

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

1.1.- INTRODUCCIÓN.

El acero inoxidable es un material perteneciente a la familia de las aleaciones de hierro resistentes a la corrosión y que contiene un mínimo de un 11% de cromo. Es este contenido en cromo el que confiere al acero inoxidable la capacidad resistente a corrosión a través de la formación de una película superficial pasivante, que se adhiere a la superficie y se autosella cuando se daña. La resistencia a la corrosión hace del acero inoxidable un material muy adecuado cuando el factor medioambiental es determinante en la elección del material ya que tiene un ciclo de vida mayor y requiere un menor mantenimiento que otros tipos de acero.

El nacimiento del material acero inoxidable se atribuye a un metalúrgico de Sheffield llamado Harry Brearley quien, en agosto de 1913, realizó la primera aleación de acero con adición exclusiva de cromo. A partir de aquel momento se iniciaron en todo el mundo investigaciones relativas a las propiedades del material, al desarrollo de nuevas aleaciones y a estudios relacionados con los métodos de producción.

Los avances conseguidos hasta la fecha han propiciado la utilización del acero inoxidable en un gran número de aplicaciones en el campo de la alimentación, la medicina, la automoción, la aviación, la industria, la arquitectura y la ingeniería. La producción de acero inoxidable actual representa aproximadamente un 2% de la producción total de acero y, a pesar de que alrededor del 10% de la producción total de acero inoxidable se utiliza para aplicaciones estructurales o arquitectónicas, las investigaciones relativas al estudio del comportamiento estructural del material son pocas y muy recientes.

Las cualidades estéticas y de mantenimiento del acero inoxidable han inspirado a arquitectos e ingenieros hacia el pluralismo arquitectónico y la innovación ingenieril, pudiéndose destacar realizaciones tales como la cúpula del Edificio Chrysler en Nueva York (1929), la cubierta del Planetario de Stuttgart (1977) o la Pasarela peatonal de Abandoibarra en Bilbao (2000), entre otras.

Además de la resistencia a la corrosión, el acero inoxidable presenta muy buenas propiedades mecánicas y de ductilidad. La primera normativa relativa al empleo del acero inoxidable como material estructural la publicó el American Iron and Steel Institute en 1968 y hacía referencia a estructuras ligeras con secciones conformadas. Las investigaciones realizadas en Europa entorno al comportamiento estructural del acero inoxidable quedan reflejadas en la Parte 1-4 del Eurocódigo 3, relativa al acero inoxidable. La primera edición de esta parte del Eurocódigo se publicó en 1994 junto con una importante guía de diseño, como resultado de un proyecto de investigación liderado por el Steel Construction Institute. Actualmente, el 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 acero inoxidable que 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. A pesar de la similitud entre las bases de diseño del acero al carbono y del 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 de elementos estructurales de acero inoxidable y en particular a las relativas a los cálculos en flexión de vigas de acero inoxidable.

La no linealidad del material y las características de endurecimiento del acero inoxidable requieren el uso de diagramas de cálculo diferentes a los aplicables para el acero al carbono e introduce una cierta complejidad en el análisis tenso-deformacional de las estructuras de acero inoxidable y en el establecimiento de reglas de dimensionamiento útiles para el proyectista.

1.2.- SITUACIÓN ACTUAL.

El empleo del acero inoxidable como material estructural ha sido escaso debido, entre otras razones, a la falta de especificaciones de diseño que fomenten y faciliten la utilización del material haciendo un uso óptimo de sus propiedades mecánicas. A pesar de que la aparición de la Parte 1-4 de Eurocódigo 3 puede significar un gran avance en la utilización estructural del acero inoxidable, éste no ha sido suficiente puesto que las reglas establecidas para este material se basan en las ya existentes para el acero al carbono. Ello no permite explotar al máximo la capacidad resistente del acero inoxidable.

Actualmente existen varios grupos de investigación, a nivel internacional, dedicados al estudio del comportamiento de las estructuras de acero inoxidable y, en particular, de aspectos relacionados con el dimensionamiento y verificación de las mismas.

Debido al peculiar comportamiento del material, las primeras investigaciones se han centrado, en su mayoría, en el análisis de las características mecánicas, en la forma de los diagramas tensión-deformación en función de la asimetría y la anisotropía del material 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.

1.3.- OBJETIVOS DE LA TESIS.

El objetivo principal de este trabajo es realizar una serie de aportaciones que permitan avanzar en el conocimiento del acero inoxidable como material estructural y proporcionar pautas para el análisis y dimensionamiento de estructuras de acero inoxidable, que potencien y faciliten el desarrollo y la utilización de este material como material estructural resistente.

