El acero inoxidable en la construcción; un material sostenible y de futuro Stainless Steel in construction; a sustainable and future material

Esther Real: http://orcid.org/0000-0003-1723-3380, esther.real@upc.edu

Itsaso Arrayago: http://orcid.org/0000-0002-0054-9322

Enrique Mirambell: http://orcid.org/0000-0003-2612-9104

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universitat Politècnica de Catalunya, España

Resumen

Este artículo tiene como objetivos el exponer un resumen general de las propiedades del acero inoxidable como material resistente estructural y de los aspectos relacionados con la durabilidad, y presentar la nueva versión del Manual de Diseño para Acero Inoxidable Estructural, que proporciona expresiones de dimensionamiento para aceros inoxidables. Este Manual está en sintonía con las últimas modificaciones para la actualización de EN 1993-1-4, y cubre el cálculo de secciones transversales, elementos, uniones y el cálculo a temperaturas elevadas. El artículo muestra un resumen de los aspectos más relevantes en relación con el cálculo estructural para el acero inoxidable y las diferencias básicas con el cálculo en acero al carbono. Además, se introducen una serie de nuevos métodos avanzados de cálculo más eficientes y se proporcionan también nuevas guías para la selección de grados. Finalmente, se describen algunas de las aplicaciones estructurales recientes en España y Europa.

Abstract

The main objectives of this article are to provide a brief summary of the most relevant mechanical and durability properties shown by stainless steels as structural materials, as well as presenting the new version of the Design Manual for Structural Stainless Steel, which gives design rules for stainless steels. The Design Manual is aligned to the amendments of the Eurocode 3 for structural stainless steel, EN1993-1-4 and it covers the design of cross-sections, members, connections and design at elevated temperatures. The article summarizes the most relevant aspects regarding the design of stainless steel structures and the basic differences compared to the design in carbon steel. In addition, more efficient advanced design methods are introduced and guidance on grade selection are provided. Finally, some recent structural applications of stainless steels in Spain and Europe are described.

Palabras clave / Keywords

Acero inoxidable, Construcción, Diseño, Normativa

Stainless Steel, Construction, Design, Standard

1. Introducción

El acero inoxidable se ha empleado en aplicaciones de edificación desde que fue inventado. Presenta una buena resistencia a la corrosión y es ideal para aplicaciones en las que el mantenimiento y la inspección son difíciles. Existe una amplia gama de acabados superficiales que aportan una superficie metálica atractiva. Los aceros inoxidables pueden manipularse y fabricarse mediante la mayoría de las técnicas comunes y son completamente reciclables al final de su vida útil.

La principal característica que distingue al acero inoxidable del acero al carbono es su inherente resistencia a la corrosión, debida a una capa protectora de óxido de cromo que se genera de manera espontánea en su superficie en presencia de oxígeno. Esto hace que los componentes de acero inoxidable

puedan ser expuestos a una variedad de ambientes sin la necesidad de aplicar recubrimientos de protección, siendo por ello ideales para estructuras críticas en ambientes agresivos.

Cuentan con una buena resistencia mecánica, tenacidad y resistencia frente a fatiga, por lo que pueden emplearse en multitud de aplicaciones estructurales, como vigas, pilares, plataformas y apoyos en diversas instalaciones industriales y puentes; diques de abrigo, muelles y otras estructuras costeras; barras de armado en estructuras de hormigón; estructuras resistentes a explosiones, impacto e incendio, tales como muros de seguridad, puertas y bolardos.

El acero inoxidable comparte una serie de características mecánicas con el acero al carbono, aunque su comportamiento tenso-deformacional es considerablemente diferente. Mientras que el acero al carbono presenta un comportamiento elasto-plástico, con un límite elástico claramente marcado, la curva tensión-deformación del acero inoxidable es no lineal y presenta una plastificación gradual. Esta no linealidad influye en el comportamiento mecánico del material, por lo que se requiere de algunas expresiones de diseño ligeramente diferentes de las proporcionadas para el acero al carbono. En esta línea, la norma europea del acero inoxidable EN1993-1-4:2006 (1) y la correspondiente versión española UNE-EN1993-1-4:2012 (2), recogen las reglas adicionales para los aceros inoxidables, que modifican y suplementan las reglas para el acero al carbono cuando es necesario. De manera adicional, existe un Manual de Diseño para Acero Inoxidable Estructural (3), en sintonía con las recomendaciones recogidas en EN1993-1-4+A1:2015 (4).

El acero inoxidable es más caro que el acero al carbono por unidad de peso y depende del coste de los elementos empleados en las aleaciones. El precio del acero inoxidable tiende también a ser más volátil, puesto que depende del precio del níquel. No obstante, atendiendo a la creciente corriente sobre el hecho de que deberían considerarse los costes de ciclo de vida (costes iniciales, costes de mantenimiento, sustitución e interrupciones de servicio, desvío de vertederos y contenido de material reciclado), y no tan sólo los costes iniciales, a la hora de seleccionar los materiales de construcción (5), el acero inoxidable resulta ser más rentable económicamente que otros materiales que requieran mayor mantenimiento. Pueden reducirse también los costes iniciales por la eliminación de recubrimientos necesarios, la reducción del mantenimiento o de la sustitución de los componentes debido a la corrosión (6). El acero inoxidable tiene un alto valor residual y puede reciclarse indefinidamente, por lo que la chatarra no es depositada en vertederos, sino que es reciclada en la fabricación de nuevos metales y las tasas de reciclado al final de su vida útil son muy elevadas. El contenido típico de material reciclado en todos los tipos de acero inoxidable es de alrededor del 60%, mientras que en Norteamérica y Europa es de entre el 75% y el 90% (7). Esto garantiza que puedan diseñarse proyectos de más de 80 años de servicio, que pueden llegar hasta 100 años con especificaciones y mantenimiento adecuado, a la vez que mantiene la calidad del entorno natural.

