

# **ALGUNAS SINGULARIDADES DEL ACERO INOXIDABLE COMO MATERIAL ESTRUCTURAL**

*Javier Pascual Santos*  
*Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos*

*Tomás Ripa Alonso*  
*Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos*

*Francisco Millanes Mato*  
*Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos*

*IDEAM S.A. - Madrid*  
*C/ Velázquez 41, 1º A*  
[general@ideam.es](mailto:general@ideam.es)

## **RESUMEN**

En la primera parte de este artículo se detallan los aspectos específicos del acero inoxidable como material. Se describen los aspectos metalúrgicos de los que se deriva su respuesta ante la corrosión y su aptitud para el empleo como material resistente en estructuras portantes, así como los distintos procesos corrosivos que pueden afectarle, con especial énfasis en aquellos más propios del ámbito de la ingeniería civil.

En la segunda parte se comentan las realizaciones conocidas por los autores en puentes con inoxidable en chapas principales, y se analizan en detalle las singularidades del empleo del acero inoxidable como estructura principal a la luz de la experiencia de los autores en el proyecto de dos pasarelas de envergadura en Bilbao y en Oporto, y la ejecución ya terminada de la primera de ellas. Todo ello desde la perspectiva de la concepción y diseño de la estructura, del cálculo de la misma, y de su fabricación en taller y montaje en obra.

## **1. EL MATERIAL ACERO INOXIDABLE**

Desde la perspectiva más simple, podemos concebir el acero inoxidable como el resultado de añadir un cierto porcentaje de cromo al acero convencional. Esta adición provoca que, al exponerse al aire o a otro medio oxidante, se forme en la superficie una capa de óxido de cromo muy delgada, del orden de pocos nanómetros, pero a la vez muy poco porosa y muy adherente al metal base, y con estabilidad suficiente frente a eventuales ataques químicos para impedir el progreso de la corrosión hacia el interior. Esta capa de óxido de cromo superficial que protege al

material se denomina por ello capa de pasivación, y es la responsable de la resistencia a la corrosión del acero inoxidable, al impedir su reacción con los óxidos de la atmósfera. La capa de pasivación es además autorregenerable, de modo que se renueva por sí misma rápidamente en el caso de resultar dañada por medios mecánicos.

Lógicamente, la introducción del cromo en la fabricación del acero requiere a su vez la modificación del contenido en los otros elementos presentes en el acero convencional, principalmente manganeso y silicio, y va acompañada de una reducción en la proporción de carbono. Además, al objeto de adaptar las prestaciones del acero inoxidable a los distintos requerimientos del material en función del uso al que se destine, la metalurgia ha desarrollado un amplio abanico de aleaciones resultantes de la combinación del cromo con otros elementos, como el níquel y el molibdeno, aunque también se encuentran frecuentemente adiciones de nitrógeno, titanio, niobio y cobre. La combinación de cromo y de níquel en distintas proporciones es en general el parámetro más determinante en las propiedades del material resultante. Por ello, en función de las proporciones en que combinen estos elementos se establece tradicionalmente la clasificación principal de los aceros inoxidables en los cinco grupos indicados en la figura 1. [1]

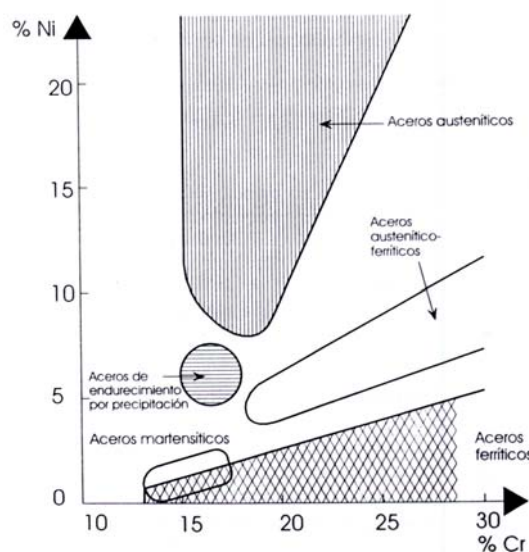


Figura 1: Tipos de acero inoxidable en función de la proporción Cr-Ni.

Todos ellos tienen sus distintas aplicaciones características, pero los más extendidos son los aceros inoxidables austeníticos. Estos aceros combinan una excelente resistencia a la corrosión derivada de su contenido en cromo con unas prestaciones mecánicas apreciables y una buena soldabilidad procedente del contenido en níquel, y resultan por tanto muy adecuados para las aplicaciones más generales, tanto en arquitectura como en la industria convencional. No obstante, en el ámbito específico de la ingeniería civil, y en aquellos casos donde las prestaciones mecánicas resulten determinantes, como puede ser el caso de los puentes, son significativamente preferibles los aceros austenítico-ferríticos, también llamados aceros dúplex. Estos aceros presentan en general un alto contenido en cromo, por encima del 20%, y un moderado contenido en níquel, entre el 4 y el 8% generalmente. El contenido en carbono suele ser bajo, y presentan además una fracción variable de

molibdeno (0.3% al 4%) y de nitrógeno. El nitrógeno colabora activamente a incrementar la resistencia y a estabilizar la doble estructura del material, y el molibdeno mejora la aptitud del inoxidable en ambientes especialmente agresivos, como pueden ser los ambientes marinos o con exceso de sales, principalmente cloruros.

La combinación así obtenida proporciona un material de excelentes prestaciones mecánicas, análogas e incluso a veces superiores al acero al carbono convencional, y con una excelente resistencia a la corrosión atmosférica, incluso en ambientes agresivos. Pero además añade a ello unas aptitudes formales y expresivas de gran potencia, claramente diferenciadas de los aceros convencionales, y que abren sin duda alguna un horizonte enorme de posibilidades en la concepción y diseño de las estructuras. (Figura 2).

Las Normativas que tradicionalmente han regulado los aceros inoxidables en lo que respecta a la denominación del producto, su composición química y sus propiedades características han tenido un carácter eminentemente nacional, lo que ha dado lugar a una situación en general bastante confusa en la identificación de un determinado material. Afortunadamente, las normativas nacionales europeas están ahora en proceso de unificación en las EN, de modo que es de esperar que en un futuro próximo el marco del acero inoxidable quede regido únicamente por tres grupos de normas básicas de producto, EN, ASTM y JIS, de ámbito europeo, americano y japonés respectivamente. Un listado exhaustivo de las normativas básicas de cada grupo puede encontrarse en [2], si bien a continuación indicamos las normas de producto más representativas para los aceros dúplex en chapa laminada en caliente, que son los aceros empleados en las realizaciones de puentes existentes en la actualidad en sustitución de los aceros convencionales:

EN 10088-1	Stainless steels. – List of stainless steels
EN 10088-2	Stainless steels. – Sheet/plate and strip for general purposes
ASTM A480	General requirements for flat-rolled stainless and heat resisting steel
ASTM A167	Stainless and heat-resisting Cr-Ni steel plate, sheet and strip
JIS G4304	Hot rolled stainless steel plates, sheets and strip

En función de la proporción en que se combinan los distintos elementos existen muchos tipos de acero inoxidable, que en la terminología correcta se denominan grados. El sistema de designación de los distintos grados es diferente en EN y en ASTM. El sistema seguido en EN consiste en designar cada grado por cinco números. El primero es 1 seguido de un punto, e indica que se trata de un acero. A continuación siguen cuatro dígitos. Los dos primeros clasifican el acero como inoxidable y establecen la presencia o no de adiciones de molibdeno, niobio, titanio, níquel o cobre, y los dos últimos definen la aleación exacta, que en todo caso debe consultarse en la norma, sin que la denominación aporte más información. El sistema ASTM es diferente, y adopta el Sistema Unificado de Numeración (UNS) basado en el sistema tradicional AISI. Cada grado se define por un número y, si es preciso, con letras adicionales. Los aceros dúplex corresponden a la serie S30000. Por su parte, el sistema JIS es similar al ASTM con algunas variantes. Un listado extenso de las equivalencias de aceros entre las distintas normas puede encontrarse en [2].

