

UNIONES SOLDADAS

Peter Tanner
ing. tit. ETH/SIA, ing. de C,C y P
IETcc-CSIC
Madrid



Peter Tanner es ingeniero de Caminos por la Universidad Politécnica Federal de Zürich, ETHZ. Sus actividades en el IETcc-CSIC abarcan la evaluación de la fiabilidad de estructuras existentes, la durabilidad y el modelado de las acciones.

RESUMEN

El conocimiento de las características de las soldaduras resulta indispensable para proyectar uniones sencillas, fácilmente ejecutables y económicas. Por este motivo, la contribución pone énfasis en los mecanismos de transmisión de las fuerzas mediante soldaduras, y en los posibles efectos de las soldaduras sobre el comportamiento de las estructuras metálicas. Se repasan las actividades necesarias en el marco de un dimensionamiento de uniones soldadas. Más que los aspectos de cálculo, se destaca la importancia de los aspectos conceptuales, de las disposiciones prácticas y de los procedimientos del aseguramiento de la calidad, incluidos los controles de calidad, para garantizar un funcionamiento adecuado de las estructuras con uniones soldadas.

1. INTRODUCCIÓN

Los medios de unión tales como los tornillos o las soldaduras permiten conectar entre ellas las piezas elementales que forman una estructura metálica (figura 1). La soldadura es el medio de unión más empleado para la fabricación en taller. En obra, su empleo también es generalizado –particularmente para las estructuras fuertemente solicitadas, como por ejemplo los puentes o las tuberías, etc.– aunque las posibles dificultades de puesta en obra, relacionadas a menudo con unas condiciones atmosféricas desfavorables, pueden aconsejar el uso de tornillos. El empleo de la soldadura ofrece las siguientes ventajas principales:

- realización de uniones poco deformables
- disminución, en comparación con una solución atornillada, del tiempo de preparación de las piezas de la unión
- simplificación de las uniones, incluida una mejora de la apariencia de la estructura
- realización de uniones estancas.

Sin embargo, el empleo de la soldadura requiere ciertas precauciones en cuanto a su puesta en obra:

- aplicación por personal cualificado
- protección, en obra, de los soldadores y de las soldaduras frente a la intemperie
- puesta en práctica de procedimientos de control de calidad.

La necesidad de adoptar estas precauciones constituye un indicio claro de que el conocimiento de las características de las soldaduras resulta indispensable para elegir, en cada caso, el tipo de unión que mejor se adapte a una determinada estructura (por su comportamiento, la facilidad de ejecución y el coste). En este sentido, el objetivo principal de la presente contribución consiste en el tratamiento de los aspectos más importantes desde el punto de vista de una concepción y ejecución adecuadas de las uniones soldadas.

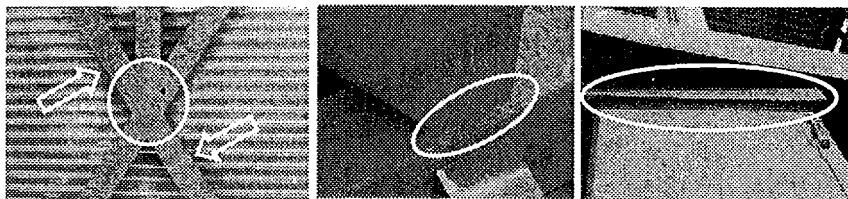


Fig.1 Ejemplos de uniones soldadas

2. PRINCIPIOS

2.1 Procedimientos

La operación de soldar por fusión con electrodo fusible consiste en unir dos piezas mediante el depósito de un cordón de metal fundido. El metal de aportación necesario proviene, normalmente, del electrodo. Este material debe presentar, después de soldar, como mínimo unas características (resistencia, tenacidad de fractura, etc.) correspondientes a las del material base. Los diferentes procedimientos que permiten la realización de la operación de soldar se distinguen, por un lado, por la fuente de calor (llama, arco eléctrico, etc.) y, por otro lado, por el tipo de protección del baño en fusión frente al aire ambiente. También se distingue entre:

- la soldadura automática, aplicada principalmente en el caso de soldaduras continuas de cierta longitud
- la soldadura semi-automática
- la soldadura manual, que constituye a menudo el único medio posible para ejecutar soldaduras de difícil acceso, o para soldaduras en obra.

