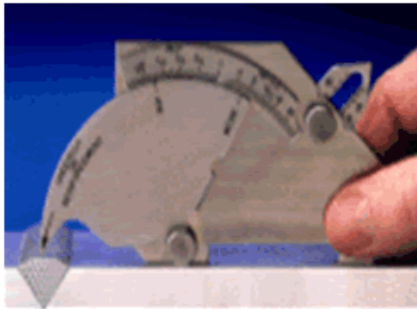


INSPECTOR DE SOLDADURA AWS QC1:2007



Carlos Oliva Minilo



INCHISOL
INSTITUTO CHILENO DE SOLDADURA
ORGANISMO TÉCNICO DE CAPACITACIÓN

ÍNDICE

DESCRIPCIÓN	PÁGINA
Capítulo 01 – EL INSPECTOR DE SOLDADURA Y SUS RESPONSABILIDADES	
Introducción	
Programas y normas para la certificación de personal de inspección de soldadura	
Requisitos para la certificación de inspectores de soldadura	
Niveles de certificación AWS de los inspectores de soldadura	
Responsabilidades, funciones y tareas del inspector de soldadura	
Aspectos éticos del ejercicio de la inspección de soldadura	
Esquemas europeos e internacionales para la certificación de inspectores de soldadura	
Re-certificación	
Correspondencia entre los niveles de calificación europeos y los de la AWS	
Capítulo 02 – TÉRMINOS Y DEFINICIONES DE SOLDADURA	
Introducción	
Tipos de juntas y tipos de soldaduras	
Partes de las juntas	
Otros términos	
Capítulo 03 – SÍMBOLOS DE SOLDADURA Y EXÁMENES NO DESTRUCTIVOS	
Introducción	
Símbolos de soldadura	
Disposiciones generales	
Soldadura en filete	
Soldadura en ranura	
Símbolos para ensayos no destructivos	
Consideraciones generales	
Símbolos suplementarios	
Extensión y localización de los ensayos no destructivos	
Capítulo 04 – METALÚRGIA DE LA SOLDADURA	
Introducción	
Conceptos metalúrgicos básicos	
Aleaciones	
Difusión	
Propiedades de los metales y las aleaciones	
Metalurgia básica de los aceros	
Clasificación de los aceros	
Tratamientos térmicos del acero	
Metalurgia de la soldadura	
Transformaciones del acero durante la soldadura	
Soldabilidad y carbono equivalente	
Control de las propiedades de las juntas soldadas	
Agrietamiento por hidrógeno	
Soldadura de aceros inoxidables	

DESCRIPCIÓN	PÁGINA
Capítulo 05 – PROCESOS DE SOLDADURA	
Introducción	
Generalidades	
Procesos de soldadura y métodos de aplicación	
Naturaleza del arco eléctrico	
Proceso de soldadura por arco metálico protegido con electrodo recubierto (SMAW)	
Variables específicas SMAW	
Condiciones de almacenamiento y secado de electrodos SMAW	
Consumibles, especificaciones y clasificaciones SMAW	
Proceso de soldadura por arco con alambre continuo protegido con gas (GMAW)	
Variables específicas GMAW	
Consumibles, especificaciones y clasificaciones GMAW	
Proceso de soldadura por arco con electrodo tubular con núcleo de fundente (FCAW)	
Variables específicas FCAW	
Consumibles, especificaciones y clasificaciones FCAW	
Proceso de soldadura por arco de tungsteno protegido con gas (GTAW)	
Variables específicas GTAW	
Consumibles, especificaciones y clasificaciones GTAW	
Proceso de soldadura por arco plasma (PAW)	
Variables específicas PAW	
Consumibles, especificaciones y clasificaciones PAW	
Proceso de soldadura por arco sumergido (SAW)	
Variables específicas SAW	
Consumibles, especificaciones y clasificaciones SAW	
Capítulo 06 – DISCONTINUIDADES DE SOLDADURA Y METAL BASE	
Introducción	
Discontinuidades de las juntas soldadas	
Discontinuidades relacionadas con requisitos dimensionales	
Discontinuidades en la estructura y propiedad de juntas soldadas	
Discontinuidades de metales base	
Capítulo 07 – CÓDIGOS, NORMAS Y ESPECIFICACIONES	
Introducción	
Origen de las normas	
Código, normas y especificaciones	
Aplicabilidad de las normas y claves para su interpretación	
Algunas normas sobre equipos y estructuras soldadas	
Requisitos de las normas para los materiales y su control	
Requisitos de calificación de procedimientos y personal de soldadura	
Requisitos sobre inspección y pruebas	
Normas para equipos y tuberías en servicio	