## **2. LA CORROSION DEL ACERO INOXIDABLE**

El acero inoxidable no es un metal noble, como pudieran ser el oro o el platino, que son prácticamente inertes en la mayoría de los ambientes. El acero inoxidable debe su resistencia a la corrosión a la formación de la capa de pasivación superficial antes citada. No obstante, esta capa de pasivación puede verse alterada y dañada de forma permanente en ciertos ambientes agresivos,

lo que provocará el desarrollo de determinados procesos de corrosión en el metal. Estos procesos pueden resumirse en seis [3] : corrosión uniforme, corrosión galvánica o electroquímica, corrosión localizada (picaduras y corrosión en entallas), corrosión bajo tensión, corrosión fatiga y corrosión intergranular. Resulta necesario conocer la naturaleza de estos procesos de corrosión para un empleo adecuado del acero inoxidable, por lo que seguidamente se exponen las características fundamentales de cada uno de ellos y los consiguientes procesos de corrosión que se generan.

La corrosión uniforme ocurre cuando toda o una gran parte de la capa de pasivación se destruye. Tiene lugar casi exclusivamente en el caso de exposición a soluciones ácidas o básicas calientes. La resistencia al ataque por ácidos es buena frente a concentraciones moderadas de ácidos oxidantes como el nítrico, mientras que algunos agentes resultan especialmente agresivos incluso para concentraciones bajas, como el ácido clorhídrico o el ácido fluorhídrico. En todo caso, estos procesos tienen lugar casi exclusivamente en el ámbito de la industria química, por lo que no es de esperar que este tipo de corrosión se produzca en el empleo usual del acero inoxidable en obra civil.

A pesar de la aparente gravedad de la corrosión uniforme, al manifestarse en una pérdida de masa generalizada en el acero inoxidable, es la forma de corrosión más predecible y cuantificable, y en general se resuelve fácilmente con un adecuado programa de mantenimiento y reposición de los elementos potencialmente afectables. Por el contrario, la corrosión galvánica o electrolítica abarca procesos de mayor complejidad química y por tanto su tratamiento y predicción a nivel cuantitativo resultan más difíciles. Esta corrosión tiene lugar cuando dos metales de distinto potencial galvánico están en contacto e inmersos en un medio conductor o electrolito, en cuyo caso ambos metales acoplados pueden presentar una velocidad de corrosión muy distinta a la que presente cada uno de forma individual en el mismo ambiente. El metal más noble del par, aquél que tiene un potencial galvánico más alto para el ambiente en cuestión, se comporta como el cátodo, atrayendo iones del metal menos noble, el ánodo, que consecuentemente pierde masa por el proceso de corrosión galvánica, de forma más acentuada en las proximidades del contacto entre los dos metales. En tanto en cuanto el acero inoxidable permanezca pasivado, es un metal más noble que cualquier otro metal empleado en construcción. Por tanto, el acero inoxidable será el cátodo del par galvánico, y el metal susceptible de sufrir corrosión galvánica será el acoplado al inoxidable. No existen, por el contrario, problemas de corrosión galvánica entre distintos grados de acero inoxidable.

La relevancia de los efectos de corrosión galvánica depende fundamentalmente de la naturaleza y cinética de las reacciones electroquímicas que tengan lugar en el electrolito en contacto con los metales. Factores determinantes en el proceso son la diferencia de potencial electroquímico entre los dos metales, la relación de áreas expuestas entre ambos, la temperatura, y la composición y conductividad del electrolito. La gran variación posible en estos factores y, sobre todo, la sensibilidad del proceso de corrosión a los mismos impide, a día de hoy, la existencia de una metodología de análisis que permita cuantificar el proceso de forma práctica para el diseño de casos reales. Por ello, en el caso de que exista riesgo potencial de corrosión galvánica en la estructura, es imprescindible en la fase de concepción y diseño de los detalles adoptar las medidas protectoras oportunas para evitar la formación de una célula galvánica entre los dos metales en contacto, lo que, como posteriormente se expone, puede condicionar en gran medida los diseños.

Por su parte, la corrosión localizada comprende las picaduras y la corrosión en entallas o hendiduras. Se caracteriza por manifestar un daño local de la capa de pasivación, mientras que la restante superficie pasivada permanece intacta. Las picaduras, por ejemplo, aparecen como

pequeñas manchas de óxido en la superficie del inoxidable, si bien pueden presentar extensiones muy significativas en el interior de la chapa. La corrosión localizada se produce principalmente en presencia de cloruros, presentes no sólo en el agua de mar sino también en la humedad atmosférica, en mayor concentración cuanto mayor sea la proximidad al mar. El contacto de cloruros con el acero inoxidable puede provocar un daño localizado en la capa de pasivación, especialmente si existe inicialmente algún tipo de defecto superficial en el acero. Una vez se produce la pérdida localizada de la capa de pasivación, la picadura se comporta como una célula galvánica, siendo el ánodo la propia picadura mientras que el material inoxidable pasivado circundante actúa como cátodo. La pequeña superficie de ánodo en relación a la superficie de cátodo circundante provoca que la diferencia de potencial electronegativo sea muy grande, acelerando el proceso de propagación de la picadura. Adicionalmente, la presencia de iones metálicos positivos en disolución en la picadura atrae electroquímicamente a los iones cloruro, cuya concentración aumenta progresivamente provocando un ambiente crecientemente agresivo y poco probable de pasivarse de forma espontánea. El proceso de corrosión localizada en entallas o hendiduras es análogo al descrito para las picaduras, siendo incluso más corrosivo debido a que las tensiones superficiales del agua en una entalla provocan indefectiblemente la penetración de humedad en la misma, aumentando la concentración de iones cloruro e impidiendo la penetración de oxígeno capaz de pasivar el acero. La resistencia a la corrosión localizada de un acero suele cifrarse con el parámetro CPT, temperatura crítica de picadura, que se define en un ensayo normalizado de laboratorio. No obstante, esta temperatura no guarda relación con la temperatura ambiental máxima a la que pueda ser sometido dicho acero inoxidable.

