



PATOLOGÍA Y REHABILITACIÓN DE ESTRUCTURAS MÓD. 03. ESTRUCTURAS DE ACERO

CURSO DE PATOLOGÍA Y REHABILITACIÓN ESTRUCTURAL.

MÓD. 03: ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ACERO

1. Introducción

Se puede afirmar que el acero constituye una combinación de hierro altamente refinado y carbono, ocupando éste entre el 0,05% y el 2% del contenido del conjunto. La incorporación de carbono, mediante el proceso de templado, es de suma importancia, ya que crea nudos internos en la estructura laminar del hierro impidiendo así su deslizamiento; de esta forma se consigue aumentar la resistencia mecánica del material. Algunas veces se agregan otros elementos de aleación específicos, como por ejemplo el níquel o el cromo: toda adición de este tipo se hace siempre con propósitos determinados.

El uso del acero en la construcción data de muy antiguo, encontrándose ejemplos incluso en la Grecia Clásica: allí en los templos se utilizaba el hierro fundido en forma de vigas y de grapas. Más tarde, en las iglesias bizantinas se emplearían cadenas de acero dentro de las fábricas en previsión de los esfuerzos a las que estaban expuestas durante los terremotos. Similarmente en el Medioevo se utilizaban elementos de hierro en las naves laterales de las grandes catedrales, cuyo empleo continuo en la arquitectura civil o industrial hasta el siglo XVIII. Por ejemplo en 1706 se fabricaron en Inglaterra las columnas de fundición de hierro para la construcción de la Cámara de los Comunes en Londres.

El verdadero auge del hierro como elemento estructural irrumpe en el siglo XIX de la mano de la Revolución Industrial, llegándose a la estandarización con la producción de piezas en serie. En 1836, en plena revolución, aparece el perfil doble T, al tiempo que la introducción de los convertidores Bessemer reducía el costo de la fabricación del acero permitiendo la consecución, en conjunto, de elementos asequibles que trabajen a flexión reemplazando a la madera.

Desde el año 1846 se emplea en España el hierro en forjados de pisos y hacia 1902 se crean los Altos Hornos de Vizcaya, que monopolizarían la laminación de acero estructural, especialmente para la edificación.



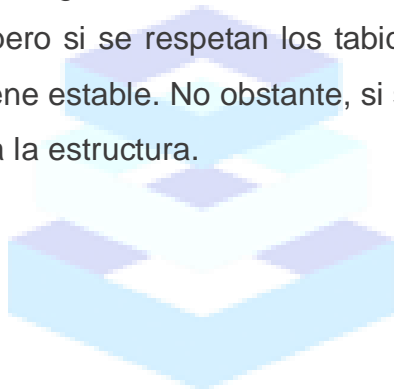
Fig. 1: Puente de Hohenzollern, en Colonia (Alemania). La aplicación del acero a la ingeniería estructural en el siglo XIX abrió nuevos horizontes en el panorama ingenieril.

Las ventajas que ofrecía el nuevo producto radicaban en su alta resistencia, ductilidad, precisión dimensional, posibilidad de contar con variedad de secciones y tamaños de las piezas, relativa facilidad de unión con otros elementos y rapidez de montaje. A lo que actualmente se une la valorización de las piezas antiguas en la cadena de reciclado. Pero aún

existen desventajas a tener en cuenta como la corrosión, la fatiga plástica y la reacción al calor.

Sin embargo, en rehabilitación hay que verificar la fecha aproximada de la Construcción del edificio, porque las prestaciones mecánicas del hierro y los aceros han ido variando en la historia de acuerdo a su composición y manufactura. Es decir, podemos tener elementos de hierro colado de gran resistencia a la tracción pero frágiles o aceros de diferentes resistencias. Igualmente es importante determinar el tipo de sección con el que se está trabajando, dado que para un mismo perfil existen secciones de ala ancha y ala angosta. De allí que el desconocimiento de esta variable puede inducir a error si el cálculo se hace con la información incorrecta (resistencia y soldadura).

Por lo general una estructura metálica antigua no cumplen las normas modernas por si sola, pero si se respetan los tabiques y la disposición general de toda la estructura, ésta se mantiene estable. No obstante, si se hacen gruesas reformas podría haber problemas si no se mejora la estructura.