DESCRIPCIÓN	PÁGINA
Capítulo 08 – CALIFICACIÓN DE PROCEDIMIENTOS Y PERSONAL DE SOLDADURA	
Introducción	
Variables de soldadura	
Requisitos de calificación de procedimientos y personal de soldadura	
Especificación de procedimiento de soldadura – EPS (WPS)	
Calificación de procedimientos de soldadura	
Especificaciones estándar de procedimientos de soldadura	
Calificación de la habilidad del personal de soldadura	
Variables de soldadura a incluir en los documentos de calificación	
Responsabilidades con respecto a la calificación de procedimientos y personal de soldadura	
Capítulo 09 – PRUEBAS DESTRUCTIVAS	
Introducción	
Pruebas destructivas aplicables a las soldaduras	
Pruebas mecánicas	
Pruebas químicas	
Pruebas metalográficas	
Otras pruebas	
Capítulo 10 – ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS	
Introducción	
Ensayos no destructivos	
Inspección visual (VT)	
Líquidos penetrantes (PT)	
Partículas magnéticas (MT)	
Radiografía (RT)	
Ultrasonido (UT)	
Requisitos de calificación para el personal de END-NDT	
Requisitos para la conducción de END-NDT	
Comentarios finales	
Capítulo 11 – INSPECCIÓN DE SOLDADURA	
Introducción	
Secuencia de las actividades de inspección de soldadura	
Uso de calibradores de soldadura	
Comparación de los criterios de aceptación de algunas normas para las discontinuidades mas comunes	
Capítulo 12 – SEGURIDAD EN EL TRABAJO DE SOLDADURA Y CORTE	
Introducción	
Protección de ojos y oídos	
Ropa de protección	
Humos y Gases comprimidos	
Shock eléctrico	

Capítulo 01

EL INSPECTOR DE SOLDADURA Y SUS RESPONSABILIDADES

Contenidos:

DESCRIPCIÓN

PÁGINA

El inspector de soldadura y sus responsabilidades
Programas y normas para la certificación de personal de inspección de soldadura
Requisitos para la certificación de inspectores de soldadura
Niveles de certificación AWS de los inspectores de soldadura
Responsabilidades, funciones y tareas del inspector de soldadura
Aspectos éticos el ejercicio de la inspección de soldadura
Esquemas europeos e internacional para la certificación de inspectores de soldadura
Re-certificación
Correspondencia entre los niveles de calificación europeos y los de la AWS

Introducción

El inspector de soldadura es un trabajador técnico altamente especializado cuya función principal, misma que comparte con las organizaciones con las que participa, consiste en controlar y asegurar efectivamente la calidad de los trabajos de fabricación, construcción y montaje de equipos, estructuras e instalaciones en las que intervienen operaciones de soldadura.

Algunos de los diferentes campos y áreas industriales en las que participa el inspector de soldadura son:

- Construcción y mantenimiento de instalaciones de generación de energía;
- Plantas y equipos de procesos químicos, refinerías de petróleo;
- Líneas de tuberías para distribución de petróleo y sus derivados;
- Puentes y edificios;
- Locomotoras y carros tanque de ferrocarril.

Por su parte, el propósito fundamental de la inspección de soldadura, como se establece en el prólogo de las normas sobre calificación y certificación de inspectores de soldadura emitidas por la AWS (Sociedad Americana de Soldadura), es el de determinar si las ensambladuras soldadas “weldments” satisfacen los requisitos (criterios de aceptación) de un código o norma específicos, o los de algún otro documento.

El prólogo de tales normas hace énfasis en el sentido de que el inspector debe estar completamente familiarizado con los procesos de soldadura y corte y la calificación de procedimientos y personal de soldadura, con los metales base y de aporte involucrados y el propósito y las limitaciones de los métodos de prueba empleados; asimismo, indica que debe ser capaz de leer e interpretar dibujos y hacer reportes y juicios responsables. También afirma que para que el trabajo de los inspectores de soldadura resulte efectivo, deben realizar sus actividades de manera que éstas resulten consistentes con los requisitos y principios técnicos y éticos aplicables.

Los inspectores de soldadura operan como representantes de calidad de las organizaciones que los contratan o emplean. Tales organizaciones pueden ser el fabricante, constructor o contratista que produce los bienes soldados, o bien, el comprador de estos, una compañía de seguros, una entidad gubernamental, una firma de ingeniería o una agencia de inspección.

Dependiendo de la organización para la cual trabaja el inspector, pueden variar el alcance y las limitaciones de sus tareas, actividades y responsabilidades, por lo que resulta de gran importancia definir estos aspectos.

A fin de clarificar tales alcances y limitaciones, es útil considerar el enfoque empleado por las normas sobre sistemas de aseguramiento de calidad (y los organismos de certificación de sistemas de calidad) en relación con las partes desde y para las cuales se realizan las actividades de evaluación o auditoría: de primera parte son realizadas de manera interna por el proveedor (fabricante o contratista), de segunda parte si son realizadas por representantes del cliente y de tercera parte si son llevadas a cabo por un organismo de certificación de sistemas de calidad.

De manera análoga, puede considerarse que el inspector empleado directamente por el fabricante o contratista que produce los bienes soldados, actúa de parte de éste; si es contratado por el propietario de tales bienes (el cliente) o su representante, con el propósito de verificar la calidad con la que el fabricante o el contratista produce los bienes,

puede considerarse que se trata de un inspector de segundas partes, y si la entidad que contrata los servicios de inspección es una agencia independiente del fabricante y del cliente, por ejemplo, un organismo regulador o de certificación de productos o de sistemas de calidad, el inspector estaría trabajando para terceras partes.