A la vista del proceso descrito, las estructuras de acero inoxidable en obra civil sí son susceptibles de ser atacadas por procesos de corrosión localizada, especialmente en ambientes agresivos. Los aceros dúplex empleados en obra civil presentan buena resistencia a la corrosión localizada del acero inoxidable, pero si la agresividad del ambiente es apreciable, deben emplearse aceros mejorados por la adición de molibdeno y nitrógeno. Y por supuesto debe tenerse muy presente la corrosión localizada en el diseño, evitando todo tipo de efectos de entalla en los encuentros de chapas, como por ejemplo las soldaduras en ángulo por un solo lado, aun en uniones no resistentes, y garantizar, en general, el correcto desagüe del agua, evitando su posible estancamiento en encuentros angulosos de chapas.

La corrosión bajo tensión se produce por el efecto combinado de un ambiente corrosivo unido a un estado tensional de tracción en el metal, y puede provocar roturas frágiles súbitas. La corrosión bajo tensión se produce en presencia de soluciones de cloruros a altas temperaturas, generalmente superiores a 50 °C. En tales circunstancias, incluso pequeñas concentraciones de cloruros pueden provocar la rotura súbita por corrosión bajo tensión en zonas especialmente afectadas por las tensiones residuales de fabricación. En caso de que la temperatura sea notablemente inferior, puede también producirse corrosión bajo tensión, si bien se requieren entonces concentraciones muy elevadas de cloruros. Los aceros inoxidables dúplex presentan, en general, una buena resistencia a la corrosión bajo tensión, que es incluso mejorable con altas aleaciones de níquel y molibdeno. Teniendo en cuenta la buena resistencia de estos aceros y el tipo de ambiente descrito que provoca la corrosión bajo tensión, es en general altamente improbable que se produzca este fenómeno en el empleo estructural del acero inoxidable en ingeniería civil.

El proceso de corrosión-fatiga es análogo al de corrosión bajo tensión, si bien el efecto de los ciclos de carga puede provocar la rotura súbita, por el efecto conjunto de la corrosión y la fatiga del material, incluso en presencia de concentraciones bajas de cloruros y temperaturas ambiente moderadas. Existe constancia de roturas por corrosión-fatiga en el empleo de acero inoxidable en

la industria mecánica. En el ámbito de la ingeniería civil, las pasarelas peatonales están exentas de ciclos significativos de fatiga. Pero, si como es previsible, el empleo del inoxidable se extiende al campo de los puentes carreteros y ferroviarios, debe considerarse con detenimiento la resistencia a corrosión-fatiga del acero inoxidable en el caso de estar expuesto a un ambiente corrosivo con cloruros. Deben emplearse aleaciones que potencien al máximo la resistencia a la corrosión del inoxidable, incluso con estudios específicos de respuesta del acero a la agresión previsible en el emplazamiento. Son también de aplicación todos los procesos de mejora de la respuesta del acero a fatiga aplicables a los aceros convencionales, como tratamientos térmicos o procesos mecánicos.

Por último, los aceros inoxidables pueden presentar también procesos de corrosión intergranular, que consiste fundamentalmente en la precipitación de cristales de carburo de cromo cuando se somete al acero a temperaturas en el rango de 550 a 850°C, tales como las que se alcanzan en los procesos de soldadura. La formación de los cristales de carburo de cromo provoca la disminución del contenido de cromo en la matriz que circunda a los granos precipitados, volviéndose aquélla menos resistente a la corrosión, lo que se denomina “sensibilización” del acero inoxidable. No obstante, puede afirmarse que en general la corrosión intergranular ya no es un problema en los aceros inoxidables modernos, debido a las mejoras en las aleaciones y procesos de fabricación. En primer lugar, en la fabricación el acero inoxidable es sometido a un proceso de calentamiento hasta temperaturas de 1000-1200 °C, para las que los carburos de cromo se disuelven, seguido de un rápido enfriamiento con agua, que provoca la precipitación de cristales de carbono exclusivamente sin pérdida de cromo en la matriz. En segundo lugar, los bajos contenidos de carbono de los aceros inoxidables modernos reducen el riesgo de formación de carburos de cromo durante los procesos de soldeo por la limitación del contenido en carbono libre o, alternativamente, la adición de titanio o niobio que colaboran a la “estabilización” del acero inoxidable incluso con contenidos de carbono mayores.

A la vista de lo anterior y a modo de resumen, podemos concluir que en el ámbito específico de las estructuras de obra civil, los dos procesos corrosivos predominantes son la corrosión galvánica y la corrosión localizada en picaduras y entallas, que, como veremos, deben resolverse siempre con un adecuado diseño de los detalles y tratamientos superficiales en la fase de concepción de la estructura. Las estructuras ubicadas en ambientes especialmente agresivos o las estructuras sometidas a fatiga requieren un estudio específico para la determinación del material.

### **3. LA UTILIZACION DEL ACERO INOXIDABLE EN PUENTES**

Ya hemos indicado anteriormente que los aceros inoxidables tipo dúplex resultan muy apropiados para su empleo en puentes como material estructural en sustitución de los aceros convencionales cuando a las características mecánicas de éstos se desean añadir las cualidades formales y estéticas que proporciona el acero inoxidable. No obstante, hasta muy recientemente el empleo del inoxidable en puentes se había limitado principalmente a los elementos funcionales y de acabado de plataforma sin responsabilidad estructural, y, dentro de los elementos estructurales, a apoyos, uniones y barras para tirantes. Por ejemplo son varias las realizaciones en puentes arco en las que al acero convencional en los arcos y estructura del tablero se ha incorporado el acero inoxidable para la materialización de las péndolas de cuelgue del tablero, como el nuevo puente de Gombaro o la pasarela de Terni, ambos en Italia.

No obstante, en marzo de 2002 se inauguró en Bilbao la pasarela peatonal Pedro Arrupe (figura 2), proyectada por Ideam S.A, y que incorpora 450 toneladas de acero inoxidable en chapa laminada en caliente para materializar la estructura principal. Supone la primera realización de esta

magnitud en acero inoxidable en chapa como estructura principal, y dada la envergadura de la pasarela, con 142.25 metros de longitud y anchura en clave de 7.60 metros, y las rampas en ambos lados a modo de rombo abrazando al camino principal, puede considerarse como la obra pionera en la introducción del acero inoxidable como material estructural base en puentes. El acero empleado es tipo dúplex EN 1.4362, equivalente al ASTM S32304, y fue suministrado por el grupo sueco Avesta Sheffield. Una descripción de la pasarela, su respuesta resistente estática y dinámica, y el proceso de montaje puede encontrarse en [4] y [5]. La composición química y las características mecánicas del acero se incluyen en las tablas 1 y 2. Esta última pone de manifiesto la bondad de las prestaciones mecánicas del acero inoxidable, que en absoluto resultan inferiores al acero al carbono convencional.



Figura 2: Pasarela peatonal Pedro Arrupe, en Bilbao.

Tabla 1: Composición del acero inoxidable EN1.4362 empleado en Bilbao. (% en peso)

C	Cr	Ni	Mo	N	Si	Mn	P	S
<0,03	23	4,5	0,3	0,10	≤1,00	≤2,00	≤0,035	≤0,015

Tabla 2: Características mecánicas y físicas del acero inoxidable EN 1.4362 empleado en Bilbao.