ACADEMIA
INGNOVA

2. Materiales

El acero es el material que se ha utilizado y se sigue utilizando, tanto en las estructuras existentes, como en aquellas que son empleadas como labores de refuerzo, ya sea utilizando presillas, platabandas o cartelas, o en los elementos armados.

Los distintos tipos de acero que se utilizan son los que se exponen a continuación:

- Aceros laminados en caliente, no aleados y no resistentes a la corrosión. Estos aceros tienen una microestructura normal y suelen ser soldables.
- Aceros especiales, de grano fino y apto para construcción soldada.
- Aceros autopatinables, con resistencia mejorada a la corrosión atmosférica.

La nomenclatura actual de los aceros empleados es:

- S-275:
 - Límite elástico = 275 N/mm².
 - Tensión de rotura = 450 N/mm².
 - De uso normal.
- S-355:
 - Límite elástico = 355 N/mm².
 - Tensión de rotura = 510 N/mm².
 - Para casos especiales.

En relación a la tortillería, se usarán dos tipos de tornillos:

- Tornillos ordinarios tipo 4.6, de acuerdo con el Eurocódigo 3, de 240 N/mm² de límite elástico.
- Tornillos de alta resistencia tipo 8.8, de 640 N/mm² de límite elástico.

En estructuras antiguas, considerando como tales aquellas que fueron puestas en servicio antes de los años cincuenta, es muy difícil conocer el tipo de acero empleado y, por tanto, las propiedades y características de los mismos. En los años sesenta y setenta, el acero ordinario

que se utilizaba en la construcción de este tipo de estructuras era el A37, equivalente al actual S-235, con un límite elástico de 235 N/mm².

Cuando sea preciso acometer la rehabilitación de una estructura metálica, es necesario saber si el acero utilizado es soldable o no. En la práctica, esta característica se determina mediante la realización de ensayos que permitan establecer la equivalencia resistente y la composición química de los aceros utilizados en su construcción frente a los aceros actuales.

La composición química del acero laminado utilizado actualmente, el S-275, se recoge en la siguiente tabla:

Acero S-275	Símbolo	Composición
Hierro	Fe	>99,50%
Carbono	C	0,18-0,40%
Fósforo	P	0,025-0,035%
Azufre	S	0,02-0,03%
Otros minerales en pequeñas cantidades		

Fig. 2: Composición química del acero laminado.

3. Evaluación estructural

La evaluación de la estructura tiene como fin la comprobación estructural de la funcionalidad y de la seguridad de la misma. Normalmente, se suele formular con comprobaciones numéricas a partir de la creación de un modelo realista que fije el comportamiento estructural, considerando las cargas que se prevé que actuarán.

En los casos en los que la documentación del Proyecto esté disponible (Memoria, Planos, etc.), la comprobación de seguridad no supondrá un trabajo extraordinario; únicamente será necesario verificar mediante un reconocimiento in situ la correspondencia entre la documentación y la estructura real y analizar el estado en el que se encuentra.

Sin embargo, cuando no se tenga acceso a la información del Proyecto, el trabajo de caracterización se complica considerablemente, debiéndose realizar los correspondientes estudios y ensayos que permitirán obtener toda la información necesaria para evaluar correctamente el estado de la estructura y las actuaciones a realizar.

Los trabajos de campo y de gabinete se pueden efectuar en paralelo, identificando el estado de los elementos de mayor responsabilidad, así como los esfuerzos, las tensiones, etc.