Aunque la finalidad de la inspección de soldadura en todos casos es prácticamente la misma –determina si los ensamblajes soldados cumplen con los requisitos especificados–, dependiendo de la parte que contrata los servicios de inspección, se pueden señalar diferentes enfoques, cometidos, alcances y limitaciones en la participación del inspector. La diferencia más evidente en este sentido queda de manifiesto al considerar la forma en que el código AWS D1.1/D1.1M:2006 Structural Welding Code – Steel (Código de Soldadura Estructural para Acero), se refiere a las funciones de inspección. Este código, en su sección 6, establece como “funciones separadas” a la inspección y pruebas durante la fabricación y/o montaje y a la inspección y pruebas de verificación. Mientras que la inspección y pruebas durante la fabricación y montaje “deben ser realizadas, según sea necesario por parte del fabricante o contratista antes del ensamble, durante la soldadura y después de esta, con el propósito de asegurar que los materiales y la mano de obra cumplen los requisitos de los documentos contractuales”, la inspección y las pruebas de verificación deben de ser realizadas, normalmente por un inspector independiente del fabricante o contratista y los resultados de dichas inspecciones y pruebas deben ser reportadas al propietario (cliente) y al contratista.

Las funciones y responsabilidades del inspector en este texto son abordadas desde el punto de vista de la inspección y pruebas de verificación descritas en el código AWS D1.1 y en la norma para la certificación de inspectores de soldadura AWS QC1:2007.



FIGURA 1.1 – EJEMPLO DE INDUSTRIAS QUE UTILIZAN INSPECTORES DE SOLDADURA

Programas y normas para la certificación de personal de inspección de soldadura

Las sociedades e institutos técnicos dedicados a la soldadura, así como los organismos de normalización de los países desarrollados industrialmente, han elaborado y emitido normas y programas aplicables al entrenamiento, calificación y certificación del personal dedicado a realizar la función de inspector de soldadura.

La existencia de tales normas y programas está justificada debido a la importancia que tienen las funciones del inspector de soldadura –contribuir con el aseguramiento de la calidad de productos, estructuras e instalaciones complejas y costosas, tales como recipientes a presión, caldera, puentes, grúas, plataformas marinas, oleoductos y otras tuberías sometidas a presión, que involucran riesgos de seguridad para trabajadores y para el público en general-, y también debido a que para realizar tales funciones, el inspector debe dominar una gama amplia de habilidades prácticas y sobre el manejo e interpretación de normas, así como el conocimiento de fundamentos y aspectos técnicos especializados.

Las normas de este tipo establecen los requisitos que debe satisfacer el personal a fin de certificar su calificación para desarrollar de manera efectiva sus deberes como inspectores de soldadura. Las normas de diferentes países establecen requisitos similares, y entre varios esquemas nacionales de certificación existen “convenios de reciprocidad”. Esto es, un inspector certificado de acuerdo con el esquema de un país puede certificarse bajo el esquema de otro país si los requisitos de ambos países son equivalentes. El programa de certificación más ampliamente difundido es el continente americano y uno de los más importantes en el mundo es el implementado por la AWS. Los requisitos correspondientes están establecidos en el documento AWS QC1:2007 “Norma para la Certificación AWS de Inspectores de Soldadura”, misma que se analizará detalladamente en este capítulo y se tomará como referencial al considerar las funciones, habilidades, responsabilidades, obligaciones y requisitos aplicables al inspector de soldadura certificado.

Es importante destacar que la norma anterior se refiere al programa de certificación administrado por la AWS, entidad que aplica directamente los exámenes correspondientes y otorga la certificación al personal.

La AWS también ha desarrollado un esquema orientado a la certificación interna de inspectores. Este esquema es orientado a la certificación interna de inspectores. Este esquema es descrito en la norma AWS QC2:xxxx, “Práctica Recomendada para el Entrenamiento, Calificación y Certificación de Inspector de Soldadura Especialista e Inspector de Soldadura Asistente”. Este documento fue desarrollado con el propósito de ayudar, a las organizaciones que emplean personal de inspección de soldadura, a identificar los factores básicos necesarios para el entrenamiento, calificación y certificación de sus inspectores, para cumplir los requisitos y necesidades de una compañía o un proyecto específico.

Requisitos para la certificación de inspectores de soldadura

En términos generales, los requisitos que establecen las principales normas para el entrenamiento, calificación y certificación de inspectores de soldadura son los siguientes: escolaridad y experiencia en funciones directamente relacionadas con inspección de soldadura; conocimientos relevantes sobre procesos de soldadura y corte, calificación de procedimientos y personal de soldadura, metalurgia, métodos de pruebas destructivas y no destructivas y símbolos y definiciones estandarizadas de soldadura, entre otras, así como cumplir con requisitos de agudeza visual cercana y aprobar los exámenes correspondientes.