Rp0,2% (N/mm <sup>2</sup> )	Ru (N/mm <sup>2</sup> )	ε <sub>u</sub> (A5)	E (kN/mm <sup>2</sup> )	α (°C <sup>-1</sup> )
400 (450)	630 (670)	0.25 (0.40)	200	13x10 <sup>-6</sup>

(Valores mínimos exigidos por EN para este acero. Entre paréntesis valores garantizados por el suministrador)

En junio de 2003 se otorgó el Swedish Steel Design Award a la nueva pasarela sobre el Sickla Canal de Estocolmo, con proyecto de los arquitectos Erik Andersson, Jelena Mijanovic y Magnum Stahl. La pasarela salva el cruce de 62 metros de longitud con 80 toneladas de acero dúplex EN

1.4462 (ASTM S31803, también denominado ASTM S32205) para materializar una sección cajón triangular de acero inoxidable atirantada lateralmente en ambos extremos. El jurado que otorgó el premio destacó el diseño innovador y el empleo del acero inoxidable como único material estructural de la pasarela.

En el mismo acero EN 1.4462 empleado en la pasarela de Estocolmo, Ideam S.A., en colaboración con AFA, proyectó en el año 2001 una nueva pasarela peatonal sobre el río Duero uniendo las ciudades de Oporto y Vila Nova de Gaia. La estructura salva el vano único de 156 metros de luz con un arco muy rebajado y empotrado en ambos extremos, con sección ovoidal variable materializada en acero inoxidable [6], y se ubica en el mismo emplazamiento que el antiguo puente colgante de Oporto, en un entorno privilegiado tanto por la presencia del río y el casco antiguo de Oporto, recientemente declarado Patrimonio de la Humanidad por la UNESCO, como por la sucesión de maravillosos puentes ya históricos que salvan el río a ambos lados de la ubicación de la pasarela. No obstante, las autoridades portuguesas no se han decidido por su construcción. La ubicación de un elemento nuevo de gran expresividad formal en un entorno tan simbólico requiere el consenso general de muchas partes a veces difícilmente alcanzable.

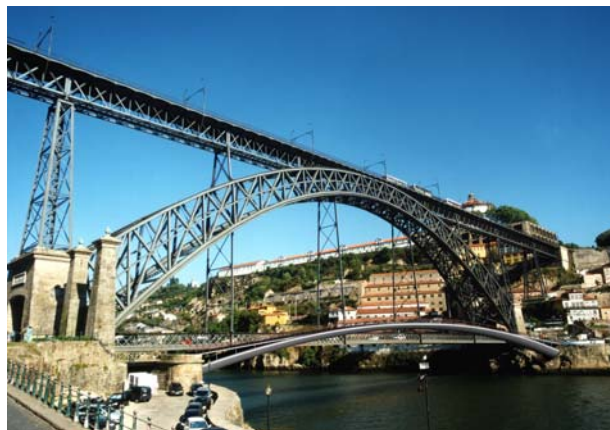


Figura 3: Pasarela sobre el río Duero, en Oporto.

Tabla 3: Composición del acero inoxidable EN1.4462 proyectado en Oporto. (% en peso)

C	Cr	Ni	Mo	N	Si	Mn	P	S
<0,03	22	5,7	3,1	0,17	≤1,00	≤2,00	≤0,035	≤0,015

Tabla 4: Características mecánicas y físicas del acero inoxidable EN1.4462 proyectado en Oporto.

Rp0,2% (N/mm <sup>2</sup> )	Ru (N/mm <sup>2</sup> )	εu (A5)	E (kN/mm <sup>2</sup> )	α (°C <sup>-1</sup> )
460	640	0.25	200	13x10 <sup>-6</sup>

Un aspecto muy importante a considerar en el diseño en acero inoxidable es la elección adecuada del grado de acero, que, como vemos, ha sido diferente en la pasarela de Bilbao que en las



pasarelas de Estocolmo y de Oporto. Tanto ENV 1993-1-4:1996 como la futura prEN correspondiente, actualmente en stage 34 draft, establecen una guía de carácter cualitativo para la elección del grado adecuado. No obstante, dado que en puentes las prestaciones mecánicas requeridas exigen el empleo de aceros dúplex, en general la elección del tipo de acero se limitará a la elección del grado de acero dúplex que proporcione una adecuada resistencia a la corrosión en función del tipo de ambiente en el lugar de emplazamiento. Con carácter general, podría establecerse que en ambientes rurales, o urbanos e industriales sin condiciones especiales de agresividad, cualquier acero dúplex normalizado debe proporcionar resistencia a la corrosión suficiente, sin más que prever un programa ordinario de inspección y mantenimiento preventivos. No obstante, debe prestarse especial atención a la posible presencia de agentes químicos específicos, en especial iones cloro, que pudieran aumentar apreciablemente la agresividad, por ejemplo por la cercanía del mar, la existencia de procesos industriales contaminantes o, por supuesto, sales de deshielo. En estos casos es preciso potenciar la resistencia a la corrosión del material empleando aceros dúplex ricos en molibdeno y eventuales adiciones de nitrógeno, que junto con el cromo mejoran sustancialmente la resistencia a la corrosión del material. Por este motivo el acero empleado en Bilbao es distinto al empleado en Estocolmo y Oporto, atendiendo a criterios de proximidad al mar y contenido en cloruros atmosféricos. En el primer caso basta el acero EN 1.4362, con una cantidad mínima de molibdeno del 0.3%. En los otros dos casos se ha hecho preciso emplear un acero EN 1.4462, rico en molibdeno (3.1%). No obstante, y con independencia de las ideas expuestas y las indicaciones de ENV y prEN, es siempre necesario en la elección del material en fase de proyecto el asesoramiento de los servicios técnicos de las metalurgias fabricantes de inoxidable, como garantía adicional de la aptitud del material a las condiciones específicas del lugar de emplazamiento.

Otras realizaciones recientes de puentes en acero estructural inoxidable ponen de manifiesto el interés despertado por este material, y sus enormes posibilidades futuras, como las nuevas pasarelas en el campus universitario de Minneapolis sobre la Washington Avenue, o el puente arco mixto entre acero inoxidable y hormigón recientemente proyectado en Menorca por Juan Antonio Sobrino.

#### **4. SINGULARIDADES DEL EMPLEO DEL INOXIDABLE EN PUENTES**

A continuación, y a la luz principalmente de nuestra experiencia durante el proyecto y construcción de la pasarela Pedro Arrupe en Bilbao, vamos a comentar algunos aspectos específicos derivados del empleo del acero inoxidable que consideramos de interés. Nos centraremos únicamente en los aspectos singulares que, respecto a un diseño más convencional con aceros al carbono, ha supuesto el empleo del acero inoxidable, y lo haremos no sólo desde la perspectiva de la fase de proyecto, sino también desde nuestra experiencia durante la obra de la incidencia del material empleado en los ritmos y procesos de ejecución.