Aparte de las soldaduras por fusión con electrodo existen otros procedimientos, particularmente la soldadura por resistencia, empleada por ejemplo para soldar pernos conectadores, o las soldaduras con plasma, por ultrasonido o láser. Más información sobre los procedimientos de soldar empleados habitualmente en la construcción metálica se encuentra en la literatura especializada [prEN 1090-1 1993], [Pratt 1989].

2.2 Clasificación de soldaduras

La figura 2 representa las principales posibilidades para la realización de una unión soldada y permite, además, clasificar los detalles soldados según diferentes criterios [Hirt, Bez 1994].

Clasificación según la forma

Según la forma de la unión se distingue básicamente entre:

- empalmes transversales a tope, realizados mediante soldaduras con penetración total o parcial
- uniones en T, realizadas mediante soldaduras con penetración total o parcial, o mediante soldaduras en ángulo
- uniones por recubrimiento, realizadas mediante soldaduras en ángulo.

Clasificación según el tipo de soldadura

Se distinguen los siguientes tipos de soldaduras: con penetración completa, con penetración parcial y cordones en ángulo. Las soldaduras con penetración completa o parcial requieren una preparación de los bordes de las piezas a unir (bisel). Las formas de los bisel dependen del espesor de los elementos a unir, de la posibilidad de soldar desde ambos lados de la pieza y de la necesidad de reducir las deformaciones inducidas (e.g. soldadura en X en lugar de V con el fin de repartir el calentamiento entre las dos caras de la pieza). Indicaciones relativas a las formas y las dimensiones para la preparación de los bordes se encuentran en [ISO 9692 1992].

Clasificación para el dimensionamiento

Para el dimensionamiento, los tres diferentes tipos de soldaduras de la figura 2 se pueden clasificar en dos grupos. El primer grupo engloba a las soldaduras con penetración total. El segundo grupo corresponde a los cordones en ángulo, a los que se asimilan las soldaduras con penetración parcial, ya que la sección de las piezas a unir está soldada parcialmente.

	Soldadura con penetración total	Soldadura con penetración parcial	Soldadura en ángulo
Unión a tope			
Unión en T			
Unión por recubrimiento			

Fig.2 Posibles ejecuciones para diferentes tipos de soldadura y formas de unión

2.3 Transmisión de las fuerzas

Las soldaduras que unen dos piezas deben asegurar, normalmente, la transmisión de las fuerzas de una pieza a la otra. Dependiendo del tipo de soldadura, estas fuerzas deben pasar por diferentes secciones. La verificación de la seguridad estructural de las uniones soldadas consiste en la comprobación de que la transmisión de las fuerzas resulte posible a través de todas estas secciones.

Soldaduras con penetración total

En el caso de las soldaduras con penetración total se pueden distinguir diferentes zonas o secciones a través de las cuales tienen que pasar las fuerzas: el material base de las piezas a unir, la zona afectada por el calor (en la que las propiedades metalúrgicas y mecánicas del material base pueden estar modificadas por el calentamiento y el enfriamiento, respectivamente durante y después del proceso de soldar; véase apartado 2.4), así como el metal de aportación. Por regla general, la resistencia del metal de aportación es por lo menos igual que la resistencia del material base. Consecuentemente, la resistencia última de las soldaduras con penetración total normalmente no es menor que la resistencia última de las piezas unidas. Esta hipótesis, sin embargo, se debe verificar en los casos en los que se suelden aceros de alto límite elástico. Por otra parte, se evitará el empleo de un metal de aportación con una resistencia demasiado elevada, con el fin de no reducir la capacidad de deformación de las uniones en la zona de la soldadura.