Adicionalmente, aunque de las normas no lo establecen de manera explícita, el inspector debe poseer una buena condición física en general, ya que realiza gran parte de su trabajo en posiciones incómodas y en áreas de accesibilidad restringida, y algunas veces, a muchos metros arriba o por debajo del nivel de piso. Asimismo, el inspector debe poseer una actitud profesional acorde con las exigencias aplicables, un comportamiento ético a toda prueba y también habilidades para comunicarse efectivamente de manera oral y por escrito, con una gran cantidad y variedad de individuos que participan en los diferentes proyectos, como pueden ser soldadores, paileros, ayudantes generales, operadores, personal de pruebas no destructivas y de control de calidad, supervisores, capataces, administradores, gerentes de planta, de ingeniería, de proyecto, de soldadura y de manufactura.

Niveles de certificación AWS de los Inspectores de Soldadura

Las diferentes funciones que se realizan en el ejercicio de la inspección de soldadura varían en grado de dificultad y responsabilidad, y para su realización se requieren mayores o menores grados de conocimientos y pericia del personal que las lleva a cabo, por lo que existen diferentes niveles de competencia para realizar efectivamente dichas funciones. Los requisitos, habilidades y funciones de cada uno de estos niveles de competencia están definidos en los diferentes niveles de certificación.

La certificación esta definida como los actos de determinar, verificar y dar testimonio escrito de la calificación del personal en relación con los requisitos especificados, y la calificación, por su parte, se define como el entrenamiento, las habilidades, la experiencia y los conocimientos requeridos al personal para realizar las tareas de un trabajo específico.

El documento AWS QC1:2007 “Norma para la Certificación AWS de Inspectores de Soldadura”, establece tres niveles de certificación AWS para personal de inspección de soldadura, mismos que se indican a continuación:

- Inspector de Soldadura Certificado Senior – ISCS (Senior Certified Welding Inspector – SCWI);
- Inspector de Soldadura Certificado – ISC (Certified Welding Inspector – CWI);
- Inspector de Soldadura Certificado Asociado – ISA (Certified Welding Inspector Associate - CAWI).

Las norma AWS B5.2 “Práctica recomendada para el entrenamiento, calificación y certificación de inspector de soldadura especialista e inspector de soldadura asistente”, por su parte, establece dos niveles de certificación:

- Inspector de Soldadura Especialista – ISE (Welding Inspector Specialist – WIS);
- Inspector de Soldadura Asistente – ISA (Welding Inspector Assistant – WIA).

Los requisitos a cumplir, las habilidades que deben dominar y las funciones que deben dominar los individuos de cada uno de los niveles de certificación antes mencionados, según la edición vigente de las normas referidas, se presentan en las tablas 1.1 y 1.2.

Es conveniente hacer énfasis en los requisitos de agudeza visual con que debe cumplir el personal, ya que buena parte de su trabajo consiste en realizar inspecciones visuales minuciosas. La norma AWS QC1:2007 establece que los aspirantes a certificarse deben pasar, con lentes correctivas o sin ellas, un examen de agudeza visual cercana en Jaeger J2 a 12” (30 cm.); mientras que la norma AWS B5.2:2005 estipula, como requisitos de visión, pasar, con o sin

lentes correctivas, un examen de agudeza visual cercana, en Snellen English o equivalente, a 12" y una prueba de percepción visual lejana de 20/40 o mejor.

Ambas normas también indican que los aspirantes a certificarse deben someterse a una prueba de diferenciación de colores, pero dejan bajo la responsabilidad del empleador el establecimiento y refuerzo de los requisitos de percepción de color.

TABLA 1.1 – Capacidad y requisitos para la certificación AWS de inspectores de soldadura (AWS QC1:2007)

Nivel	Escolaridad	Experiencia	Capacidades	Observaciones	Examen
ISCA – CAWI	Bachirelato Terminado	Mínimo 2 años	Realizar inspecciones específicas, supervisados por un CWI ó SCWI. Estar familiarizado con procesos de corte y unión** y entenderlos.	No tienen responsabilidades ni la facultad de aceptar o rechazar los trabajos que inspeccionan.	Aprobar examen de fundamentos (150 preguntas), de normas a libro abierto (46 preguntas) y práctico (46 preguntas) con nota de 72% mínimo
ISC – CWI	Bachirelato Terminado	Mínimo 5 años	Realizar inspecciones o verificar que el trabajo es inspeccionado y que se mantienen los registros de acuerdo con los requisitos de las normas aplicables. Estar familiarizado y entender los procesos de corte y unión** y los métodos de examen indicados en la nota nº 1.		Aprobar examen de fundamentos (150 preguntas), de normas a libro abierto (46 preguntas) y práctico (46 preguntas) con nota de 72% mínimo
ISCS - SCWI	Bachirelato Terminado	Mínimo 15 años*, y en control y aseguramiento de calidad, incluidos 3 años como supervisor de personal de control y aseguramiento de calidad, inspección de soldadura y de pruebas no destructivas.	Realizar inspecciones, supervisar uno o más CAWI y CWI y/o personal de pruebas no destructivas; preparar procedimientos de inspección, revisar e interpretar procedimientos de unión, conducir auditorias de proveedores y asegurar que se realiza el trabajo y se mantienen los registros de acuerdo con los requisitos de las normas aplicables.	Deben haber estado certificados como CWI por 6 años como mínimo. Estar familiarizado, entender y ser capaz de aplicar y/o preparar especificaciones y procedimientos de corte y unión**, y entender y ser capaz de planear y supervisar personal que realiza las actividades indicadas en las notas nº 1 y 2.	Aprobar examen para SCWI: de fundamentos (148 preguntas), de normas a libro abierto (48 preguntas) con nota de 72% mínimo, previa aprobación de examen para CWI.