##### **4.1 En la fase de concepción y diseño de detalles.**

Las exigencias formales del acero inoxidable, que, como hemos indicado, son en buena medida la motivación más significativa para su empleo como material principal en estructuras portantes, exigen en general condicionar el despiece constructivo a las posibilidades de fabricación para minimizar el número de soldaduras vistas. En un diseño en acero inoxidable no resulta admisible generar un mosaico de chapas, característico muchas veces en los puentes en acero convencional, para constituir por soldadura las distintas chapas que conforman los tableros cajón, o incluso vigas en I cuando el canto es significativo. La anchura máxima de chapa laminable por la siderurgia

suministradora no sobrepasa un valor en general moderado, que en el caso de Bilbao resultó ser de tres metros. Por ello, al objeto de evitar todo tipo de soldaduras vistas, la sección transversal en U de la pasarela se concibió por plegado de la chapa base en lugar del soldeo típico de los cajones, y se planteó un despiece modulado longitudinalmente en dovelas de tres metros de longitud, soldadas a tope entre sí para materializar los distintos tramos de montaje para su traslado a obra. Esta soldadura, además, debe ejecutarse desde el interior de la dovela y con chapa de respaldo exterior, dado que ésta evita la necesidad de cualquier amolado exterior en el cordón ejecutado y consecuentemente se evita el pulido y alteración de la textura de los paramentos vistos de acero inoxidable que cualquier tratamiento mecánico introduce. Entre dovela y dovela la chapa de respaldo precisa para realizar las soldaduras a tope se ha potenciado en el diseño con su empleo a modo de costilla, y, además de ocultar el cordón de soldadura transversal entre dovelas, juega también un papel determinante en la textura final de los paneles terminados. (Figura 4). Una modulación análoga en dovelas y costillas se ha empleado también con posterioridad en la pasarela de Minneapolis citada anteriormente. Asimismo, una vez concluido el soldeo entre las dovelas, se han dispuesto cordones finos de cierre a ambos lados de las costillas uniendo éstas con la superficie de las dovelas, al objeto de evitar el efecto entalla que pudiera iniciar la corrosión en fisuras descrita en el apartado 2 en el espacio resultante entre la superficie de la dovela y la propia costilla. Debe tenerse presente en el diseño que la zona local afectada por la soldadura sufre un deterioro importante en la capa de pasivación que es preciso en general limpiar una vez concluidas las operaciones, según se indica más adelante, pero esta limpieza no es posible en el área no accesible oculta tras la propia costilla.



Figura 4: Grupo de dovelas de inoxidable ya soldadas entre sí.

Por otra parte, si bien el empleo del acero inoxidable resulta justificado en el caso de paneles vistos en los que se requieran al máximo sus cualidades estéticas, tanto su mayor coste respecto al acero convencional, como las mayores tensiones residuales y deformaciones que introduce su soldeo, aconsejan plantearse la posibilidad en el proyecto de combinar el acero inoxidable con los aceros al carbono. Así, parecería razonable disponer el acero inoxidable en los planchados principales vistos que conforman la estructura principal, y que en general se diseñan como se ha visto minimizando el impacto de las soldaduras, pero realizar las estructuras interiores de rigidización y arriostamiento en acero al carbono. Esta es la solución planteada en la pasarela de Bilbao, en la que el acero estructural interior se ha proyectado en corten. No obstante, el empleo conjunto de aceros inoxidables y corten obliga a considerar en el diseño de los detalles la posible incidencia del par galvánico, y disponer por tanto las protecciones adecuadas para evitar la corrosión bimetalica, ya descrita en el apartado 2 de este artículo.

En el caso de la utilización conjunta del acero inoxidable y del corten el metal susceptible de corroerse es el corten, en función de las áreas relativas de los metales en contacto, la temperatura y la composición del electrolito en contacto con ambos metales, generalmente el agua. La mejor manera de evitar la corrosión del corten por el inoxidable es excluir la presencia del agua en el contacto, y por ello en el diseño deben adoptarse las medidas oportunas para garantizar la ausencia de agua en los contactos, bien mediante pintura de la junta soldada, bien aislando de algún modo los dos materiales evitando su contacto en el caso de juntas no soldadas. En el caso de la pasarela de Bilbao, se ha pintado completamente toda la superficie interior del inoxidable y todo el acero corten. La pintura no se ha limitado únicamente a la zona de la unión entre los dos metales, ya que en tal caso la diferencia de área expuesta entre el inoxidable y el corten, mucho mayor en aquél, hubiera convertido en crítico cualquier posible fallo puntual de la pintura sobre el corten, que se corroería muy rápidamente (figura 5). En las zonas no repintables por no ser accesibles tras el soldeo se han diseñado en proyecto los despieces y uniones de chapas de modo que resulten estancos por soldadura, para que la ausencia de aporte de oxígeno y de entrada de agua al detalle garantice la ausencia de corrosión. En aquellas uniones o cruces en que la presencia de ojales para salvar el cruce de cordones de soldadura impide la estanqueidad deseada, permitiendo una eventual filtración de agua, se ha realizado el sellado posterior uno a uno de todos los ojales con chapas de respaldo soldadas, de modo que una vez concluida la ejecución todas las zonas no accesibles de la pasarela se encuentran aisladas.



Figura 5: Interior de la pasarela totalmente pintado.

Como medida complementaria y barrera adicional a la entrada de agua a la zona no accesible existente bajo la plataforma entre el forjado de hormigón y la chapa inferior de inoxidable se ha prestado especial atención al diseño de la impermeabilización superior de la plataforma, disponiéndose sobre el forjado una lámina impermeabilizante de la máxima calidad en las prestaciones actualmente posibles en el mercado. Esta lámina impermeabilizante se ha dispuesto sobre el forjado cuidando al máximo los encuentros, esquinas y puntos angulosos que pudieran introducir una merma en la impermeabilización final obtenida. La lámina dispuesta corresponde a la PARAFOR PONTS de SIPLAST, consistente en una membrana de betún elastómero SBS de 6 kg/m<sup>2</sup> de contenido en betún, autoprottegida con una membrana de poliéster no tejido de 180 g/m<sup>2</sup>, de 5 mm de espesor. Como garantía final el suministrador de la impermeabilización ha extendido certificado de garantía respecto a la ejecución, una vez terminada ésta y supervisada por peritos técnicos propios del suministrador, que establece la bondad de la ejecución acorde a las normas

propias del producto. Finalmente, y en previsión de que las medidas adoptadas no resultaran eficaces para impedir totalmente la entrada de agua por el forjado hacia la chapa inferior se dispusieron pendienteados de mortero de resina sobre la chapa inferior que evitan la acumulación permanente del agua que eventualmente pudiera filtrarse, dirigiéndola hacia desagües dispuestos en puntos estratégicos de la chapa inferior.

#### **4.2 En la fase de cálculo de la estructura.**

El empleo del acero inoxidable como elemento estructural requiere la consideración en el cálculo de las particularidades que este material introduce. El documento básico de referencia para el cálculo en inoxidable es ENV 1993-1-4:1996, y en un futuro próximo la prEN 1993-1.4:2004, actualmente en stage 34 draft. Estos documentos establecen la ampliación de los correspondientes documentos para aceros convencionales al carbono al caso de los aceros inoxidables, estableciendo las reglas específicas para éstos que sustituyen a las válidas para los aceros convencionales.