Soldaduras en ángulo

En las soldaduras en ángulo, solicitadas por tracción, una fuerza T tiene que pasar por las siguientes secciones para ser transmitida de una pieza a la otra (figura 3): las secciones de contacto, solicitadas por esfuerzos de tracción o de rasante; la sección de garganta, sometida a esfuerzos de tracción. Conociendo las fuerzas a transmitir, así como la resistencia del material base y del metal de aportación, se pueden determinar el espesor de garganta, a , y la longitud de la soldadura, l , de forma que la transmisión de las fuerzas resulte posible.

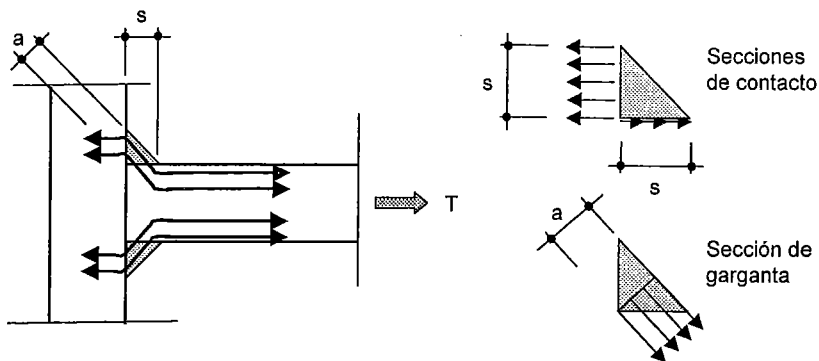


Fig.3 Transmisión de una fuerza de tracción, T , a través de un cordón en ángulo

2.4 Efectos secundarios

2.4.1 Fenómenos

Deformaciones

El metal depositado así como las zonas adyacentes a las soldaduras de las piezas a unir alcanzan temperaturas muy elevadas durante el proceso de soldar. A continuación, esta masa caliente se enfría y, consecuentemente, se contrae. Si la contracción no está impedida por los elementos que rodean la soldadura y las zonas calentadas, se producen deformaciones de las piezas de la unión: acortamientos, deformaciones angulares (figura 4a).

Tensiones residuales

En caso de que la masa de materia fría que rodea la soldadura impida su contracción durante el enfriamiento, se establece en la soldadura y en las piezas unidas un campo de tensiones auto-equilibradas (figura 4b). Estas tensiones se denominan tensiones residuales de soldadura.

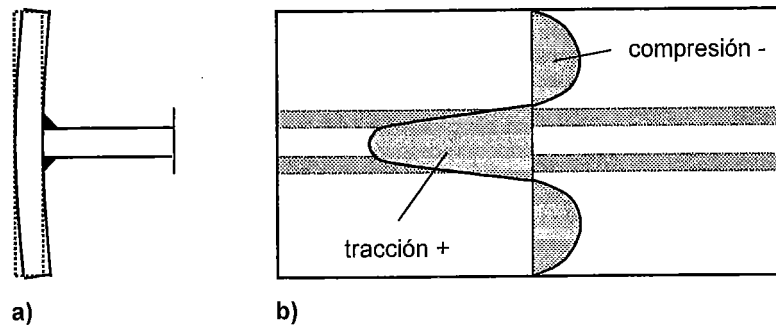


Fig.4 Deformaciones angulares, a), y tensiones residuales longitudinales, b), inducidas por las soldaduras

Anomalías

Por muy rigurosos que sean los métodos empleados de fabricación y de control (apartado 3), pequeñas discontinuidades o anomalías son inevitables en las soldaduras de estructuras de ingeniería civil. La figura 5 representa las principales anomalías que pueden estar presentes en las soldaduras. Según [SIA 161/1 1991] se distingue entre anomalías relativas a la configuración externa o interna de la soldadura. Desde el punto de vista del comportamiento de las uniones frente a la fatiga y la rotura frágil (apartado 2.4.2), las anomalías más peligrosas son, por orden decreciente: fisuras, falta de fusión, falta de penetración, inclusiones, poros.