A nivel general, de cara a la evaluación de la gravedad de las lesiones estructurales, se puede seguir la siguiente metodología:

3.1. Inspección visual

El reconocimiento visual de la estructura tiene como principales objetivos los que se enumeran a continuación:

- Identificar el esquema estructural de la estructura: elementos principales y secundarios (siempre que no haya información de la misma), realizando un plano de detalle con las dimensiones reales y las piezas correspondientes.
- Conseguir una primera estimación de daños, así como su situación, tipología y extensión. Determinar cuáles son los daños concretos y recogerlos sobre el plano.
- Detectar el deterioro debido a la corrosión, las laminaciones, la pérdida de material, etc.
- Determinar el estado de la cimentación.
- Permitir la toma de decisiones respecto a la seguridad de la estructura de forma inmediata.
- Decidir la necesidad de realizar inspecciones de campo más avanzadas o específicas, si es preciso, con trabajos complementarios (apertura de catas, limpieza local, etc.).
- Estudiar los accesos para los trabajos sucesivos, apeos, zona de acopios, etc.
- En muchas de estas estructuras, las piezas están unidas mediante roblones, por lo que será necesario comprobar su estado y si éstos siguen actuando correctamente.



Fig. 3: Aspectos a observar durante la inspección visual de una estructura metálica de obra civil.

Por todo ello, a título referencial se seguirán los siguientes pasos durante la inspección:

1. Determinación de las zonas de riesgo de la estructura.
2. Caracterización del tipo de acero (posible edad de fabricación) y el sistema constructivo, para poder clasificar su capacidad estructural.
3. Determinación de la forma y dimensiones de los elementos, sistema constructivo, características de las uniones, cargas y luces a salvar, para su posterior análisis mecánico.
4. Medición de las posibles deformaciones: flechas, giros, aplastamientos, pandeos, etcétera.
5. Examen visual para detección de oxidaciones, rotura de uniones y demás singularidades.

En base a este reconocimiento se programarán los ensayos que se crean oportunos para evaluar el estado de la estructura y las posibles medidas de reparación: ensayos sobre el material (extracción de probetas), ensayos sobre los elementos “in situ” y ensayos estructurales.

3.2. Realización de ensayos sobre el material

En general, no es frecuente la ejecución de probetas en elementos metálicos, utilizándose únicamente cuando es necesario conocer parámetros relacionados con las propiedades mecánicas del acero, como son el límite elástico, la tensión de rotura, la deformación, etc.

3.2.1. Ensayos destructivos

No obstante lo anterior, existen situaciones que ante la gravedad de los daños es necesario tomar muestras de la propia estructura, especialmente de zonas de soldadura. Para determinar la resistencia se pueden realizar ensayos de doblez de tracción, análisis químico de dureza de impacto micro y macroscópicos, y eventualmente ensayos hidrostáticos.

En el caso de que existan sospechas de rotura frágil, frecuente en estructuras metálicas, el ensayo de resiliencia puede resultar determinante; éste se evalúa en el laboratorio mediante ensayos con probetas en el péndulo Charpy.

Por otro lado, si existen fisuras en los cordones de elementos soldados, se puede ensayar en laboratorio la metalografía del material y la química del material base y del de aportación.

3.2.2. Ensayos no destructivos

En la mayoría de los casos este tipo de ensayos se efectúan para detectar discontinuidades en el material sin tener que dañarlo. Obviamente, tales operaciones deben realizarse por personal capacitado. Señalaremos al respecto:

- Ensayo mediante partículas magnéticas: Se procede a la magnetización de la pieza con la finalidad de examinar los metales ferromagnéticos que existe en su composición. Puede ser aplicado antes o después de soldar.
 - Ensayo con líquidos penetrantes: Se bañan las piezas con líquidos especiales que penetran en las grietas por capilaridad, permitiendo localizar discontinuidades en la superficie por diferencia de coloración.
 - Ensayo con inspección radiográfica: Se emplean rayos x y rayos gamma para detectar discontinuidades en el interior de los metales sólidos o soldados. Para calcular la profundidad de las discontinuidades se toman dos radiografías desde posiciones ligeramente diferentes.
 - Ensayo de ultrasonido: Se emplean haces de ondas sonoras de alta frecuencia para determinar la profundidad y posición de la discontinuidad en la soldadura y calcular su reacción.
 - Ensayo de carga de servicio. Se aplican esfuerzos mayores que los normales pero inferiores a la resistencia elástica del material, permitiendo estimar si una estructura soldada puede soportar una carga de trabajo sin sufrir una falla o deformación permanente.
-

Entre los ensayos realizados sobre elementos “in situ”, destaca especialmente la inspección por ultrasonidos, debido a su amplio campo de aplicación, sobre todo en lo que se refiere a las uniones.