Una de las funciones que se le puede exigir al acero inoxidable es la de trabajar como material estructural de piezas flectadas. Es por ello que se considera imprescindible estudiar, por una parte, el comportamiento de las vigas de acero inoxidable sometidas a flexión, evaluando los efectos de la no linealidad del material en la respuesta de la estructura, y, por otra, obtener expresiones de diseño que permitan dimensionar este tipo de estructuras explotando al máximo las propiedades resistentes del material.

El estudio se centra, en primer lugar, en las correspondientes verificaciones frente al estado límite de deformabilidad. El cálculo preciso de flechas en elementos de acero inoxidable es un problema complejo con dos particularidades destacables. Por un lado, la no linealidad del material hace que el módulo de elasticidad dependa del nivel de tensiones en cada punto, cosa que provoca una variación de dicho módulo tanto a nivel seccional como longitudinal a lo largo de la pieza. Dicha variación dificulta el cálculo de flechas mediante la teoría clásica, que basa su formulación en un módulo de elasticidad constante. Por otro lado, el cálculo de secciones eficaces en elementos esbeltos depende también del módulo de elasticidad del material, que en este caso dependerá del nivel de tensiones al que esté sometida la pieza. Se está en presencia de un problema no lineal que deberá resolverse mediante un cálculo iterativo.

En segundo lugar se analiza el comportamiento en estado límite de servicio y la evolución hasta rotura de vigas armadas de acero inoxidable frente a sollicitaciones de cortante. Concretamente se estudia la evolución de las tensiones en el alma de las vigas y la influencia de la no linealidad del material en la respuesta de la viga incluso cuando se presentan fenómenos de abolladura. Finalmente se pretende determinar un mecanismo resistente que considere las peculiaridades del material acero inoxidable y permita desarrollar un método de dimensionamiento basado en el método del campo diagonal de tracciones para acero inoxidable que sea más ajustado que el método postcrítico simple propuesto por la normativa actual.

Para la elaboración de estos estudios se realizan campañas experimentales sobre elementos estructurales y se desarrollan modelos numéricos que generan datos suficientes para poder valorar las bases de diseño ya existentes en un gran número de piezas de acero inoxidable. En las campañas experimentales se caracteriza el comportamiento real del material y se miden las deformaciones que se producen en diferentes puntos de las estructuras ensayadas durante la aplicación de la carga. Los modelos numéricos tienen en cuenta la ecuación constitutiva del material, determinada experimentalmente, permiten simular los ensayos y llevar a cabo un análisis comparativo entre los modelos numéricos y experimentales. Una vez validado el modelo numérico, éste se utiliza de manera sistemática para generar una serie de datos sobre

los que se establecen nuevas pautas y expresiones para el dimensionamiento de estructuras de acero inoxidable.

1.4.- CONTENIDO DEL DOCUMENTO.

La consecución de los objetivos descritos en el apartado anterior está ligada a la realización de una serie de tareas llevadas a cabo durante el trabajo. A continuación se presenta un resumen de los trabajos realizados durante el desarrollo de la tesis y su correspondencia con los contenidos del presente documento.

En primer lugar, y con el objetivo de entender el comportamiento del acero inoxidable como material estructural resistente se realiza una amplia búsqueda bibliográfica cuyo resultado queda reflejado en el Capítulo 2. En este capítulo se presenta una evolución histórica del conocimiento del material acero inoxidable y se presenta también una recopilación de las normas y guías de diseño más relevantes en el uso del acero inoxidable como material estructural. Se incide en las propiedades del material, en la caracterización mecánica y se destacan algunas de las realizaciones estructurales más importantes. Finalmente, se introducen los conceptos básicos y los estudios más actuales referentes al comportamiento a flexión de estructuras de acero inoxidable.

El Capítulo 3 está enteramente dedicado al modelo numérico. En dicho capítulo se presentan los elementos estructurales analizados y los tipos de elementos finitos utilizados en cada caso. Se realiza también una breve descripción del método de elementos finitos, para poder formular de manera comprensible la ecuación constitutiva utilizada y la modelización de la rotura. Finalmente se describen las estrategias utilizadas para la resolución de los problemas de no linealidad geométrica y no linealidad del material que se plantean en los casos estudiados.

El estudio del cálculo de flechas y las verificaciones del estado límite de deformabilidad de las estructuras de acero inoxidable se presenta en los Capítulos 4 y 5. En el Capítulo 4 se presenta la primera campaña experimental llevada a cabo en el Laboratorio de Tecnología de Estructuras de la ETS de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona. En dicha campaña se ensayaron vigas biapoyadas y continuas sometidas a carga puntual con secciones transversales cuadradas y rectangulares conformadas en frío y secciones en H laminadas, en la que se incluyen además ensayos de caracterización del material considerando los efectos del conformado.