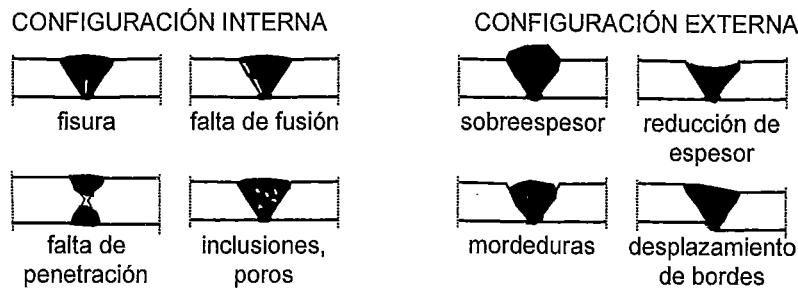


Fig.5 Anomalías en soldaduras

2.4.2 Consecuencias

Los fenómenos anteriormente descritos, inherentes a los procedimientos de soldadura habitualmente empleados en estructuras metálicas, pueden influir en el comportamiento estructural. Particularmente importantes en este contexto son las posibles consecuencias relativas a la fatiga, la rotura frágil así como la estabilidad de elementos comprimidos.

Fatiga

La fatiga puede producirse en elementos sometidos a sollicitaciones variables repetidas, y se manifiesta por la propagación de fisuras que se traducen en una pérdida progresiva de la resistencia. Estas fisuras se inician, a menudo, en las anomalías introducidas mediante el proceso de soldar. En numerosos trabajos de investigación se ha podido demostrar que el efecto combinado de estas anomalías, de las tensiones residuales y de las concentraciones de tensiones por efectos geométricos suele ser la causa de la iniciación y propagación de las fisuras de fatiga. Eso ocurre incluso en los casos en los que las tensiones aplicadas (determinadas sin tener en cuenta las concentraciones de tensiones, ni las tensiones residuales) estén muy por debajo del límite elástico del material. La propagación de una fisura de fatiga puede llevar a una rotura por plastificación de la sección neta o a una rotura frágil. El modo de rotura depende de las características del material, de la geometría del elemento, de la temperatura y de la velocidad de la sollicitación de la sección. La posibilidad de la iniciación y propagación de fisuras de fatiga se debe tener en cuenta en la concepción, dimensionamiento, fabricación, así como en la inspección y el mantenimiento de las estructuras sometidas a cargas variables repetidas, particularmente los puentes, los puentes grúa, etc. [Tanner 1996].

Rotura frágil

La influencia de las soldaduras sobre la rotura frágil se ha puesto claramente de manifiesto en algunos accidentes [Rolfe, Barsom 1987]. Efectivamente, varias circunstancias que facilitan la aparición de una rotura frágil se producen en las uniones soldadas:

- modificación de las características metalúrgicas y mecánicas del material base, debido al calentamiento durante el proceso de soldar y posterior enfriamiento
- presencia de anomalías que constituyen el inicio de fisuras que pueden propagar debido a las cargas de fatiga

- concentraciones de tensiones provocadas por cambios de geometría en uniones soldadas
- aumento de las tensiones en zonas localizadas, debido a las tensiones residuales.

El riesgo de una rotura frágil incrementa, por ejemplo, con el empleo de aceros de alto límite elástico, en uniones complejas conteniendo un importante número de soldaduras (introducción de tensiones residuales, sollicitaciones tridimensionales), o en elementos con grandes espesores (deformaciones plásticas impedidas). También incrementa para bajas temperaturas y altas velocidades de puesta en carga (impactos, cargas dinámicas).