2. Características del acero inoxidable

Acero inoxidable es el nombre que recibe la familia de aleaciones de acero resistentes a la corrosión y a las temperaturas elevadas, con un contenido mínimo en cromo de 10.5%. Cuando el contenido de cromo supera este valor, y se ofrece una superficie limpia y expuesta al aire o a cualquier ambiente oxidante, se forma una capa transparente y adherente de óxido rico en cromo en la superficie del acero, conocida como la capa pasivante. Los aceros inoxidables son materiales altamente versátiles con niveles de resistencia mecánica y a la corrosión diferentes que pueden explotarse en aplicaciones estructurales, y suelen clasificarse en cinco grupos, en función de su microestructura:

• Los aceros inoxidables *austeníticos* son dúctiles y razonablemente resistentes, pudiendo obtenerse resistencias mayores mediante el trabajado en frío. Pueden fabricarse y soldarse de

- manera sencilla y aunque son no magnéticos, puede aparecer cierto magnetismo tras el trabajado en frío.
- Los aceros inoxidables *martensíticos* cuentan con una menor resistencia a la corrosión que los austeníticos, aunque pueden endurecerse mediante tratamientos térmicos hasta obtener resistencias a tracción muy elevadas.
- Los aceros inoxidables *ferríticos* son menos resistentes y dúctiles que los austeníticos. Su resistencia a la corrosión es también generalmente inferior.
- Los aceros inoxidables *dúplex* cuentan con una mezcla de microestructura austenítica/ferrítica, por lo que son más resistentes que los austeníticos, aunque no tan fáciles de trabajar ni tan dúctiles. Su resistencia a la corrosión es también superior a la de los austeníticos, ya que se encuentran más altamente aleados.
- Los aceros inoxidables de *endurecimiento por precipitación* presentan unas excelentes propiedades mecánicas y una resistencia a la corrosión similar a la de los austeníticos.

En principio, todos los procesos de fabricación propios del acero al carbono pueden emplearse para el acero inoxidable, pero dichos procesos deben tener en cuenta las diferentes propiedades físicas y mecánicas, así como las necesidades de evitar la contaminación. Generalmente los aceros inoxidables empleados en la construcción son los austeníticos y los dúplex, debido a sus propiedades mecánicas, resistencia a la corrosión, trabajabilidad y soldabilidad. No obstante, los grados ferríticos se postulan también como excelente alternativa frente al acero galvanizado, ya que cuentan con una adecuada resistencia a la corrosión que los hacen ideales para aplicaciones estructurales en ambientes moderadamente agresivos, a la vez que presentan un precio inicial más reducido y estable que los grados austeníticos y dúplex (8).

El comportamiento tenso-deformacional del acero inoxidable es diferente al del acero al carbono, mostrando una curva con forma redondeada sin límite elástico claramente definido, mientras que el acero al carbono se comporta linealmente hasta su límite elástico y mantiene una zona plana de tensión constante antes del endurecimiento por deformación, tal como puede apreciarse en la Figura 1, donde se comparan las curvas tenso-deformacionales de varios grados de acero inoxidable con la del acero al carbono. Además de la no linealidad de la curva tensión-deformación, los aceros inoxidables presentan un importante endurecimiento por deformación y una ductilidad alta. Todo ello hace que, en lugar de utilizar un modelo elasto-plástico perfecto, descrito a partir de modelos de material de dos tramos basados en el de Ramberg-Osgood, calibradas en base a ensayos de diferentes grados y que se pueden encontrar en (9).

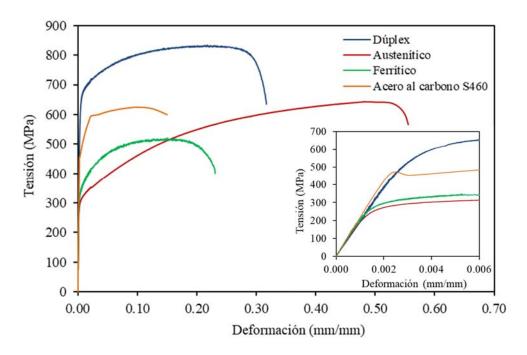


Figura 1 Curvas tensión-deformación para grados típicos de acero inoxidable y acero al carbono para deformaciones entre 0 y 0,6% y hasta rotura

La definición del límite elástico en materiales elasto-plásticos como el acero al carbono es sencilla, pero a la hora de trabajar con materiales no lineales como el acero inoxidable, la definición de este límite elástico es más compleja. La manera convencional de definir el límite elástico de cálculo para materiales de comportamiento no lineal suele ser la de adoptar la tensión correspondiente a una deformación plástica remanente del 0,2%.

Además de no-lineal, el comportamiento del acero inoxidable es también asimétrico y anisótropo, aumentando estas características con el trabajado en frío del material. Dicho trabajado en frio produce un mayor endurecimiento por trabajado, provocando el desarrollo de zonas plásticas más extensas y más deformables, con el correspondiente aumento de la resistencia por deformaciones plásticas.