* En funciones directamente relacionadas con productos fabricados de acuerdo con normas nacionales o internacionales y directamente relacionados con diseño, producción, construcción, inspección y reparación.

** SMAW, SAW, OFW, RW, EBW, GTAW, FCAW, GMAW, LBW, PAW, SW, EGW, ESW Rociado térmico, corte mecánico, corte térmico, soldadura fuerte y soldadura blanda.

Nota Nº 01: VT, UT, RT, AET, ET, MT, PT y LT.

Nota Nº 02: Auditorias de aseguramiento de calidad, procedimientos de aseguramiento de calidad y vigilancias de aseguramiento de calidad.

Nota N° 03: Todos los niveles de certificación requieren que el aspirante a certificarse cumpla con los requisitos de agudeza visual.

TABLA 1.2 – Capacidades y requisitos de entrenamiento, calificación y certificación de Inspector de Soldadura Especialista e Inspector de Soldadura Asistente (AWS B5.2:2005)

Nivel	Escolaridad	Experiencia	Capacidades	Observaciones	Examen
ISA (WIA)	Bachirelato Terminado	Mínimo 6 meses*	Su empleador lo ha entrenado, calificado y certificado para asistir las funciones de trabajo de inspector de soldadura, de acuerdo con los requisitos del programa de exámenes de soldadura propio del empleador.	No tiene la responsabilidad ni la facultad de aceptar o rechazar los trabajos que inspecciona. Debe realizar sus deberes de inspección bajo la supervisión de un ISE.	Aprobar examen de fundamentos (60 preguntas como mínimo), y práctico (de 25 preguntas como mínimo) con notas de 72% mínimo.
ISE (WIS)	Bachirelato Terminado	Mínimo 2 años.* Haber estado empleado por 2 años en el empleador que lo certificó.	Su empleador lo ha entrenado, calificado y certificado para asistir las funciones de trabajo de inspector de soldadura, de acuerdo con los requisitos del programa de exámenes de soldadura propio del empleador.	Puede haber estado empleado menos de dos años por el empleador que lo certifica, pero en este caso, debe tener por lo menos 5 años de experiencia.*	Aprobar examen de fundamentos (de 75 preguntas como mínimo), de normas a libro abierto (de 32 preguntas como mínimo= y práctico (de 32 preguntas como mínimo) con notas de 72% mínimo.

* En funciones relacionadas con productos fabricados de acuerdo con normas nacionales o internacionales y directamente con diseño, producción, construcción, inspección o reparación.

Nota N° 01: Los candidatos a ISE e ISA, para ser considerados para calificación y certificación, deben haber completado suficiente entrenamiento organizado para familiarizarse con los principios, prácticas y conocimientos de inspección aplicables a los procesos, productos y normas relacionados con el trabajo que desempeñan con su empleador, incluyendo los equipos y herramientas de inspección. El apéndice A de la norma recomienda los temas a incluirse en los cursos de entrenamiento.

Nota N° 02: El empleador debe establecer una “Práctica Escrita” para administrar el entrenamiento, calificación y certificación del personal, así como las funciones de trabajo de los inspectores de soldadura.

Nota N° 03: Todos los niveles de certificación requieren que el aspirante a certificarse cumpla con los requisitos de agudeza visual.

Responsabilidades, funciones y tareas del inspector de soldadura

Las tareas y funciones específicas y generales de los inspectores de soldadura deben ser definidas completamente por las organizaciones que los emplean, sin embargo, los aspirantes a certificarse deben ser capaces de realizar las funciones y actividades que se describen a continuación:

- Interpretar dibujos, símbolos de soldadura, códigos y otros documentos tales como contratos y ordenes de compra;
- Asegurar que los metales base y los materiales consumibles de soldadura cumplen con los requisitos de las especificaciones aplicables;
- Verificar la disponibilidad de los procedimientos de soldadura a emplearse, asegurar que éstos son adecuados y completos para el trabajo a realizarse, y que están debidamente calificados con respecto a las normas y requisitos especificados;
- Verificar que el equipo de soldadura a emplearse es el adecuado para los procedimientos de soldadura establecidos, que está en buenas condiciones de operación y que tiene los requisitos de tales procedimientos;
- Asegurar que las operaciones de soldadura se realizan con estricto apego a los procedimientos. Los principales aspectos a verificar en este rubro son:
 - Que únicamente se emplean procedimientos calificados, o si es aplicable, precalificados y aprobados.
 - Que las operaciones de soldadura se realizan dentro del intervalo de las variables establecidas por el procedimiento. Dentro de estas variables están incluidas, entre otras, las siguientes: el uso de los metales de aporte especificados para cada metal base o combinación de metales base, la preparación adecuada de los bordes a unir (de acuerdo con el diseño especificado de las juntas), las temperaturas de precalentamiento y entre pasos, el calor aportado por paso (si esto es aplicable), el tratamiento térmico posterior a la soldadura (si está especificado), gases de protección y características eléctricas.
- Testificar la ejecución de las pruebas de calificación de los procedimientos, las inspecciones y pruebas destructivas y no destructivas de los especímenes correspondientes, o supervisar esas actividades cuando son realizadas por agencias externas;
- Verificar que los resultados de prueba de la calificación de los procedimientos se documentan correspondientemente;
- Verificar que la habilidad de los soldadores, operadores de equipo automático para soldar y “pinchadores” están calificados de acuerdo con las normas y requisitos especificados, y que su calificación cubre todas las variables (posiciones y procesos de soldadura por ejemplo) previstas durante la ejecución de los trabajos.
- Testificar la ejecución de las pruebas de calificación de habilidad de personal de soldadura, o bien, supervisar estas actividades cuando son realizadas por agencias externas;