Estabilidad de elementos comprimidos

La figura 6a) representa esquemáticamente la evolución de las tensiones en una sección rectangular conteniendo tensiones residuales, sometida a una fuerza de compresión, C (en principio, se podría asimilar esta sección al ala de un perfil armado, representada en la figura 4). Algunas fibras de la sección se plastifican antes de que el esfuerzo normal de compresión aplicado alcance el esfuerzo normal plástico, N_{pl} . En el momento en el que la deformación específica de una fibra supera el valor correspondiente al límite elástico, el módulo de elasticidad de esta fibra se reduce drásticamente. Las tensiones residuales influyen en el comportamiento de un elemento comprimido debido a que la plastificación de ciertas zonas conduce a una disminución de la rigidez de la sección. La figura 6b) pone de manifiesto que la rigidez de la sección es constante hasta que el esfuerzo normal de compresión alcance el valor máximo antes de que la primera fibra de la sección se plastifique, N_{el} . Una vez superado este límite, la rigidez de la sección disminuye rápidamente, para alcanzar su mínimo en el momento en el que todas las fibras de la sección estén plastificadas (esfuerzo normal plástico, N_{pl}).

La figura 6 pone claramente de manifiesto la interacción entre las tensiones residuales y el comportamiento de los elementos metálicos comprimidos. La distribución de las tensiones residuales en una sección depende, por otra parte, de sus características geométricas y de su fabricación. A efectos de la verificación de la seguridad estructural de los elementos comprimidos, las normas modernas de construcción metálica introducen las denominadas curvas de pandeo [ENV 1993-1-1 1992], [RPM-95 1996]. A través de estas curvas, la influencia de las tensiones residuales en el comportamiento de los elementos metálicos comprimidos se tiene implícitamente en cuenta.

2.5 Medidas

Para evitar que los posibles fenómenos enumerados en el apartado 2.4.1, inherentes a las soldaduras, puedan conducir a probabilidades de fallo inadmisibles de las uniones soldadas y, por extensión, de las estructuras soldadas, es necesario adoptar una serie de medidas que se refieren a todas las fases de un proyecto (incluyendo la concepción estructural, el dimensionamiento, la fabricación y el montaje, la puesta en servicio de la estructura, así como su explotación, inspección y mantenimiento). El tipo y la extensión de las medidas a adoptar se deben ajustar a las características y la importancia de la obra, y se tienen que planificar en una fase temprana de la elaboración de un proyecto (apartado 4).

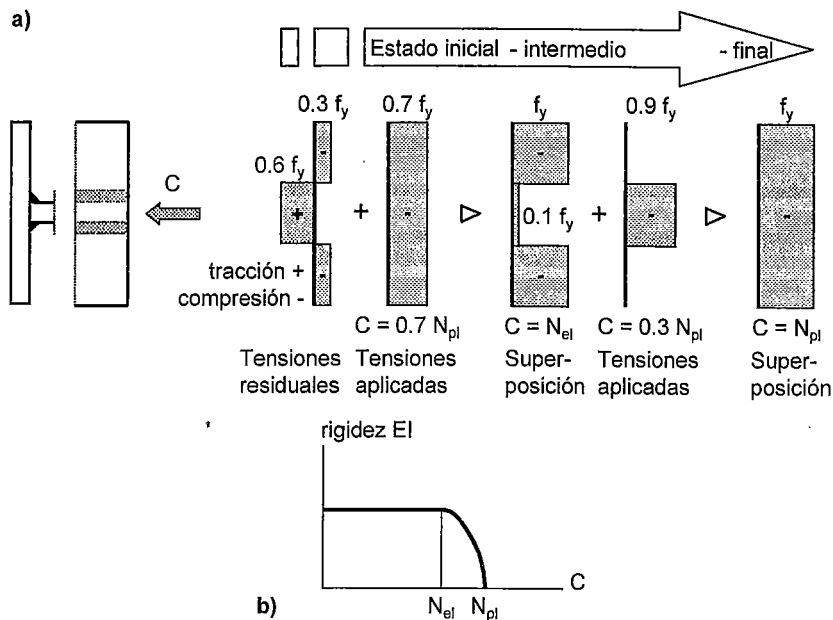


Fig.6 a) Influencia de las tensiones residuales en una sección comprimida. b) Influencia de las tensiones residuales sobre la rigidez de una sección

3. ASEGURAMIENTO DE LA CALIDAD

La calidad requerida de las soldaduras se debe especificar en función de las exigencias relativas a la estructura. A estos efectos, la mayoría de las normas modernas introducen una serie de clases, caracterizadas cada una por un conjunto de valores límite (tolerancias) relativos a las diferentes anomalías que se pueden presentar en las soldaduras. Se puede distinguir, por ejemplo, entre las siguientes clases [SIA 161/1 1991]: calidad especial, calidad superior, calidad normal y calidad mínima.