Por ejemplo, el límite elástico puede aumentar hasta un 50% en las zonas de las esquinas en secciones rectangulares conformadas, y puede ocurrir durante la producción del acero inoxidable o en las operaciones de conformado. Aun así, este aumento de resistencia no siempre es beneficioso: requieren de maquinaria de fabricación más pesada y potente y de mayores fuerzas, la ductilidad puede verse reducida (aunque la ductilidad inicial suele ser muy alta, especialmente para los austeníticos), y pueden producirse tensiones residuales no deseadas.

Las curvas tensión-deformación hasta fractura de la Figura 1 permiten comparar la ductilidad de diferentes grados de acero inoxidable con la del acero al carbono. Puede observarse que el acero inoxidable austenítico es considerablemente más dúctil que el acero al carbono. Los aceros inoxidables austeníticos no muestran una transición entre el comportamiento dúctil y frágil; su tenacidad se reduce gradualmente conforme se reduce la temperatura. Por ello, se emplean de manera habitual en aplicaciones criogénicas, en las que sigue presentando un comportamiento dúctil (ver Figura 2). En cambio, los aceros inoxidables dúplex y ferríticos sí exhiben una transición entre el comportamiento dúctil y frágil, como puede observarse en la Figura 2. Aun así, cuentan con una adecuada tenacidad de fractura a temperaturas de servicio de hasta -40°C pero debe prestarse especial atención a las uniones soldadas, para garantizar la tenacidad adecuada en zonas afectadas por el calor.

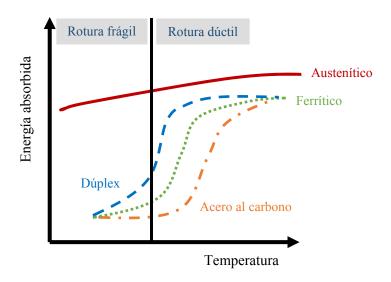


Figura 2. Curvas de transición dúctil-frágil para grados típicos de acero inoxidable y acero al carbono

En general, los aceros inoxidables cuentan con una serie de propiedades que los coloca en una situación inmejorable para estructuras sometidas a acciones accidentales, como son la relación resistencia última/límite elástico, considerablemente mayor que para el acero al carbono, y la mayor capacidad de absorción de energía debido al endurecimiento por deformación y a su excelente ductilidad. Cuentan también con unas propiedades muy adecuadas para hacer frente a acciones sísmicas al presentar una mayor ductilidad (especialmente los austeníticos), pudiendo absorber más ciclos de carga y presentando una mayor disipación histerética de energía bajo cargas cíclicas.

Otras de las excelentes características de los aceros inoxidables son sus propiedades térmicas y su buen comportamiento a altas temperaturas, que los hacen especialmente adecuados en estructuras sometidas a la acción de incendio. La elongación térmica del acero inoxidable es mayor que la del acero al carbono debido a su microestructura y a los elementos de aleación; no obstante, su conductividad térmica es significativamente menor que la del acero al carbono para prácticamente todo el rango de temperaturas de incendio.

La variación del calor específico del acero inoxidable con la temperatura es también considerablemente diferente a la del acero al carbono. Mientras que para el acero inoxidable este coeficiente aumenta paulatinamente con la temperatura, para el acero al carbono puede observarse un valor pico alrededor de los 735°C, que se corresponde con un cambio de fase en la estructura cristalina del material. No obstante, la tasa de calentamiento es más o menos similar en ambos materiales, puesto que el calor específico del acero inoxidable es menor que el del acero al carbono, pero la emisividad resultante del acero inoxidable es también menor que la del acero al carbono.

El acero inoxidable pierde resistencia y rigidez a medida que aumenta la temperatura, pero lo hace a una velocidad diferente a la del acero al carbono puesto que sus composiciones son diferentes y en general el acero inoxidable mantiene una mayor proporción de la resistencia y la rigidez a temperaturas elevadas que el acero al carbono. Como resultado, los pilares de acero inoxidable pueden retener su capacidad resistente durante mayores periodos de tiempo que los pilares equivalentes de acero al carbono, lo cual resulta de gran importancia en estructuras sometidas a fuego. La versión actualizada del *Manual de Diseño* (3) proporciona siete grupos de factores de reducción de resistencia y rigidez a altas temperaturas, para grupos de grados que muestran un comportamiento similar, en contraposición

a los factores de reducción recogidos en EN1993-1-4 (4), los cuales se proporcionan para grados específicos y cubren un menor número de grados.

3. Durabilidad y criterios para la selección de grados

Los aceros inoxidables son, en general, muy resistentes a la corrosión y se comportan satisfactoriamente en la mayoría de ambientes. El límite de la resistencia a la corrosión de un determinado acero inoxidable depende de sus elementos constituyentes, lo cual significa que cada grado de acero tiene una respuesta ligeramente diferente cuando se expone a ambientes corrosivos.

Los aceros inoxidables son resistentes a la corrosión en la mayoría de los ambientes que ocurren de manera natural. No obstante, y aunque su nombre invite a pensar lo contrario, algunos grados pueden ser susceptibles a fenómenos de corrosión local si se escoge un grado inadecuado, o se ve expuesto a condiciones inesperadas o si los elementos no se limpian. El término de aceros resistentes a corrosión podría resultar, pues, más adecuado en este contexto. Aun cuando las superficies quedan manchadas o corroídas, es improbable que la integridad estructural se vea comprometida, ya que es difícil encontrar elementos con corrosión uniforme si el grado se ha seleccionado correctamente. Sin embargo, la aparición de manchas antiestéticas de óxido en superficies externas puede ser considerada como un fallo por parte del usuario.