- Verificar que los resultados de las pruebas de calificación de habilidad de personal de soldadura son documentados correctamente;
- Solicitar la recalificación del personal de soldadura cuando existe evidencia de que éste no cumple con los requisitos de las normas aplicables;
- Verificar que los metales de aporte, electrodos, fundentes y gases se controlan, mantienen y manejan de manera que se evite su daño o deterioro, de acuerdo con las recomendaciones de los fabricantes de tales materiales y cumpliendo con los requisitos de las normas y de los documentos contractuales aplicables.

Aspectos éticos del ejercicio de la inspección de soldadura

Como se mencionó anteriormente, para que los inspectores de soldadura realicen sus actividades de manera efectiva, también es necesario que se conduzcan profesionalmente y con estricto apeo a principios éticos.

A continuación se reproduce el Código de Ética establecido en la norma AWS QC1:2007.

Código de Ética

Preámbulo

Para salvaguardar la salud y bienestar del público y mantener la integridad y los altos estándares de habilidades, prácticas y conducta en la ocupación de la inspección de soldadura, los SCWI's y CWI's de la AWS deben tener presentes los siguientes principios y alcances en que se aplican, entender que cualquier práctica no autorizada está sujeta a la revisión del Comité (de calificación y certificación de inspectores de soldadura de la AWS) y puede resultar en reprimenda o en la suspensión o la revocación de la certificación.

Integridad

El SCWI y CWI debe actuar con integridad completa en materia profesional y ser honesto y leal con sus empleadores, los organismos reguladores o el cliente del empleador, y con el comité o sus representantes, en los asuntos relacionados con esta norma.

Responsabilidades con el público

El SCWI y CWI debe actuar para preservar la salud y el bienestar del público al realizar los deberes de inspección de soldadura requeridos de una manera concienzuda e imparcial en la extensión completa de la responsabilidad moral y cívica y las calificaciones del inspector. De acuerdo con esto, el SCWI o CWI debe:

- Empezar y realizar asignaciones de trabajo solamente cuando está calificado por entrenamiento, experiencia y capacidad;
- Presentar credenciales cuando sea requerido;

- No representar falsamente status actual no falsificar el nivel de certificación (SCWI ó CWI) por la modificación de los documentos de certificación o por testimonio falso, verbal o escrito, de su nivel o status actual;
- Ser completamente concienzudo, objetivo y real en cualquier reporte, declaración o testimonio escritos sobre el trabajo, e incluir todo testimonio relevante o pertinente en tales comunicados o testimoniales;
- Firmar únicamente por trabajos que él ha inspeccionado, o por trabajos sobre el cual é tuvo conocimiento personal a través de supervisión directa;
- No asociarse ni patrocinar, intencionalmente, en negocios o hechos fraudulentos o deshonestos.

Declaraciones públicas

El SCWI ó CWI no debe emitir declaraciones, críticas o discusiones en materia de inspección de soldaduras relacionados con políticas públicas, inspirados o pagados por parte o partes interesadas, sin primero identificar la parte y el portavoz, y descubrir cualesquier interés financiero posible.

El SCWI ó CWI no debe expresar públicamente opiniones sobre asuntos de inspección de soldaduras, a menos que éstas se funden en conocimiento adecuado de los hechos en cuestión, bajo un respaldo de competencia técnica pertinente con el asunto, y bajo un respaldo de competencia técnica pertinente con el asunto, y bajo la convicción honesta de la precisión y la corrección de la declaración.

Conflicto de intereses

El SCWI ó CWI debe evitar conflictos de intereses con el empleador o el cliente y debe descubrir cualquier asociación de negocios o circunstancias que pudieran ser consideradas como tales.

El SCWI ó CWI no debe aceptar compensación, financiera o de otro tipo, de más de una parte por los servicios del mismo proyecto, o por servicios pertenecientes al mismo proyecto, a menos que las circunstancias estén completamente claras y sean acordadas por todas las partes interesadas o por sus agentes autorizados.

El SCWI ó CWI no debe solicitar o aceptar gratificaciones, directas o indirectas, de ninguna parte o partes provenientes del cliente o empleador y relacionadas con el trabajo del SCWI ó CWI.