La elección de la clase de calidad es importante no solamente desde el punto de vista de la seguridad estructural, sino también desde el punto de vista económico en cuanto a la fabricación y el montaje. En términos generales, esta elección viene dictada por diferentes criterios, tales como la importancia de la obra, el riesgo para los usuarios y el entorno en caso de una posible rotura de una unión, el grado de sollicitación de la unión y el tipo de comportamiento de la sección correspondiente (elástico o plástico), las características del detalle constructivo, así como su sensibilidad frente a la fatiga o la rotura frágil. Las tolerancias se deben determinar para cada soldadura. Por ello es posible que una determinada estructura contenga detalles constructivos pertenecientes a diferentes clases de calidad.

La clase de calidad no solamente tiene una influencia sobre las tolerancias a respetar en cuanto al número y el tamaño de las anomalías externas e internas, sino también sobre las medidas a adoptar para la fabricación, el tipo y la extensión de los controles a efectuar y,

finalmente, sobre el coste de fabricación. Resultando la calidad normal generalmente suficiente para las construcciones habituales de edificación, los responsables de un proyecto deben estar conscientes de que la elección de una calidad superior puede tener una incidencia económica apreciable. Eso se debe básicamente a los tiempos suplementarios, necesarios para el proceso de soldar y el control de calidad. La norma [SIA 161/1 1991] contiene valores indicativos para el coste relativo de las soldaduras en función de la clase de calidad. Según estos datos, el coste de una soldadura de calidad especial puede suponer entre 2.5 y 4.5 veces el coste de la misma soldadura, pero de calidad normal.

Una vez especificada la calidad requerida de las soldaduras en función de los criterios mencionados anteriormente, es necesario asegurar que se respeten las tolerancias correspondientes. En este sentido, el término aseguramiento de la calidad se refiere a todas las medidas adoptadas durante la elaboración del proyecto y durante los trabajos de fabricación y montaje, destinadas a satisfacer las exigencias de calidad. Para garantizar la calidad de las soldaduras, la empresa que las realiza debe estar homologada por una institución reconocida. Esta homologación prescribe el grado de aptitud de las instalaciones y equipos para la fabricación de los elementos de construcción de la categoría (clase de calidad) correspondiente, así como la cualificación del personal que lleva a cabo los trabajos. Además, en función de la clase de calidad establecida, también se deben prescribir el tipo y la extensión de los controles a efectuar. Existen diferentes métodos para detectar las anomalías en las soldaduras (aparte de los métodos no destructivos para el control de la fabricación – control visual; líquidos penetrantes; partículas magnéticas; radiografía; ultrasonido–, existen también los métodos destructivos para el control de los procedimientos –macrografías; micrografías; ensayos de dureza, tracción, doblado, resiliencia–), que en el marco de la presente contribución no se pueden presentar. Información al respecto se encuentra en la literatura especializada, por ejemplo [Halmshaw 1988].