Las formas de corrosión más habituales que pueden aparecer en los elementos de acero inoxidable son:.

- La *corrosión por picaduras* es una forma localizada de corrosión que ocurre típicamente en ambientes que contengan cloruros. En la mayoría de aplicaciones estructurales, su alcance es generalmente superficial y la reducción de sección en los componentes es despreciable.
- La corrosión por hendiduras ocurre en aquellas hendiduras estrechas y no selladas en las que existe una fina capa de agua permanente, quedando restringida la difusión de los agentes oxidantes necesarios para mantener la capa pasivada. En general, sólo es potencialmente problemática en soluciones estancadas en las que los cloruros puedan acumularse.
- El desarrollo de la *fisuración por corrosión bajo tensión* requiere de la presencia simultánea de tensiones de tracción y factores medioambientales específicos que dificilmente se encuentran en atmósferas habituales de edificación. No es necesario que las tensiones sean especialmente elevadas en relación al límite elástico del material y pueden ser causadas por cargas o efectos residuales de procesos de fabricación como soldadura o doblado.

La medida más importante a tomar para prevenir los problemas que puede ocasionar la corrosión es seleccionar adecuadamente el grado de acero inoxidable para el ambiente que se prevea. En cualquier caso, tras la selección adecuada de un determinado grado de acero se conseguirá hacer uso de todo el potencial de resistencia a la corrosión que puede ofrecer dicho acero, si tal selección viene acompañada por buenos detalles constructivos. Las medidas anticorrosivas a adoptar deberían estar presentes en la fase de planteamiento del proyecto y obra, y en el desarrollo y diseño de todos los detalles constructivos. El *Manual de Diseño* (3) proporciona una serie de recomendaciones a seguir para reducir, en la medida de lo posible, los efectos perjudiciales de la corrosión. También se proporcionan algunos diseños de detalles constructivos adecuados e inadecuados para asegurar la durabilidad de la estructura.

Generalmente, cuanto mayor sea el nivel de resistencia a la corrosión exigido, mayor es el coste del material. Así pues, es necesario seleccionar cuidadosamente el grado de acero inoxidable más apropiado para una determinada aplicación, adecuando el contenido de aleación a las condiciones de servicio, lo cual puede resultar complicado debido a la variedad de grados disponibles. Por ello, la revisión y actualización de EN1993-1-4 (1) y del *Manual de Diseño* (3) incluyen un procedimiento para esta

selección de grados. Primero se determina el Factor de Resistencia a la Corrosión (FRC) relativo al ambiente (en función del riesgo de exposición a cloruros, a dióxido de azufre y del régimen de limpieza establecido), el cual indicará la Clase de Resistencia a la Corrosión (CRC) necesaria, garantizando que la corrosión no dañe la integridad estructural. Los grados de acero inoxidable se clasifican en cinco CRC, siendo la CRC V la más durable. La elección final de un grado específico dentro la CRC necesaria dependerá de otros factores diferentes de la resistencia a la corrosión, como la resistencia mecánica y la disponibilidad del producto. Es suficiente con que el proyectista especifique el material de acuerdo con la CRC y la resistencia de cálculo, p.e. CRC II y $f_v = 450 \text{ N/mm}^2$.

4. Cálculo estructural para el acero inoxidable

En esta sección se alude a las principales normas relativas al acero inoxidable como material estructural, tanto a nivel de material y de producto, como a las que hacen referencia al cálculo propio estructural. Asimismo, se presenta una selección de las principales consideraciones específicas para el proyecto en acero inoxidable frente al acero al carbono.

4.1 Normas, Manual de Diseño y recursos adicionales para el cálculo

La creciente demanda de estructuras de acero inoxidable ha fomentado el desarrollo de normas y guías de cálculo en el ámbito internacional. Aunque el cuerpo de doctrina del acero inoxidable es similar al del acero al carbono, las diferencias en el comportamiento tenso-deformacional hacen que no sean directamente aplicables muchos de los procedimientos clásicos de la resistencia de materiales y el cálculo de estructuras. La necesidad de definir estas consideraciones específicas para el proyecto en acero inoxidable frente al acero al carbono viene causada, en gran medida, por la no linealidad de su comportamiento tenso-deformacional, pero también por la distribución y nivel de tensiones residuales diferentes y por el endurecimiento por deformación, que puede influir en el comportamiento de los elementos.

La norma europea del acero inoxidable, EN1993-1-4:2006 (1) publicada en 2006, fue la primera normativa para acero inoxidable de la mayoría de países europeos y recoge las reglas suplementarias en aquellos apartados en los que las proporcionadas para acero al carbono no son aplicables.

El incremento significativo de los trabajos de investigación sobre el comportamiento estructural del acero inoxidable de las últimas décadas ha demostrado que algunas de las reglas recogidas en la edición de EN1993-1-4:2006 (1) resultaban muy conservadoras y de alcance limitado. Como resultado de la disponibilidad de estos nuevos datos, se han propuesto ciertas mejoras en la versión con enmiendas EN1993-1-4+A1:2015 (4), permitiendo un cálculo menos conservador, lo cual resulta esencial para el acero inoxidable debido a su alto coste inicial en relación con el del acero al carbono.