La singularidad mayor que introduce el cálculo con acero inoxidable procede de la curva tensión-deformación del material. Por un lado, la rama puramente elástica presenta una extensión bastante más reducida que en el acero convencional, iniciándose pronto la respuesta no lineal, y, por otra parte, el endurecimiento por deformación del material se hace patente en el diagrama sin escalón de cedencia con la rama elástica. (figura 6). No obstante, el análisis global de la estructura puede realizarse con criterios elásticos empleando en el cálculo el valor nominal del módulo de elasticidad  $E$  del material que define la ENV, o en su caso pr EN, en función del grado de acero, y limitar la incidencia del diagrama no lineal al cálculo de deformaciones según indican [7] y [8]. En todo caso, es preciso señalar que en los casos reales estudiados, atendiendo al nivel tensional existente en las secciones para las combinaciones determinantes en servicio, la incidencia a lo largo de la estructura de las secciones menos solicitadas que permanecen en rango lineal, y el hecho también frecuente de que en general las secciones de inoxidable presentan cierta sobrerresistencia frente a la combinación estricta en estado límite último, tanto para disminuir el número de soldaduras por cambio de espesor, como para adaptar el nivel tensional a la aptitud del acero al carbono también presente, y más limitativo desde el punto de vista tensional, no hemos encontrado incidencia significativa del diagrama no lineal en el nivel de flechas resultante respecto al que se obtendría con el empleo del módulo nominal. Así, por ejemplo, la tabla 5 incluye para niveles crecientes de tensión en el acero el módulo de deformación secante a emplear en el cálculo de deformaciones para un acero dúplex 1.4462, empleado en el proyecto de Oporto. Para una tensión en la combinación frecuente en el entorno de 200 a 250  $N/mm^2$ , que podemos considerar un rango típico para la combinación de control de flechas, el módulo secante obtenido oscila entre 194 y 186  $kN/mm^2$ , por encima del 93% de su valor nominal, lo cual pone de manifiesto en general la escasa incidencia en deformaciones reales del diagrama no lineal del material frente al cálculo en aceros tradicionales, máxime teniendo en cuenta que el cálculo puede afinarse empleando en las secciones de la estructura menos solicitadas sus valores correspondientes, todavía más próximos al módulo nominal. Lógicamente, en casos en que se fueren por algún motivo los niveles tensionales solicitantes, la incidencia en la respuesta en deformaciones puede ser algo mayor.

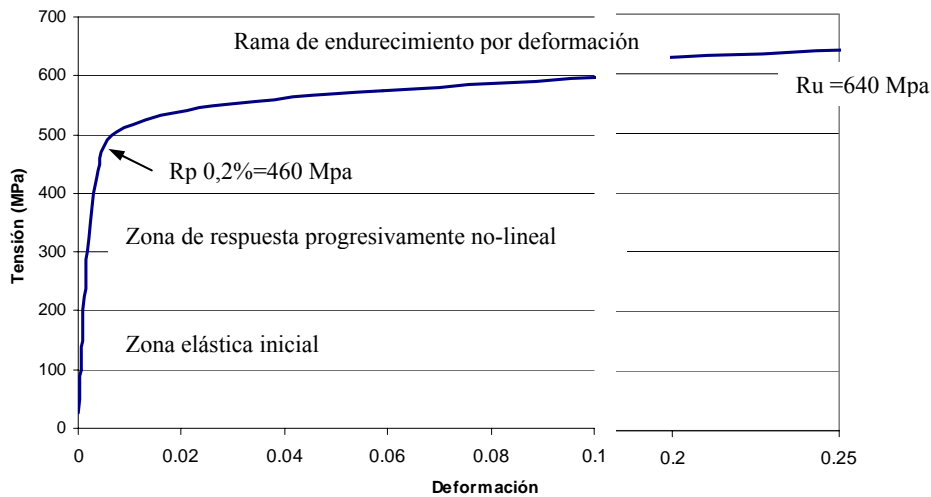


Figura 6: Diagrama tensión-deformación del acero EN 1.4462

Tabla 5: Módulo de deformación para el cálculo de flechas en acero EN1.4462.

$\sigma(\text{N/mm}^2)$	50	100	150	200	250	300	350	400	460 (Rp0,2%)
$E_{\text{sec}}(\text{kN/mm}^2)$	200	199,6	198,1	194,0	185,9	172,8	154,9	133,6	107,0

El control en estado límite último de la estructura se realiza de modo convencional obteniendo la resistencia de las secciones a partir del valor nominal del límite elástico al 0.2% indicado en la Normativa con su correspondiente coeficiente de minoración. No se permite en general el cálculo plástico global, precisamente debido al endurecimiento por deformación del acero que introduciría esfuerzos variables en las rótulas plásticas según el giro en las mismas, indeterminando así la obtención de los esfuerzos en las mismas, e introduciendo en las uniones sollicitaciones por encima de los valores plásticos al 0.2% que podrían cuestionar su integridad. No obstante, es preciso emplear en el cálculo la clasificación de clases de secciones específicas del acero inoxidable, los anchos eficaces a compresión específicos del inoxidable para secciones de clase 4, y las curvas de pandeo y formulaciones específicas para el control de elementos comprimidos y flectados, al objeto de incorporar en el análisis las singularidades propias del inoxidable. Todo ello se encuentra en la correspondiente parte 1.4 de ENV 1993, o en su caso de la futura prEN. Como norma general, el cálculo en acero inoxidable resulta más penalizante en clases de secciones y anchos eficaces que el cálculo con acero al carbono, por lo que es imprescindible considerar apropiadamente las especificaciones propias del empleo del inoxidable en el dimensionamiento. A título de ejemplo, la tabla 6 incorpora para el acero dúplex 1.4462 los valores de esbeltez frontera que determinan las clases 1, 2 y 3, tanto para almas flectadas como para almas comprimidas y alas voladas comprimidas, en relación a los que se obtendrían para un acero al carbono del mismo límite elástico de 460 MPa. La figura 8 incluye para almas y vuelos comprimidos la curva que proporciona el ancho eficaz del elemento en clase 4 en función de la esbeltez del mismo, tanto

para el acero dúplex como para el acero al carbono del mismo límite elástico. Los valores correspondientes al acero dúplex se han obtenido a partir de la formulación que figura en la versión actual de prEN.

Tabla 6: Esbelteces que definen la frontera entre clases de secciones.

	Alma interna a flexión		Alma interna a compresión		Alas voladas a compresión (soldadas)	
	Acero inoxidable EN 1.4462	Acero al carbono S 460 N	Acero inoxidable EN 1.4462	Acero al carbono S 460 N	Acero inoxidable EN 1.4462	Acero al carbono S 460 N
Clase 1	39,1	51,5	17,9	23,6	6,3	6,4
Clase 2	40,6	59,3	18,6	27,2	6,6	7,1
Clase 3	52,2	88,6	21,4	30,0	7,7	10,0

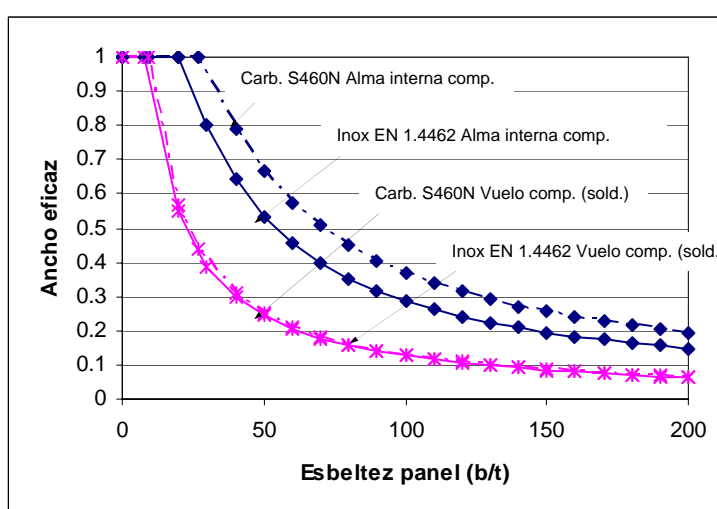


Figura 8: Relación esbeltez-ancho eficaz de panel en secciones clase 4.