El SCWI ó CWI, mientras está sirviendo en calidad de oficial público, ya sea electo, contratado o empleado, no debe inspeccionar, revisar ni aprobar trabajo en calidad de SCWI ó CWI en proyectos que también estén sujetos a la jurisdicción del inspector como un oficial público, a menos que esta práctica este expresamente dictada por una descripción de trabajo o por una especificación, y todas las partes afectadas con la acción estén de acuerdo.

Solicitud de empleo

El SCWI ó CWI no debe pagar, solicitar ni ofrecer directa o indirectamente ningún soborno o comisión para solicitar empleo profesional, con excepción de la comisión normal requerida por agencias de empleos con licencia.

El SCWI ó CWI no debe falsificar, exagerar ni consentir la mala interpretación de sus propias calificaciones profesionales y académicas, logros, asignaciones y responsabilidades pasadas, ni tampoco las de sus asociados. La

mala interpretación del status actual de la certificación SCWI ó CWI en el momento de, o después de la presentación de la información de empleo requerida, o en la solicitud de contratos de negocio en que la certificación actual es requerida o resulta benéfica de manera inherente (publicidad para cursos de entrenamiento, servicios de consultoría, etc.) debe ser una violación de esta sección.

Las credenciales de SCWI ó CWI únicamente pueden ser usadas en el campo de la inspección de soldadura. La AWS no ha calificado a estos individuos para inspección no relacionada con la soldadura.

El SCWI ó CWI no debe revelar información patentada o secreta (por ejemplo, información de valor comercial generalmente no conocida) concerniente a asuntos de negocios o procesos técnicos de un cliente o empleador presente o anterior sin su consentimiento escrito, excepto cuando resulte necesario para realizar los deberes de un SCWI ó CWI.

PRECAUCIÓN: Mientras que el SCWI ó CWI puede haber establecido excelentes credenciales, la certificación por sí sola puede no calificar legalmente al inspector para proporcionar servicios de inspección al público. Los documentos de contrato o las leyes de construcción o jurisdicciones pueden requerir que la inspección sea realizada bajo la responsabilidad y dirección de otros, tales como un ingeniero profesional registrado.

Práctica no autorizada

Toda violación de cualquier parte de las reglas de conducta prescrita por esta norma, si está relacionada con la ocupación de SCWI ó CWI incluyendo cualquier violación del Código de Ética, debe constituir una práctica no autorizada sujeta a la imposición de sanciones.

Recertificación

Los inspectores certificados por la AWS en cualquiera de los tres niveles, deben precertificarse cada tres años, volviendo a sustentar los exámenes prescritos o, alternadamente, cumpliendo con los requisitos establecidos en la norma para renovar su certificación.

Esquemas europeos e internacionales para la certificación de inspectores de soldadura

Los países europeos han desarrollado sus propias normas y esquemas para la calificación y certificación de personal de inspección de soldadura. Entre estos puede mencionarse el Esquema de Certificación para el Personal de Soldadura e Inspección del Reino Unido (U.K.'s Certification Scheme for Welding and Inspection Personnel – CSWIP), operado desde 1969 por el Instituto de Soldadura (The Welding Institute – TWI).

Los trabajos para implantar un esquema internacional europeo de certificación de personal de soldadura fueron iniciados por la Comunidad Europea de Soldadura, al percibir la necesidad de intercambiar puntos de vista y experiencias entre varios países y crear, en 1974, el Consejo Europeo para la Cooperación en Soldadura (European Council for Cooperation in Welding – ECCW) con la participación de Bélgica, Dinamarca, Alemania, Francia, Irlanda, Italia, Holanda y el Reino Unido. Años más tarde, el ECCW creció al contar con la participación de todos los países de la entonces Comunidad Europea y, en 1992, se le incorporaron los países de la Asociación Europea de Libre Comercio (European Free Trade Association – EFTA), así como los de Europa Oriental. Entonces cambió su nombre por el de Federación Europea de Soldadura, Unión y Corte (European Federation for Welding, Joining and Cutting), mejor conocida como la Federación Europea de Soldadura (European Welding Federation – EWF).

El primer paso de la EWF se orientó a armonizar el entrenamiento y calificación del personal de soldadura, ya que resultaba evidente que el futuro de la industrial europea dependía de la educación y entrenamiento de su fuerza laboral, y necesitaba de personal altamente calificado en el área de la soldadura.

En 1991 la EWF, conjuntamente con los institutos y organizaciones de soldadura nacionales más relevantes de 27 países, lanzo un esquema armonizado de entrenamiento y calificación en el campo de la tecnología de la soldadura, al publicar los lineamientos que definían los requisitos mínimos necesarios para entrenar a los ingenieros europeos de soldadura.

Después de esa primera experiencia, la EWF desarrolló otros lineamientos para cubrir diversos niveles profesionales en tecnología de soldadura y otras áreas relacionadas, tales como la unión con adhesivos. Actualmente, el esquema de entrenamiento y calificación de la EWF está compuesto por 14 lineamientos de calificación mutuamente reconocidos en 20 países europeos.

En materias relacionadas con la inspección de soldadura, el esquema armonizado de certificación cubre los niveles de competencia de Ingeniero Europeo de Soldadura (EWE), Tecnólogo Europeo de Soldadura (EWT), Especialista Europeo de Soldadura (EWS) y Practicante Europeo de Soldadura (EWP).