En muchas ocasiones, los líquidos penetrantes no pueden aplicarse debido a la protección existente sobre las superficies, al igual que ocurre con las radiografías.

Por otro lado, una inspección visual cuidadosa realizada con anterioridad, en la que se efectúen mediciones de espesores de cordones, puede ayudar a evitar la realización de ensayos más costosos.

3.3. Levantamientos de daños y diagnóstico.

Una vez detectadas las zonas con daños se procede a registrarlas en planos y fotografías, con la finalidad de dejar constancia del grado y tipo de afectación de la estructura, tanto si se trata de un estudio para su rehabilitación como para una peritación.

3.4. Determinación de la metodología de intervención.

Con los datos del levantamiento de lesiones se efectúa el análisis de la capacidad mecánica residual de la estructura, que ayudará a plantear el tipo de intervención adecuada en cada caso.

Así se define el método para contrarrestar las causas y rehabilitar la estructura en línea con las necesidades del proyecto (generalmente la adición de cargas). A partir de lo cual se pueden diseñar los refuerzos necesarios y la determinación de los parámetros para el control de calidad de las obras de reparación.

4. Lesiones

4.1. Lesiones de origen biológico que inciden en la resistencia mecánica del acero

Es poco frecuente encontrar organismos que se alimenten de metal en los edificios. Sin embargo sí existen algunas bacterias, hongos y algas microscópicas que pueden intensificar con su actividad los procesos de corrosión, siendo principalmente importantes en la construcción naval pero en la edificación civil puede ser despreciado.

4.2. Lesiones de origen químico que inciden en la resistencia mecánica del acero

La corrosión de la estructura es el daño principal y más frecuente en estructuras metálicas. En estructuras de obra civil, al encontrarse a la intemperie, el riesgo de corrosión aumenta y debe de compensarse con un programa de mantenimiento adecuado.

La corrosión aparente, la apreciable a simple vista, aunque es indicativa del estado general de la estructura, no suele guardar relación con la seguridad real de la estructura. Los problemas más graves suelen encontrarse en uniones, empotramientos y zonas ocultas a la vista, donde la falta de limpieza y la humedad ambiental aceleran la corrosión. Con el paso del tiempo, los apoyos deslizantes dejan de funcionar, al producirse una soldadura por corrosión de los elementos que debían de deslizarse de forma independiente uno sobre el otro.

4.2.1. Corrosión química

Esta variedad comprende el ataque por reacciones químicas en un medio ambiente, ya sea gaseoso o líquido, que no sea electrolito.

4.2.2. Corrosión electroquímica

Corrientes eléctricas entre dos zonas de metal con potenciales diferentes, que hace que una de ellas actúe como ánodo y el otro como cátodo. Se produce así una sección de sacrificio (ánodo) que se va corroyendo paulatinamente.

La corrosión también es importante en el caso de las cerrajerías, porque el aumento de dimensiones de la pieza metálica que se empotra en el muro de fábrica o sillar ocasiona incremento de tensiones en estos puntos produciendo la rotura del material del muro.

4.3. Lesiones de origen físico-mecánico

Como se mencionó muchas de estas lesiones presentan su origen en otras causas al puramente físico- mecánico, pero que comprometen la resistencia estructural. En la práctica se pueden observar mayormente las siguientes lesiones:

4.3.1. Rotura por fatiga

La ocasiona la repetición cíclica de cargas.

4.3.2. Desgarro laminar

Deformación en la dirección principal del laminado: aparece generalmente en estructuras soldadas.

4.3.3. Deformaciones generales de la estructura

Por errores durante los procesos de cálculo, ejecución y mantenimiento de la estructura o por un indebido dimensionamiento de los elementos.

4.3.4. En uniones soldadas

En los pórticos se puede presentar fractura parcial o completa en la zona de contacto de la soldadura con el ala de la viga y del pilar. En pórticos arriostrados la lesión aparece en la conexión entre riostras a vigas y/o columnas. En pórticos en celosía se puede presentar pandeo en los elementos de las diagonales.