La publicación de las enmiendas ha dejado obsoletos los diferentes recursos existentes para la utilización de dicha norma, por lo que se ha preparado una nueva colección de recursos de diseño en el marco del proyecto de diseminación europeo PUREST, Promotion of new Eurocode rules for structural stainless steel (10). El proyecto, financiado por la Research Fund for Coal and Steel de la Unión Europea, ha tenido una duración de 18 meses y han participado varios socios europeos. Las actividades desarrolladas han sido la actualización y extensión del *Manual de Diseño* (3) y su traducción a otros 9 idiomas, el desarrollo de software de cálculo y aplicaciones para dispositivos móviles, la organización de seminarios y la grabación de webinars para formación a distancia. Todos estos recursos estarán disponibles en www.steel-stainless.org/designmanual.

4.2 Consideraciones específicas para el proyecto en acero inoxidable

A la hora de calcular las resistencias mecánicas de las secciones transversales se adoptan como límite elástico característico f_y y resistencia última característica f_u los valores mínimos especificados de la tensión correspondiente a una deformación remanente 0,2% y la resistencia última a tracción, respectivamente, proporcionados en UNE-EN10088-4 (11) y UNE-EN10088-5 (12). Estos valores hacen referencia a la condición de recocido del material, y por lo tanto resultan conservadores para materiales o secciones que hayan sido trabajados en frío durante su producción. Las secciones estructurales raramente se proporcionan en su condición de recocido.

Para el análisis estructural, se recomienda emplear un valor $200 \times 10^3 \text{N/mm}^2$ para el módulo de elasticidad para todos los aceros inoxidables, mientras que para el acero al carbono se adopta un valor de $210 \times 10^3 \text{N/mm}^2$. Debe tenerse en cuenta que la versión EN1993-1-4:2006 (1) propone un valor de $220 \times 10^3 \text{N/mm}^2$ para los aceros inoxidables ferríticos. No obstante, y dado que diferentes ensayos han demostrado que el valor de $200 \times 10^3 \text{N/mm}^2$ es más adecuado, se actualizará el valor recogido en la nueva versión de EN1993-1-4.

Para esbelteces altas, tanto las secciones como los elementos de acero inoxidable sometidos a cargas de compresión agotan a tensiones que están en el rango lineal del material, mostrando un comportamiento similar al del acero al carbono (suponiendo geometrías y tensiones residuales similares). En cambio, para esbelteces bajas, las secciones o los elementos alcanzan o pueden superar las resistencias plásticas por efecto del endurecimiento por deformación, presentando un comportamiento diferente. Esta no linealidad afecta al dimensionamiento y/o comprobación de elementos estructurales en aspectos como la abolladura local, la inestabilidad global y el cálculo de flechas.

En general, deberá emplearse el mismo procedimiento básico que para el acero al carbono, aunque deberán tenerse en cuenta algunos aspectos, siendo los coeficientes parciales de seguridad ligeramente superiores a los de acero al carbono ($\gamma_{M0}=1,10$, $\gamma_{M1}=1,10$ y $\gamma_{M2}=1,25$ frente a los valores recomendados para acero al carbono, $\gamma_{M0}=1,00$, $\gamma_{M1}=1,00$ y $\gamma_{M2}=1,25$). Las principales consideraciones específicas que deben tenerse en cuenta para el proyecto en acero inoxidable frente al acero al carbono se resumen a continuación.

4.2.1 Clasificación de secciones y cálculo de anchos eficaces

Las secciones transversales de acero inoxidable se clasifican también en cuatro, y debe seguirse el mismo procedimiento que para acero al carbono. Se establecen los mismos límites ancho/espesor excepto para los elementos internos comprimidos de las secciones Clase 2 y 3. La definición del parámetro ε es también ligeramente diferente para tener en cuenta el diferente valor del módulo de Young. Para el cálculo de los anchos eficaces en secciones Clase 4, el procedimiento a seguir es también idéntico al del acero al carbono. Tan sólo hay que tener en cuenta que la expresión para el cálculo del factor de reducción en elementos internos comprimidos es diferente.

4.2.2 Pandeo por flexión, pandeo lateral y verificación de elementos

En cuanto al cálculo de las resistencias frente a pandeo por flexión en pilares y frente a pandeo lateral de vigas de acero inoxidable, éstas pueden obtenerse a partir de los mismos procedimientos que para acero al carbono, pero empleándose diferentes curvas de pandeo. Estas curvas tienen la misma forma matemática que las recogidas para el acero al carbono, pero presentan factores de imperfección y esbelteces límite diferentes que dependen del tipo de sección transversal, del modo de pandeo considerado, del proceso de fabricación y del grado de acero inoxidable.

La verificación de los elementos flexocomprimidos se realizará a partir de expresiones análogas a las de acero al carbono, pero con factores de interacción diferentes, que dependen también del tipo de sección transversal y del tipo de acero inoxidable.

4.2.3 Uniones atornilladas y soldadas

Para las uniones atornilladas aplican las reglas de cálculo para acero al carbono, aunque para la resistencia de las partes unidas aplican reglas especiales de acero inoxidable y deberá garantizarse que la resistencia a la corrosión de la unión de acero inoxidable sea, al menos, equivalente a la del material a unir. Actualmente no existen reglas de cálculo para tornillos pretensados de acero inoxidable, aunque los resultados obtenidos en el proyecto de investigación europeo SIROCO (13) sugieren que los tornillos de acero inoxidable austenítico y dúplex pueden ser pretensados satisfactoriamente, siempre que se emplee el grado, método de apriete y lubricante adecuados. También se ha observado que la pérdida de pretensado que ocurre en los tornillos de acero inoxidable es similar a la observada en tornillos de acero al carbono y que los factores de deslizamiento medidos en superficies de acero inoxidable son como mínimo equivalentes a una Clase B. Las recomendaciones derivadas de este proyecto estarán pronto disponibles y se espera que sean incorporadas en la próxima revisión de EN1993-1-4 (1) y UNE-EN1090-2 (14). No obstante, deberán realizarse ensayos para demostrar la idoneidad de las uniones con tornillos de acero inoxidable pretensados.

