund en 1971, Porter et al. en 1975, Rockey y Skaloud en 1968, 1971 y 1972 y Skaloud y Zornerova en 1972. Pueden encontrarse explicaciones más detalladas sobre cada uno de estos modelos en (Dubas y Gehri, 1986), (Ivanyi y Skaloud, 1992) y (Galambos, 1998).

Estas teorías constituyen la base de los métodos de dimensionamiento existentes hoy en día en las normativas y guías de diseño para vigas armadas de acero al carbono. Todos ellos se basan en descomponer la respuesta de la placa sometida a cortante en tres fases claramente diferenciadas que, de forma esquemática, se representan en la Figura 2-11.



a) Tensión crítica de abolladura b) Formación del campo diagonal de tensiones c) Mecanismo de marco

Figura 2-11. Fases de respuesta de una placa sometida a cortante.

En un primer estadio de la carga, la placa se encuentra sometida a cortante puro, de modo que las tensiones principales son iguales y de signo contrario actuando a 45° respecto del cortante (Figura 2-11 (a)). A medida que aumenta la carga, aumenta también el valor de las tensiones principales, hasta que la tensión principal de compresión causa la desestabilización del panel cuando se alcanza la carga crítica de abolladura ($\sigma_1 = -\sigma_2 = \tau_{cr}$).

A partir de ese instante el alma es incapaz de seguir absorbiendo compresiones y se desarrolla un nuevo mecanismo resistente a través del aumento de tensión en la dirección perpendicular formándose un campo diagonal de tracciones que se ancla en las alas y en los rigidizadores de la viga armada (Figura 2-11 (b)).

Las fuerzas transversales resultantes en las alas provocan deformaciones en el ala, y en función de su rigidez a flexión variará el campo diagonal, de forma que cuanto mayor sea la rigidez a flexión de las alas comparada con la rigidez del alma, mayor será el ancho del campo diagonal de tracciones. El esfuerzo cortante podrá crecer hasta que las alas y los rigidizadores no sean capaces de anclar el campo diagonal, momento en el cual se formará un mecanismo de marco (Figura 2-11 (c)) caracterizado por la aparición de rótulas plásticas en las alas (Maquoi, 1992).

Finalmente cabe señalar que los diferentes autores adoptan diferentes hipótesis para determinar el ancho de la banda del campo diagonal, así como su inclinación, en función del modelo escogido para representar el problema.

Los modelos establecidos actualmente son el modelo del campo rotacional, desarrollado por Höglund, y el modelo del campo diagonal de tracciones de Cardiff basado en los estudios desarrollados por Rockey y sus colaboradores en la Universidad de Cardiff (Davies y Griffith, 1999) y (Maquoi, 1992).

El modelo de Höglund constituye la base del método postcrítico simple de Eurocódigo 3, Parte 1-1 (1993) para la determinación de la capacidad última a cortante de vigas armadas, con o sin rigidizadores transversales. Ensayos experimentales han constatado que este método resulta conservador debido, principalmente, a que no considera la contribución de las alas en la resistencia última de las vigas.

El segundo método propuesto en Eurocódigo 3, Parte 1-1 (1993) es el método del campo diagonal de tracciones. Este método se basa en el método de Cardiff y proporciona resultados más reales que en el caso anterior; sin embargo, solamente es aplicable a vigas con rigidizadores transversales intermedios y cuya relación de aspecto se encuentre comprendida entre 1 y 3.

Eurocódigo 3, Parte 1-5 (1997) propone un nuevo método, en sustitución de los dos anteriores, que es capaz de determinar la resistencia última de un panel con cualquier relación de aspecto. El método se basa en la teoría del campo rotacional de tensiones desarrollada por Höglund y asume que, una vez producida la abolladura del alma, el campo de tracciones que domina el comportamiento no tiene componentes de tensión perpendiculares a las alas, debido a la limitada rigidez a flexión de las mismas. La acción del campo diagonal resultante no requiere una especial rigidez a flexión de las alas ni una limitación de la relación de aspecto del panel de alma (Maquoi, 1992). Por otro lado, se tiene en cuenta la contribución de las alas y el endurecimiento por deformación del material, de modo que la resistencia máxima de la viga puede llegar a superar la resistencia plástica de la sección.

En comparación con los métodos propuestos en Eurocódigo 3, Parte 1-1 (1993), el método del campo rotacional de tensiones proporciona resistencias mucho mayores, especialmente en paneles con esbelteces reducidas. Esto hace que se plantee una cuestión sobre la armonización de los diferentes métodos propuestos en la normativa y que sea una de las principales tareas del grupo de validación del CEN (Maquoi y Skaloud, 2000).

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 primeros trabajos de investigación relativos al comportamiento de vigas de acero inoxidable sometidas a cortante fueron los realizados por Carvalho, Van den Berg y Van der Merwe en la Rand Afrikaans University (Carvalho et al, 1992). En dicho estudio se analiza cuál es el factor de reducción plástica más adecuado para tener en cuenta el efecto de la no linealidad del material en la respuesta última de la viga, en base a los resultados derivados de una campaña experimental sobre vigas conformadas de acero inoxidable. Los resultados de la investigación llevada a cabo en Sudáfrica son la base del método de dimensionamiento de la normativa americana (ANSI/ASCE-8-90, 1991) en la que se utiliza el factor de reducción plástica de Gerard ($\eta = G_s/G_0$).

La utilización de factores de reducción plástica basados en los módulos secante o tangente del material requiere el uso de un método de cálculo iterativo, ya que el valor de dichos módulos varía con el nivel de tensiones. Es por ello por lo que en algunas de las recomendaciones que aparecen en las normas, se han presentado curvas de diseño efectivas basadas en la aproximación con el factor de reducción plástica (Euroinox, 1994).

Eurocódigo 3, Parte 1-4 (1996) propone una curva para la determinación de la tensión crítica inicial de abolladura y otra curva para la determinación de la capacidad última de vigas sometidas a cortante en la línea del método postcrítico simple, teniendo en cuenta, en ambos casos, la no linealidad del material.

Finalmente, cabe destacar uno de los trabajos realizados dentro del Proyecto Europeo de Investigación "Development of the Use of Stainless Steel in Construction", Contract 7210-SA/842 (ECSC, 2000) en la Universidad de Lulea enfocado hacia la obtención de la capacidad última de vigas armadas considerando los efectos de la abolladura por cortante. El estudio se basa en la realización de una serie de ensayos experimentales y en la utilización sistemática de un modelo numérico con el fin de obtener resultados de capacidad última de vigas a cortante. En el informe se concluye que las expresiones de diseño propuestas en Eurocódigo 3, Parte 1-4, relativas a la resistencia última a cortante son muy conservadoras, y propone nuevas expresiones de diseño basadas en el método rotacional de tensiones.