4.3.5. En uniones atornilladas

- Cizallamiento por cortante o aplastamiento de pernos o tornillos.
- Desgarramiento de las placas de conexión por sección insuficiente.

4.3.6. Incompatibilidad de materiales

Muchas veces se ha empleado el acero como refuerzo de sistemas constructivos que trabajan con otros materiales, pero cuyo diferente coeficiente de dilatación, rigidez, etc. pueden crear problemas si no está adecuadamente solucionado el contacto entre el acero y el material que pretende reforzar.

4.4. Cambios térmicos e incendios

La acción del fuego sobre el acero modifica la plasticidad del mismo y rompe el equilibrio de las tensiones de trabajo previstas, lo que origina una pérdida de la estabilidad de la estructura. La temperatura a partir de la cual aparece el fenómeno de la plasticidad es relativamente baja para el caso del acero y se alcanza con facilidad debido a su elevada conductividad térmica.

Para una temperatura de 250°C se da una modificación de la resistencia y el límite elástico. Al alcanzar la temperatura de 538°C la estructura no puede soportar completamente la carga de diseño.

Finalmente, conviene señalar que una estructura metálica fluye a los pocos minutos al alcanzar la temperatura crítica de 750°C.

Este tema está ampliamente tratado en el Código Técnico de la Edificación, sección Seguridad Estructural (DB – SE).



Fig. 4: Puente de Hohenzollern, en Colonia (Alemania), destruido en 1945 como consecuencia de los bombardeos durante la Segunda Guerra Mundial.

5. Intervención

Como ya se ha señalado, la corrosión de la estructura es el daño principal y más frecuente en estructuras metálicas. La protección contra la corrosión comienza en la fase de proyecto, en la que debe fijarse la correcta protección y evacuación del agua.

Otra posible acción a tener en cuenta es la de las cargas ajenas al servicio, como es la acumulación de cargas muertas. El ejemplo más célebre y común al respecto en obra civil es el de la sucesión de capas de aglomerado asfáltico u hormigón sobre el tablero del puente, por ajustes de la rasante o por mejoras de la capa de rodadura.

Algunas de las soluciones de rehabilitación de estructuras de acero que encontramos en la práctica son:

- Aumentar las dimensiones. Se trata, en suma, de añadir material de refuerzo, con el fin de aumentar la sección resistente del perfil y/o reducir la esbeltez en pilares evitando el pandeo. En las vigas se pueden aumentar las alas para flexión, colocar chapas en el alma para flexión moderada y cortante, o cerrar el perfil con otra chapa para formar un cajón.
- Reducir la magnitud de las solicitaciones. Sucede cuando un edificio que fue calculado con un tipo de acero y secciones para resistir unas solicitaciones adecuadas al uso inicial ha cambiado dicho uso en su historia por otros que exigen un mayor dimensionado. Puede ser que en el proyecto de rehabilitación se plantee retornar al uso inicial o uno acorde con las cargas que debe soportar. En este caso siempre debe evaluarse la fatiga del material.
- Acomodar el diseño funcional. Consiste en la redistribución de las cargas de diseño, ya sea por la adición de nuevas piezas estructurales, mejora de la forma (inercia y esbeltez) o convertir en estructura mixta.
- Reforzar las uniones. Muchos problemas que aquejan a las estructuras de acero surgen de lesiones existentes en el punto de las uniones, por lo que será conveniente verificar su estado de conservación y la magnitud de las cargas iniciales (si se cuenta con la información), actuales y del proyecto de rehabilitación.

Si el problema es por falta de rigidez de las uniones, ésta se puede conseguir con la adición de escuadras y cartelas.

En el caso de que se traten de uniones empernadas es necesario también controlar las distancias entre pernos. Para reforzar estas uniones se puede aumentar el diámetro de los pernos (lo que implica ejecutar cuidadosas perforaciones), emplear elementos de mayor resistencia a los existentes (se debe comprobar antes el estado de los pernos) o aumentar la cantidad de pernos (conlleva al rediseño de la unión).

En el caso de uniones soldadas se puede limpiar y aumentar la longitud de soldadura o completar la unión con tornillos de alta resistencia.