En relación a las uniones soldadas de acero inoxidable, debe hacerse especial énfasis en que el acero inoxidable puede soldarse de la misma manera que el acero al carbono, aplicándose las mismas reglas de cálculo. Resulta esencial que las soldaduras se realicen empleando los procedimientos adecuados, soldadores cualificados y consumibles compatibles para mantener la resistencia a la corrosión de la soldadura y el material circundante. Se considera que los consumibles compatibles son aquellos con propiedades iguales o mayores que las del material base. Los aceros inoxidables austeníticos son generalmente fáciles de soldar mediante procesos comunes, siempre que se usen consumibles adecuados, aunque las distorsiones asociadas a la soldadura son mayores que para el acero al carbono. En cambio, los aceros inoxidables dúplex requieren un mayor control del aporte de calor durante la soldadura y pueden necesitar tratamientos térmicos post-soldadura o consumibles especiales.

4.2.4 Cálculo de flechas en ELS

Debido a la no linealidad de la curva tenso-deformacional la rigidez del acero inoxidable se reduce al aumentar las tensiones, por lo que se obtienen flechas ligeramente superiores para acero inoxidable que para acero al carbono.

Una manera conservadora de estimar las flechas es usar la teoría estándar de vigas utilizando el módulo secante E_S para la máxima tensión del elemento en ELS en lugar del módulo de Young. De manera simplificada, puede despreciarse la variación de E_S a lo largo del elemento y adoptar el valor mínimo en toda la longitud, Este método simplificado resulta preciso para el cálculo de flechas cuando el módulo secante se obtiene a partir de la máxima tensión en el elemento siempre que dicha tensión máxima no supere el 65% del límite elástico. Para niveles superiores de tensión, el método resulta muy conservador, debiendo utilizarse entonces un método más preciso que, por ejemplo, considere la integración a lo largo de toda la longitud del elemento, como el propuesto por (15).

4.2.5 Cálculo frente a incendio

Tanto UNE-EN1993-1-2 (16) como el *Manual de Diseño* (3) establecen los criterios a aplicar en el proyecto de estructuras de acero inoxidable para verificar su capacidad portante frente a incendio. Para

calcular la resistencia frente a incendio, en general se aplicará lo establecido para acero al carbono, aunque existen algunas diferencias entre los procedimientos a emplear definidos en ambos documentos.

Para las estructuras de acero inoxidable sometidas a la acción de incendio, para aquellos tipos estructurales en los que no haya efectos de inestabilidad, como vigas arriostradas o elementos traccionados, se empleará como tensión de referencia la correspondiente a una deformación total del 2%. El empleo de dicha tensión es debido al hecho de que el incendio es una acción accidental y en este caso se permiten mayores deformaciones. En cambio, para aquellos elementos estructurales en los que aparezcan fenómenos de inestabilidad, como la abolladura local, el pandeo por flexión, o el pandeo lateral, se empleará una tensión de referencia correspondiente a una deformación remanente del 0,2% puesto que la rigidez y la resistencia se degradan rápidamente. Ello se plantea en contraposición a lo que se asume para acero al carbono, en donde la tensión de referencia es la correspondiente al límite elástico. No obstante, la expresión de la función de resistencia adoptada para el acero inoxidable adopta el mismo formato que a temperatura ambiente, mientras que para acero al carbono la función de resistencia es menor, no considerándose en este caso meseta horizontal en la propia curva de pandeo.

4.2.6 Métodos avanzados de cálculo

Existen actualmente métodos avanzados de cálculo que permiten tener en cuenta la mejora de resistencia por conformado y el endurecimiento por deformación, con los que podemos alcanzar un cálculo y diseño más eficiente. Estos métodos son el resultado de las investigaciones llevadas a cabo en los últimos años y se recogen en diferentes anejos del *Manual de Diseño* (3), a la vez que se proporcionan directrices para la definición del material a emplear en análisis numéricos.

Mejora de la resistencia por conformado

El método que permite tener en cuenta la mejora de resistencia por efecto del conformado en frío durante los procesos de fabricación se encuentra detallado en el Anejo B del *Manual de Diseño* (3), y se basa en los trabajos publicados en (17). Estas expresiones pueden aplicarse a todos los tipos de secciones conformadas en frío para el cálculo de resistencias seccionales y de elementos. El método consiste en el cálculo de una resistencia mejorada que debe sustituirse por en las diferentes expresiones recogidas en la normativa o en el *Manual de Diseño* (3), y puede proporcionar incrementos de resistencia de hasta un 40% para cierto tipo de secciones, como por ejemplo las secciones huecas rectangulares.

Continuous Strength Method

Otro de los métodos avanzados desarrollados recientemente para un diseño más eficiente del acero inoxidable es el Continuous Strength Method, recogido en el Anejo D del *Manual de Diseño* (3) de acuerdo con (18). Este método permite tener en cuenta el endurecimiento por deformación del material, el cual no se contempla en los métodos convencionales de cálculo, proporcionando predicciones de resistencias más cercanas a la realidad y, permitiendo el máximo aprovechamiento de la capacidad resistente de las secciones transversales. De momento, el método sólo es aplicable para la resistencia seccional, pero se está trabajando en su extensión a elementos estructurales (19).