Por su parte, en lo que respecta al control de almas a esfuerzo cortante también se plantean metodologías análogas a las prescritas para aceros convencionales, si bien adaptando al acero inoxidable los coeficientes precisos de la formulación. En este sentido, es preciso señalar que la metodología prevista por prEN 1993-1-4:2004 en su versión actual (stage 34 draft) difiere de la que plantea la ENV 1993-1-4:1996, de modo similar a la modificación introducida en las últimas versiones para aceros convencionales. También deben considerarse algunas singularidades en el dimensionamiento de los rigidizadores transversales de alma y en el control de almas frente a cargas concentradas en el plano del alma. En todo caso estas circunstancias no han resultado condicionantes en las pasarelas proyectadas para Oporto y Bilbao. En ambos casos el espesor de la

chapa de inoxidable se fijó en un mínimo de 20 milímetros al objeto de garantizar una respuesta adecuada del material frente al soldeo de los elementos interiores en corten, tanto en deformaciones remanentes como en la posible afección a la cara vista de los cordones de soldadura de la rigidización interior, espesor que resultó sobreabundante para las necesidades de resistencia a los esfuerzos tangenciales.

Finalmente, el control de uniones también presenta alguna particularidad en la resistencia a cortante y aplastamiento de uniones atornilladas y en la resistencia por unidad de longitud en cordones de soldadura en ángulo, ligeramente inferior a los aceros convencionales, pero en todo caso con poca repercusión en el diseño final. Si es preciso señalar que en todo caso, pero más aun en el caso de las uniones soldadas de acero inoxidable, se requiere en proyecto optimizar el espesor de los cordones de soldadura, al objeto de disminuir los aportes de calor durante el soldeo, responsables de mayores deformaciones remanentes, tensiones residuales y dificultades para la ejecución en taller en virtud de la menor conductividad térmica del inoxidable respecto al acero convencional, tal y como se comenta más adelante.

#### **4.3 En la fase de fabricación en taller y montaje en obra.**

Los aspectos singulares de la fabricación en acero inoxidable estructural están relacionados principalmente con los procesos de soldadura. Los aceros inoxidables tipo dúplex presentan, en general, una soldabilidad buena, si bien requieren consumibles, procedimientos y, en consecuencia, homologaciones específicas para la ejecución de las soldaduras.

La soldadura entre chapas de acero inoxidable debe realizarse con electrodos específicos para el grado de acero inoxidable que se vaya a soldar, de forma que se deposite un material de aportación de la composición química apropiada para la aleación del acero inoxidable de base. Para la soldadura entre acero inoxidable y acero al carbono es preciso el empleo de electrodos sobrealeados, también llamados a veces electrodos de transición, a fin de compensar la dilución de las propiedades propias del inoxidable que la presencia del carbono introduce en la soldadura. De este modo se obtienen en la soldadura una estructura y unas propiedades anticorrosivas análogas al inoxidable.

Los requerimientos de ejecución de soldaduras en acero inoxidable dependen de que el acero inoxidable sea ferrítico, austenítico o dúplex. Centrándonos en el caso de los aceros tipo dúplex, por ser, como ya se ha comentado, los de uso más general como material resistente estructural, la soldadura debe realizarse con intensidades de corriente moderadas y permitiendo que el metal se enfríe por debajo de los 150 °C entre pasadas sucesivas de soldadura. Se pretende con ello minimizar la aportación de calor y evitar así que la zona de afección térmica del metal se vea sometida a ciclos térmicos de calentamiento y enfriamiento rápido. Dado que los aceros dúplex son íntegramente ferríticos a altas temperaturas, un enfriamiento excesivamente rápido pudiera provocar la precipitación del metal en fase ferrítica, provocando así su fragilización y merma de ductilidad. Conviene destacar, no obstante, que los aceros dúplex modernos tienen un contenido alto en nitrógeno que facilita la reformación de austenita durante el enfriamiento, restableciendo el equilibrio entre ferrita y austenita más fácilmente que en los aceros tipo dúplex más antiguos.

Asimismo, los aceros tipo dúplex, en tanta mayor medida cuanto mayor sea su contenido en cromo y molibdeno, presentan asimismo un cierto riesgo de formación de fases intermetálicas como consecuencia de los procesos térmicos asociados a la soldadura, con la consiguiente disminución de la resistencia mecánica y a la corrosión de la soldadura. Las fases intermetálicas se forman

cuando se somete al acero inoxidable a temperaturas en el rango de 650 a 1000 °C durante un periodo excesivamente prolongado de tiempo. Por ello, el enfriamiento de la soldadura entre pasadas sucesivas es imprescindible no sólo para evitar la fragilización de la estructura antes citada, sino para evitar la pérdida de resistencia mecánica y protección anticorrosiva que introduce una exposición excesivamente prolongada del material a las temperaturas del rango crítico anterior.

Un segundo aspecto singular de la fabricación con acero inoxidable inducido por los procesos de soldadura es el de las combaduras o alabeos permanentes de las chapas de inoxidable como consecuencia de las deformaciones térmicas originadas por el aporte de calor de la soldadura. El acero inoxidable presenta un coeficiente de dilatación térmica algo mayor que los aceros convencionales junto con una conductividad térmica significativamente menor. Ello provoca que las chapas experimenten gradientes térmicos más elevados como consecuencia conjunta de la mayor deformabilidad térmica y menor capacidad de disipación del calor. Tales gradientes provocan unas curvaturas plásticas en la zona de afección térmica de la soldadura que originan alabeos o combaduras apreciables en los paneles de inoxidable delimitados por los cordones de soldadura ejecutados. Con objeto de minimizar las combaduras en las chapas es preciso mantener un aporte de calor de soldeo lo más reducido posible y, fundamentalmente, permitir periodos de enfriamiento más prolongados para compensar la menor conductividad térmica del material. Debe tenerse asimismo muy presente la mayor deformabilidad térmica durante la fabricación para planificar una secuencia de armado de las piezas óptima, que les dote de rigidez suficiente desde el comienzo del armado para evitar así distorsiones de la sección transversal como consecuencia de las deformaciones inducidas por los procesos posteriores de soldeo, deformaciones todas ellas tendentes a acumularse al realizarse en general todas las soldaduras sobre la cara interior de la dovela estructural de acero inoxidable.