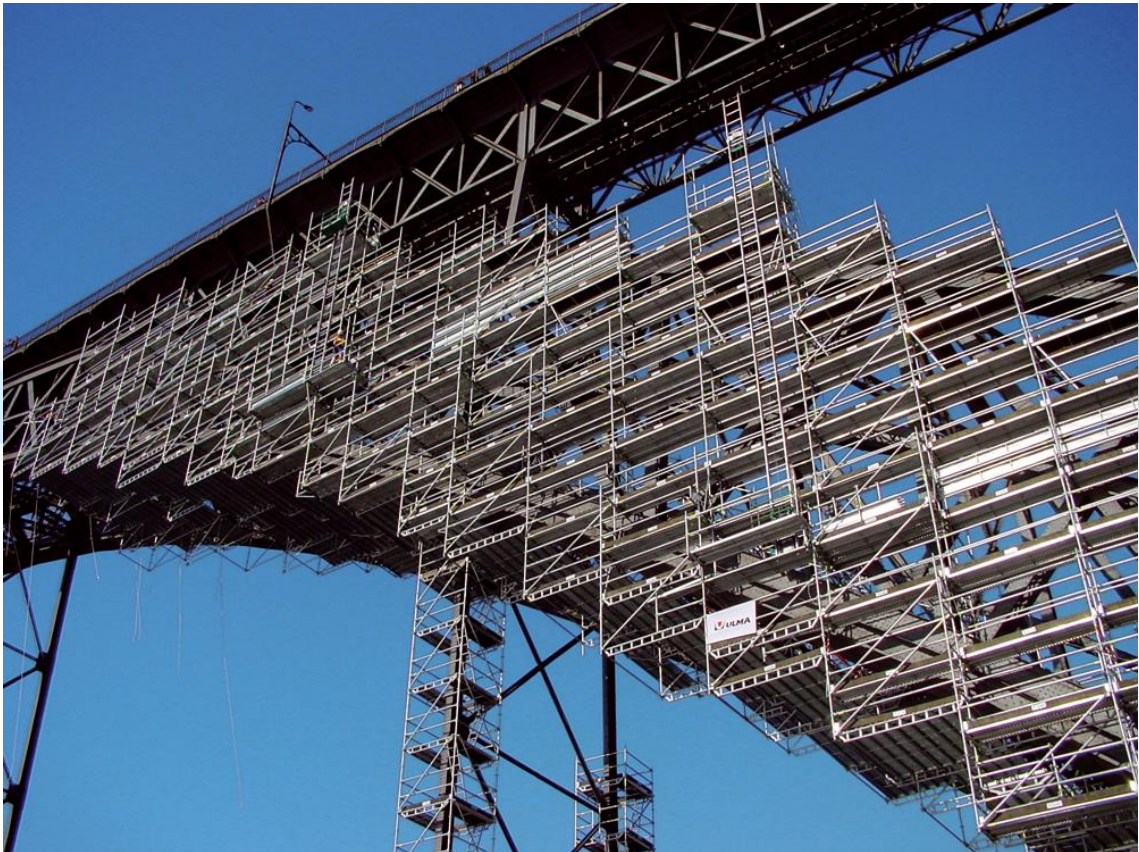


Fig. 5: Rehabilitación del Puente Don Luis I, en Oporto (Portugal).

6. Criterios de refuerzo

En el caso que aquí ocupa, las estructuras metálicas es poco frecuente que se requiera un incremento de la capacidad estructural con operaciones de refuerzo, si bien no conviene descartarlo.

Tras la evaluación estructural, se puede comprobar como muchos de los daños son de carácter reversible, causados por recrecidos de la plataforma, acumulación de detritus y drenaje defectuoso. La mayoría de las estructuras requieren únicamente una readaptación y/o cambio de los elementos superiores o los elementos de acero secundarios; por tanto, estas actuaciones llevan asociada adicionalmente una reducción de las cargas que actuarán tras la adaptación.

En aquellos casos en los que existe una gran pérdida de material por corrosión, los esquemas de refuerzo son inevitables; éstos comienzan con una limpieza mediante chorro abrasivo o la sustitución de los elementos existentes por otros nuevos, de igual o mayor capacidad. En lo que se refiere a las uniones y apoyos, resultara básico el análisis pormenorizado del camino de las cargas a través de la estructura, para proyectar en dichas uniones los refuerzos necesarios.