4. DIMENSIONAMIENTO

Diferentes actividades son necesarias, en el marco de la elaboración de un proyecto de una estructura soldada, para garantizar la seguridad estructural de las uniones. Estas actividades se refieren a todas las fases, desde la concepción de la estructura hasta su explotación, inspección y mantenimiento. Todas ellas se tienen que prever ya en una fase temprana de un proyecto (apartado 2.5). Es importante destacar que *dimensionamiento* no equivale a *cálculo*. La verificación de la seguridad estructural de las uniones mediante cálculos sólo constituye una entre varias actividades destinadas a asegurar su seguridad estructural. Estas actividades, que se deben ajustar a las características y la importancia de la obra y que deben ser complementarias, se refieren a:

- Concepción global de la estructura (estructuras tolerantes frente al daño; flujo continuo de las fuerzas; accesibilidad para inspección y mantenimiento; reducción de los efectos dinámicos).
- Concepción de las uniones (interacción entre rigidez, resistencia, capacidad de deformación de las uniones y comportamiento estructural; homogeneidad de las uniones; tolerancias).
- Concepción de los detalles constructivos (flujo continuo de las tensiones; evitar intersecciones de soldaduras; evitar desgarro laminar; facilitar ejecución).

- Elección de materiales (resistencia, alargamiento y tenacidad del material base y del metal de aportación en función de la sollicitación y de las características de las uniones).
- Elección de la clase de calidad (tolerancias en función de las exigencias relativas a la estructura).
- Elección de técnicas adecuadas de fabricación (procedimientos de soldar; preparación de bordes; posición de soldar; dispositivos auxiliares; secuencia de ejecución; tratamientos posteriores).
- Verificación de la seguridad estructural (evitar que las uniones estén en el origen de un fallo estructural; asegurar la capacidad de deformación).
- Adopción de un adecuado procedimiento de aseguramiento de la calidad (plan de control).
- Definición de un programa de inspección y de mantenimiento para la estructura en servicio, adaptado a sus características (plan de inspección y de mantenimiento).

El tema del aseguramiento de la calidad se ha abordado en el apartado 3, mientras que el resto de las actividades mencionadas no se pueden tratar específicamente en el marco de la presente contribución. Eso no significa, de ninguna manera, que su importancia sea reducida. Sólo a través de la adopción del conjunto de todas las actividades mencionadas, que deben ser complementarias, se puede garantizar la seguridad estructural de las uniones soldadas.

REFERENCIAS

- [prEN 1090-1 1993] prEN 1090-1: Exécution des structures en acier – Partie 1: Règles générales et règles pour le bâtiment. Comité européen de normalisation. Bruxelles, 1993.
- [ENV 1993-1-1 1992] ENV 1993-1-1: Design of steel structures. Part 1.1: General rules and rules for buildings. European Committee for Standardisation, Brussels, 1992.
- [Halmshaw 1988] HALMSHAW, R.: Introduction to the non-destructive testing of welded joints. The Welding Institute, Abington, 1988.
- [Hirt, Bez 1994] HIRT, M.A. et BEZ, R.: Construction métallique – Notions fondamentales et méthodes de dimensionnement. Traité de Génie Civil, vol. 10, Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, 1994. ISBN 2-88074-249-8
- [ISO 9692 1992] ISO 9692: Soudage à l'arc avec électrode enrobée, soudage à l'arc sous protection gazeuse et soudage aux gaz / Préparation de joint sur acier. Organisation internationale de normalisation, ISO, Genève, 1992.
- [Pratt 1989] PRATT, J.L.: Introduction to the welding of structural steelwork. The Steel Construction Institute, (SCI Publication 014), Ascot, 1989.
- [Rolfe, Barsom 1987] ROLFE, S.T. and BARSOM, J.M.: Fracture and fatigue control in structures. Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, NJ, 1987 (2nd edition).
- [RPM-95 1996] RPM-95: Recomendaciones para el proyecto de puentes metálicos para carreteras. Ministerio de Fomento, Madrid, 1996.
- [SIA 161/1 1991] SIA 161/1: Constructions métalliques / Assurance de la qualité, certificats d'exploitation, contrôles, matériaux. Société suisse des ingénieurs et des architectes, SIA, Zürich, 1991.
- [Tanner 1996] TANNER, P.: Los materiales también se cansan. La fatiga en los puentes mixtos. En: Puentes mixtos. Estado actual de su tecnología y análisis (Martínez Calzón, Ed.), Madrid, Colegio de ICCP, 1996, pp. 515-542.