No obstante, aun siguiendo las precauciones citadas, es posible que en algún caso las deformaciones remanentes de soldeo superen las tolerancias admisibles, bien por cuestiones de imperfecciones iniciales máximas acordes al modelo de cálculo en elementos comprimidos, o incluso por cuestiones de aspecto final de los paneles terminados. Por ello, es preciso establecer durante la ejecución un control estricto de planeidad de los paneles ejecutados, y adoptar las medidas correctoras necesarias en aquellos casos en que la desviación supere los niveles admisibles. Esta circunstancia puede incluso condicionar la necesidad de introducir rigidización adicional en las piezas, soldada entonces con gargantas de soldadura mínimas para no introducir nuevas deformaciones térmicas.

Un último aspecto a tener en cuenta en relación a la soldadura en acero inoxidable es el cambio de coloración que éste experimenta en la zona de afección térmica de la soldadura como consecuencia de la oxidación a alta temperatura del cromo (figura 9). Estas capas de óxido no tienen la misma resistencia a la corrosión que la capa de pasivación, por lo que no sólo constituyen un problema de índole estética, sino que suponen una disminución neta en la resistencia a la corrosión del acero. Adicionalmente, la formación de esta capa de óxido reduce el contenido en cromo de la matriz en las capas inmediatamente inferiores a la de oxidación superficial, por lo que, una vez atravesada ésta por la corrosión, su penetración se ve favorecida por encontrarse con capas descromatizadas de acero inoxidable.





Figura 9: Oxidación por soldadura de la capa de pasivación y paneles ya limpios.

La soldadura en acero inoxidable debe realizarse siempre con el empleo de un gas inerte de protección del arco eléctrico para evitar la oxidación excesiva del metal de aportación. Este gas inerte, que envuelve parcialmente al metal depositado en una atmósfera desprovista de oxígeno, puede fluir de la antorcha (tipo de soldadura GMAW) o bien provenir directamente del recubrimiento de los electrodos (soldadura SMAW). Si no se emplea una atmósfera inerte se corre el riesgo de oxidación excesiva del inoxidable depositado, dando lugar a cordones geoméricamente inaceptables y con una resistencia a la corrosión muy reducida.

Si bien el empleo de la soldadura con arco protegido por atmósfera inerte evita la oxidación excesiva del metal de aportación, sí se produce no obstante la oxidación del metal de base antes citada en la zona de afección térmica de la soldadura. La tonalidad cromática de la oxidación superficial es un indicativo del grado de oxidación y consiguiente descromatización de la matriz producidos. Óxidos de tonalidades amarillentas pálidas indican una oxidación muy leve, que, salvo en ambientes muy agresivos, no supone merma de la resistencia a la corrosión de los aceros inoxidables convencionales. Por el contrario, óxidos de tonalidad azulada, parduzca o negra indican niveles de oxidación y descromatización crecientes. Siendo estos últimos un problema no sólo estético sino de resistencia a la corrosión deben ser, por ello, indefectiblemente retirados, empleando o bien medios mecánicos o bien decapado químico.

Tanto con el empleo de medios mecánicos como de decapado químico se consigue la retirada conjunta de la película de óxido en la zona de soldadura y de la capa descromatizada adyacente, exponiendo a la atmósfera una superficie intacta de acero inoxidable que, por tanto, resulta pasivada de forma espontánea. Los medios mecánicos abarcan el cepillado, el pulido, el chorreado con arena o vidrio y el granallado. Todos ellos provocan una alteración significativa de la textura del acero inoxidable, por lo que únicamente pueden emplearse en la cara no vista de los elementos con objeto de preservar su aspecto exterior. Por tanto, la retirada de óxidos de soldadura en los paramentos exteriores debe necesariamente realizarse mediante decapado químico, que, además de no alterar la textura inicial del acero inoxidable, presenta la ventaja adicional de atacar selectivamente a las superficies oxidadas descromatizadas. El decapado debe realizarse adoptando todas las garantías necesarias para evitar contaminaciones químicas y afecciones

medioambientales, sobre todo si se realiza en obra, donde no se dispone generalmente de las instalaciones adecuadas.

Debido a que el decapado debe realizarse localizadamente en las soldaduras, el procedimiento óptimo es el empleo de pasta decapante, frente a los geles decapantes en spray o los baños decapantes, aplicables al decapado generalizado de grandes superficies. La pasta decapante está constituida por una mezcla de ácidos, generalmente fluorhídrico en un contenido entre el 0,5 y el 5% en volumen, y ácido nítrico, entre el 8 y el 20% en volumen. Las pastas con mayor contenido ácido deben emplearse para el decapado de los grados de acero de mayor aleación. La pasta decapante debe emplearse en un rango de temperaturas entre 25 y 40 °C, aproximadamente. Temperaturas inferiores ralentizan las reacciones químicas, reduciendo la efectividad del decapado, mientras que temperaturas superiores a 40 °C o la exposición directa al sol pueden provocar una evaporación o secado prematuros, reduciendo igualmente la efectividad del decapado. Una vez aplicada la pasta y dejada actuar el tiempo oportuno, según las indicaciones del fabricante para cada tipo de acero y pasta empleados, debe retirarse por completo con una limpieza profunda con agua limpia a presión.

En caso de haber empleado algún medio mecánico para la eliminación de óxidos, como suele ser habitual en las zonas no vistas, resulta conveniente, tras la limpieza, aplicar un ulterior tratamiento de pasivación, similar a la aplicación de pasta decapante, si bien el componente activo es simplemente una solución de ácido nítrico al 18-30% en volumen, aplicada a temperatura ambiente durante 20 a 60 minutos. Con este tratamiento se elimina por completo cualquier partícula ferrosa que pudiera haber quedado adherida al inoxidable, con el riesgo potencial de contaminación del acero inoxidable e inicio de corrosión localizada. En las zonas vistas la retirada de todas las partículas contaminantes de acero que pudieran haberse adherido al inoxidable como consecuencia de los procesos de fabricación (salpicaduras de soldadura, cortes de chapas, esmerilados o amolados), debe realizarse completamente mediante la limpieza ácida con solución de nítrico antes descrita.

## **5. REFERENCIAS**

- [1] ITEA. Programa europeo de formación en cálculo y diseño de la construcción en acero: Lección 22. 2000.
- [2] Avesta Sheffield AB, Research and Development. Information 10100GB. 2000.
- [3] Avesta Sheffield AB. Avesta Sheffield Corrosion Handbook. Eight edition. 1999
- [4] Millanes, F.; Pascual, J.; Ripa, T. The New Abandoibarra Footbridge in Bilbao. Proceedings of the Footbridge 2002 International Congress. Paris 2002.
- [5] Millanes, F.; Pascual, J.; Ripa, T. La nouvelle passerelle d'Abandoibarra devant le musée Guggenheim à Bilbao. Bulletin n° 3 des Ponts Métalliques. In press. 2004
- [6] Fonseca, A. et al. Ponte pedonal sobre o rio Douro. Encontro de construção metálica e mista. Aveiro. 2001.
- [7] ENV 1993-1-4: 1996. Design of Steel Structures. Part 1-4. Supplementary rules for stainless steels.
- [8] prEN 1993-1-4: 2004. Design of Steel Structures. Part 1-4. Supplementary rules for stainless steels. Stage 34 Draft. Febrero 2004