Es un método basado en criterios deformacionales, utilizando una curva que define la deformación máxima que una sección transversal puede alcanzar antes de abollar en función de la esbeltez local. A partir de esta deformación máxima puede obtenerse la tensión de cálculo mediante un modelo material elástico con endurecimiento lineal. Finalmente pueden determinarse las diferentes resistencias de cálculo a partir de las expresiones recogidas en el Anejo D del *Manual de Diseño* (3), resistencias que pueden llegar a ser alrededor del 60% superiores a las calculadas mediante los métodos tradicionales

Definición del material para modelos numéricos

La popularización y extensión del diseño asistido por elementos finitos durante la última década ha creado necesidades de cara a la definición de nuevos aspectos de la modelización como pueden ser las imperfecciones de los elementos y la definición del comportamiento del material, entre otros. Este último es un aspecto común a todos los softwares comerciales y que debe tratarse de manera especial para el acero inoxidable, y viene definido en el Anejo C del *Manual de Diseño* (3) y en el Anejo C de EN1993-1-4 (1). Para la descripción analítica de la relación no lineal entre la tensión y la deformación completa se emplea, como se ha comentado anteriormente, el modelo de Ramberg-Osgood de dos tramos. Este modelo necesita diferentes parámetros, como el límite elástico, el módulo de Young, la resistencia última y los exponentes de no linealidad, que pueden obtenerse de ensayos o estimarse a partir de tablas o ecuaciones (9).

A la hora de definir la curva tensión-deformación a emplear en la modelización por elementos finitos, existen diferentes alternativas en función de los datos que se conozcan. El Anejo C del *Manual de Diseño* (3) cuenta con una tabla que recoge los diferentes casos y define cómo pueden obtenerse los parámetros necesarios. De manera general, se recomienda emplear los valores medidos de los parámetros que se dispongan, y obtener el resto a partir de las ecuaciones o tablas proporcionadas en el Manual.

5. Aplicaciones recientes en Europa

Son varias las razones que pueden llevar a proyectar puentes y pasarelas o cubiertas en acero inoxidable. Además de proporcionar soluciones con necesidades mínimas de mantenimiento, proporcionan mayores vidas útiles de las estructuras y menores costes durante su ciclo de vida. Además, la gran capacidad mecánica de estos materiales conduce a estructuras ligeras con un menor consumo de material y mayor facilidad de construcción. Las estructuras cuentan con un nivel estético de gran calidad y un aspecto moderno, además de ser un material innovador que promueve la creatividad. Esta sección presenta algunas de las realizaciones estructurales en acero inoxidable más recientes en España y Europa.

La pasarela de Las Águilas (Murcia), mostrada en la Figura 3 y proyectada por VALTER, valenciana de estructuras S.L., es una de las más recientes realizaciones en acero inoxidable en España. La presencia de un ambiente marino de alta corrosividad y consideraciones de durabilidad como la valoración de los costes derivados del mantenimiento a lo largo de la vida útil de la pasarela llevaron a la elección de un acero inoxidable tipo dúplex (EN1.4462). La durabilidad de la pasarela se garantizó mediante una estrategia global, de manera que se cuidaron todos los detalles además de la selección de un grado adecuado. La pasarela salva un vano de 35m mediante dos vigas principales laterales en I de canto variable (de 0,72m en apoyos hasta 1,40m en centro de vano) y un cajón central de sección hueca rectangular.





Figura 3 Vista general de la pasarela en Las Águilas (Murcia) y fabricación de las vigas. Fotos cortesía de VALTER, valenciana de estructuras, S.L.

La Figura 4 muestra una cubierta en forma de cúpula de una nueva planta de fertilizadores en Polonia durante su construcción. La estructura cuenta con 144 elementos IPE270 curvos soldados mediante láser, con vanos de 15m, así como secciones angulares y en C laminadas en caliente. Todos los elementos (95 toneladas) se han fabricado en el grado EN1.4404 de acero inoxidable austenítico.



Figura 4 Empleo de secciones de acero inoxidable estructural en la cubierta de una planta de fertilizantes en Polonia. Foto cortesía de Montanstahl

La pasarela peatonal Pedro Arrupe en Abandoibarra (Bilbao), proyectada por IDEAM y terminada en 2003, es otra de las magníficas realizaciones en acero inoxidable que pueden encontrarse en nuestro país. Con una longitud total de 143m, salva un vano de 84m en su zona central. La sección transversal tiene forma de U y está conformada por paneles de 20mm de espesor de acero inoxidable dúplex (EN1.4362), el cual proporciona la necesaria resistencia a la corrosión, y cuya elevada resistencia mecánica permitió la reducción del peso total de la estructura. La Figura 5 muestra una de las últimas etapas del proceso de elevación de la pasarela.



Figura 5 Vista del proceso de construcción de la pasarela de Abandoibarra en Bilbao. Foto cortesía de IDEAM

El puente de Cala Galdana (Menorca) proyectado por Pedelta, inaugurado en 2005, fue también uno de los primeros puentes en acero inoxidable en el mundo. La estructura, de una longitud total de 55m, consta de dos arcos paralelos de 6m de flecha y 45m de luz. Como puede apreciarse en la Figura 6, los arcos están cruzados por dos vigas longitudinales y a los laterales se han soldado vigas transversales espaciadas 2m y conectadas al tablero. El acero inoxidable empleado en su construcción fue el grado dúplex EN1.4462 debido a su elevada resistencia mecánica y excelente resistencia frente a la corrosión, ya que el puente está localizado en un entorno marino. La mejor prueba de la correcta elección del material es la comparación de la estructura mostrada en la Figura 6, donde puede apreciarse cómo tras los 12 años de vida útil en un entorno costero con un mantenimiento mínimo la estructura no ha sufrido ningún daño por corrosión y presenta el mismo aspecto que en 2005.