Para elementos de acero nuevos, que sustituyen las piezas rotas o perdidas, se recomienda utilizar tratamientos mediante granallado de las piezas que permitan alcanzar niveles de calidad de terminación y refuerzo de grado Sa2 1/2 –chorreado abrasivo a metal casi blanco- (tratamiento que se aplica en taller), complementado con una imprimación a base de resinas epoxi, con adiciones de cinc (tarea también ejecutada en taller) y, como complemento final (esta vez de aplicación en campo), realización de retoques con resinas epoxi y aplicación de una capa final de poliuretano alifático con espesores totales de alrededor de 200 μm (película seca).

El chorreado es la aplicación, normalmente de arenas, en chorro de aire a presión, facilitado por compresor, para la limpieza superficial de piezas in situ, en este caso metálicas, para eliminar impurezas, rebabas, residuos o corrosiones, preparando así la superficie para

poder aplicar posteriores tratamientos anticorrosivos y/o decorativos o de terminación. En el granallado, las partículas abrasivas (granalla) que se proyectan para la limpieza superficial y la mejora de las condiciones resistentes de las piezas metálicas de estructuras suelen ser pequeñas esferas de acero, o piezas angulosas también de acero, microesferas de vidrio o de circonio, etc.

Para los elementos metálicos ya existentes, la limpieza y el tratamiento, análogo al mencionado anteriormente, serán algo menos exigentes, requiriéndose niveles de terminación de grado St3 (chorreado o bien raspado y cepillado a fondo con cepillo de discos), con aplicación de posteriores pinturas protectoras (resinas epoxi) de similares especificaciones.



Fig. 6: Operaciones de chorreado de arena sobre un elemento de acero.

Los tratamientos de chorreado de arena o granallado, o de cepillado, tendrán la duración e intensidad necesarias para alcanzar en las piezas tratadas el grado de limpieza y los niveles de calidad de terminación especificados anteriormente:

- Sa2 1/2 en piezas nuevas tratadas en taller (la cascarilla de laminación, la herrumbre y las materias extrañas deberán eliminarse, de forma que sólo queden algunas trazas en forma de manchas o franjas; la superficie deberá limpiarse a continuación con una aspiradora, con aire comprimido limpio y seco o con un cepillo limpio).
-

- St3 sobre piezas de la estructura in situ, realizando la limpieza con cepillo de discos (este tratamiento deberá eliminar la cascarilla de laminación suelta, la herrumbre y las materias extrañas; la superficie deberá limpiarse a continuación con una aspiradora, con aire comprimido limpio y seco o con un cepillo limpio; en estas condiciones, la superficie deberá presentar un pronunciado brillo metálico).

En el caso de realizarse tratamientos de chorreado y granallado de estructuras metálicas in situ, así como en el caso de raspados y cepillado a fondo de estructuras, deberán tomarse las medidas adecuadas de protección del entorno (aislamiento del terreno mediante la colocación de lonas u otros elementos de contención, que recojan el material abrasivo proyectado –arena o granalla- y los restos de metal deteriorado o los restos de pinturas y tratamientos de la estructura que se quieren eliminar para su saneo), para evitar la incorporación de materiales contaminantes o extraños al suelo o a los cauces. Se procederá a la recogida de los residuos generados y a su tratamiento o envío a o por gestores autorizados, bien para la limpieza, recuperación y reutilización de los elementos chorreados –arena o granalla-, o incluso de los restos metálicos, o para el tratamiento por gestores autorizados de los restos generados –restos de pinturas, barnices, etc.-.

El proyecto deberá definir claramente, a través de los planos necesarios, generales y de detalle, y los textos necesarios (Anejos y Pliego de Condiciones), las piezas a tratar o reponer, las acciones concretas a realizar y sobre qué elementos (mediciones), las condiciones de trabajo para su ejecución y medidas de protección necesarias, los niveles de ejecución requeridos, las dosificaciones de elementos a utilizar (pinturas, resinas o barnices protectores, capas de terminación, etc.).