La instrumentación de las vigas ensayadas permite medir flechas en distintos puntos de las vigas con transductores de desplazamiento, deformaciones mediante galgas extensométricas y reacciones en apoyos con células de carga. Los resultados experimentales se comparan con los obtenidos de la aplicación de la normativa y con los resultados derivados de la utilización del modelo numérico. Se comparan las flechas obtenidas para diferentes niveles de carga y se analiza la evolución de las deformaciones y tensiones en las secciones transversales de las vigas, los efectos de la abolladura local y el ancho eficaz.

En el Capítulo 5 se analiza el comportamiento de una serie de vigas de acero inoxidable biapoyadas con diferentes estados de carga con el fin de determinar la importancia de las variaciones del módulo de elasticidad a lo largo de la sección transversal y de la viga. Seguidamente se presenta una expresión del diagrama momento-curvatura para secciones

transversales doblemente simétricas. En base a dicha expresión del diagrama momento-curvatura se obtienen fórmulas analíticas y semiempíricas para la determinación de flechas en vigas biapoyadas y continuas de acero inoxidable bajo determinados estados de carga y con cualquier condición de vinculación.

Los Capítulos 6, 7 y 8 se centran en el estudio del comportamiento en estado límite último frente a solicitaciones de cortante en vigas armadas de acero inoxidable y en la determinación de un modelo resistente que considere las peculiaridades de este material con respecto al acero al carbono.

En el Capítulo 6 se describe la segunda campaña experimental realizada en el Laboratorio de Tecnología de Estructuras de la ETS de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona, cuyo objetivo principal es estudiar el comportamiento de vigas armadas de acero inoxidable sometidas a cortante. Se describen los ensayos realizados sobre doce vigas armadas, con diferentes esbelteces y relaciones de aspecto, y se presentan los resultados de mayor interés derivados de la campaña experimental.

En el Capítulo 7 se realiza un análisis detallado de los resultados obtenidos durante el desarrollo de los ensayos, así como una comparación de éstos con los que se derivan del modelo numérico, tras la validación de los resultados derivados de la aplicación de dicho modelo numérico. Debido a la enorme cantidad de datos obtenidos para las doce vigas a lo largo de toda la campaña experimental, se ha considerado oportuno presentar en primer lugar un análisis general del comportamiento de todas las vigas analizando las curvas carga-flecha y evaluando la carga crítica inicial de abolladura. Un análisis profundo del estado tenso-deformacional de las almas de las vigas ensayadas permitirá diferenciar varios tipos de comportamiento en las mismas vigas frente a solicitaciones de cortante.

En el Capítulo 8 se comparan los resultados experimentales con los obtenidos mediante la aplicación del método postcrítico simple propuesto por Eurocódigo 3, Parte 1-4 (1996) para evaluar la capacidad a cortante de vigas armadas de acero inoxidable. Se realiza también una adaptación, para el acero inoxidable, del método del campo diagonal de tracciones expuesto en Eurocódigo 3, Parte 1-1 (1993) para acero al carbono.

Antes de efectuar un análisis comparativo de resultados, es necesario definir el valor de la tensión crítica inicial de abolladura, y estudiar a continuación la evolución del estado tenso-deformacional y la formación de nuevos mecanismos resistentes hasta rotura. Para ello, se analiza el comportamiento de chapas sometidas a cortante y se evalúa la tensión crítica inicial de abolladura incluyendo los efectos de la no linealidad del material. Los valores obtenidos se comparan con los valores de tensión crítica propuestos en la normativa y finalmente se presenta una propuesta de formulación para la determinación de la tensión crítica inicial de abolladura en chapas de acero inoxidable.

Una vez analizado el comportamiento de las vigas ensayadas y estudiadas las cargas críticas iniciales de abolladura, se comparan los resultados de cortante último obtenidos en la campaña experimental y con el modelo numérico con los determinados según distintos métodos de cálculo propuestos en las normativas o recomendados por distintos autores. Se presenta, además, una adaptación del método del campo diagonal de tracciones de acero al carbono para vigas armadas de acero inoxidable sometidas a cortante, resultando ser el método que mejor aproxima los resultados experimentales y numéricos.

Por último, en el Capítulo 9 se presentan las conclusiones derivadas de los estudios realizados durante el desarrollo del trabajo. Asimismo, se exponen, como continuación natural de la investigación desarrollada en esta tesis, futuras líneas de trabajo en el campo del comportamiento a flexión de las estructuras de acero inoxidable.

La tesis consta además de dos Anejos en los que se recogen los resultados más interesantes obtenidos en cada una de las campañas experimentales, así como los esquemas de instrumentación utilizados para cada una de las vigas ensayadas.