Figura 6 Aspecto del puente tras su inauguración (21) y después de 12 años de vida útil (foto cortesía de Pedelta).

Agradecimientos

Este artículo se ha desarrollado en el marco del proyecto europeo PUREST, "Promotion of new Eurocode rules for structural stainless steel", financiado por la Research Fund for Coal and Steel de la Comisión Europea y del proyecto BIA2016-75678-R, AEI/FEDER, UE "Comportamiento estructural de pórticos de acero inoxidable. Seguridad frente a acciones accidentales de sismo y fuego", financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad.

Referencias

- (1) CEN (2006). *EN1993–1–4:2006. Eurocode 3. Design of steel structures. Part 1-4: General rules. Supplementary rules for stainless steels.* European Committee for Standardization (CEN).
- (2) AENOR (2012). UNE-EN1993-1-4:2012. Eurocódigo 3. Proyecto de estructuras de acero. Parte 1-4: Reglas generales. Reglas adicionales para los aceros inoxidables. Asociación Española de Normalización (AENOR).
- (3) Steel Construction Institute. Manual de Diseño para Acero Inoxidable Estructural, Cuarta Edición. Publicación P413, 2017.
- (4) CEN (2015). EN1993-1-4:2006+A1:2015. Eurocode 3. Design of steel structures. Part 1-4: General rules. Supplementary rules for stainless steels. European Committee for Standardization (CEN).
- (5) Baddoo, N.R. (2008). Stainless steel in construction: a review of research, applications, challenges and opportunities. *Journal of Constructional Steel Research*, 64(11): 1199-1206. http://dx.doi.org/10.1016/j.jcsr.2008.07.011
- (6) Rossi, B. (2014). Discussion on the use of stainless steel in constructions in view of sustainability. *Thin-Walled Structures*, 83: 181-189. http://dx.doi.org/10.1016/j.tws.2014.01.021
- (7) Yale University/ISSF Stainless Steel Project, 2009.
- (8) Cashell, K.A., Baddoo, N.R. (2014). Ferritic stainless steels in structural applications. *Thin-Walled Structures*, 83: 169-181. http://dx.doi.org/10.1016/j.tws.2014.03.014
- (9) Arrayago, I., Real, E., Gardner, L. (2015). Description of stress-strain curves for stainless steel alloys. *Materials & Design*, 87: 540-552. http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2015.08.001

- (10) Proyecto PUREST, Promotion of new Eurocode rules for structural stainless steel. RFSR-CT-2015-70960. Financiado por la Research Fund for Coal and Steel de la Comisión Europea.
- (11) AENOR (2010). UNE-EN10088–4:2010. Aceros inoxidables. Parte 4: Condiciones técnicas de suministro para chapas y bandas de aceros resistentes a la corrosión para usos en construcción. Asociación Española de Normalización (AENOR).
- (12) AENOR (2010). UNE-EN10088–5:2010. Aceros inoxidables. Parte 5: Condiciones técnicas de suministro para barras, alambrón, alambre, perfiles y productos brillantes de aceros resistentes a la corrosión para usos en construcción. Asociación Española de Normalización (AENOR).
- (13) Proyecto SIROCO Execution and reliability of slip resistant connections for steel structures using carbon steel and stainless steel. RFSR□CT□2014□00024. Financiado por la Research Fund for Coal and Steel de la Comisión Europea.
- (14) AENOR (2011). UNE-EN 1090-2:2011. Ejecución de estructuras de acero y aluminio. Parte 2: Requisitos técnicos para la ejecución de estructuras de acero. Asociación Española de Normalización (AENOR).
- (15) Real, E., Mirambell, E. (2005). Flexural behaviour of stainless steel beams. *Engineering Structures*, 27(10): 1465-1475. http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2005.04.008
- (16) AENOR (2011). UNE-EN 1993-1-2:2011. Eurocódigo 3: Proyecto de estructuras de acero. Parte 1-2: Reglas generales. Proyecto de estructuras sometidas al fuego. Asociación Española de Normalización (AENOR).
- (17) Rossi, B., Afshan, S., Gardner, L. (2013). Strength enhancements in cold-formed structural sections Part II: Predictive models. *Journal of Constructional Steel Research*, 83: 189-196. http://dx.doi.org/10.1016/j.jcsr.2012.12.007
- (18) Afshan, S., Gardner, L. (2013). The continuous strength method for structural stainless steel design. *Thin-Walled Structures*, 68(4): 42-49. http://dx.doi.org/10.1016/j.tws.2013.02.011
- (19) Arrayago, I., Real, E., Mirambell, E., Gardner, L. (2017). The Continuous Strength Method for stainless steel columns. *Proceedings of the Fifth International Experts Seminar in Stainless Steel in Structures*. London, UK.
- (20) Nickel Institute. (2017). Águilas Footbridge, Murcia (Spain). Stainless steel case study.
- (21) EuroInox. (2007). Puente en Cala Galdana, Menorca. Stainless steel case study.