En un contexto internacional más amplio, el esquema de la EWF está en proceso de reconocimiento global al ser adoptados por países europeos. En este sentido, la EWF y el Instituto Internacional de Soldadura (International Institute of Welding - IIW) firmaron, en agosto de 1997, un acuerdo de un esquema en el cual se estableció el desarrollo de un esquema internacional basado en los Lineamientos de Educación y Procedimientos de Calificación de la EWF. Después, en enero de 1999 firmaron otro acuerdo en el que se estableció el reconocimiento mutuo de Organismos Nacionales Autorizados (Authorised National Bodies – ANB's).

Actualmente, los ANB's de la EWF también son reconocidos por los ANB's del IIW, u los dos organismos pueden emitir diplomas de Ingeniero Internacional de Soldadura (IWE), Tecnólogo Internacional de Soldadura (IWT), Especialista Internacional de Soldadura (IWS) y Practicante Internacional de Soldadura (IWP).

Correspondencia entre los niveles de calificación europeos y los de la AWS

El programa de inspectores de soldadura certificados de la AWS tiene mucho en común con los esquemas internacional y europeo, aunque difiere en algunos aspectos clave. Actualmente los consejos de la AWS y CSWIP están estableciendo un acuerdo para el reconocimiento mutuo de sus calificaciones respectivas.

Puede considerarse que los niveles de calificación de la AWS, con respecto a los europeos e internacionales, tienen la siguiente equivalencia:

EFW	IIW	Nivel europeo de Inspección de Soldadura	AWS
EWE	IWE	1	No aplicable
EWT	IWT	2	No Aplicable
EWS	IWS	3	SCWI
EWP	IWP	4	CWI



Ejemplo de Certificado (Ingeniero Internacional de Soldadura IIW)



Ejemplo de Certificado (Inspector de Soldadura Certificado CWI AWS QC1:1996)

Capítulo 02

TÉRMINOS Y DEFINICIONES DE SOLDADURA

Contenidos:

DESCRIPCIÓN

PÁGINA

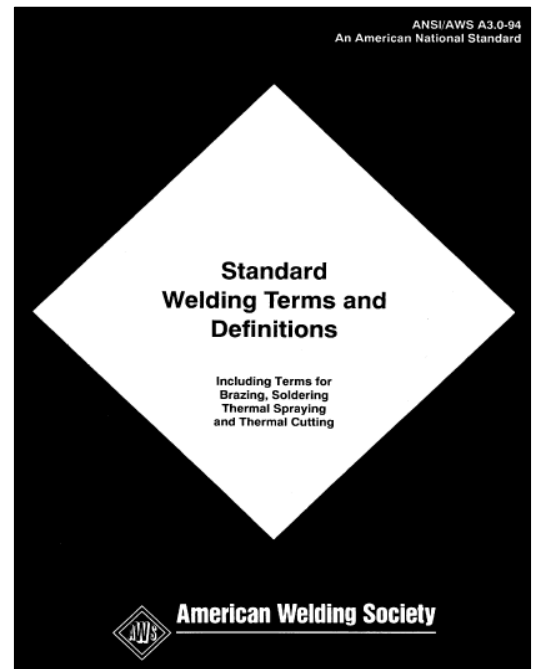
Términos y definiciones de soldadura
Tipos de juntas y tipos de soldaduras
Partes de las juntas
Otros términos

Introducción

La soldadura, al igual que la mayoría de los procesos industriales y disciplinas técnicas, posee sus propios términos especializados, mismos que resultan necesarios para lograr una comunicación efectiva entre la gente que de alguna manera está relacionada con los procesos, operaciones, equipo, materiales, diseño y otras actividades pertenecientes a los métodos de unión involucrados.

Debido a que es indispensable el uso correcto y preciso de estos términos, los institutos y organizaciones técnicas encargadas de las aplicaciones y del desarrollo científico y tecnológico de la soldadura de diferentes países, han preparado y publicado normas que establecen los términos estandarizados a emplearse y la definición de los mismos.

La norma de la Sociedad Americana de Soldadura que trata sobre este tema, la AWS 3.0, "Términos y Definiciones Estándar de Soldadura" (Standard Welding Terms and Definitions) fue preparada por el personal del Comité de Definiciones y Símbolos, y la edición vigente a la fecha es la publicada en 1994.



El inspector de soldadura, dada la relevancia que su participación tiene en la fabricación y construcción de bienes que producen por medio de operaciones de soldadura, tiene la obligación y la necesidad de entender y emplear correctamente estos términos a fin de ser capaz de preparar reportes y expresar sus observaciones y hallazgos de inspección, así como interpretar con precisión las normas, contratos, procedimientos e instrucciones, y de esta manera, cumplir efectivamente con sus actividades, funciones y responsabilidades.

No es el propósito de este capítulo, ni sería posible, hacer una revisión de todos los términos de las normas referidas, ni siquiera de los más relevantes, ya que dichas normas son relativamente extensas y el inspector debe tenerlas a la mano para usarlas como material de consulta. En lugar de realizar tal revisión, se procederá a considerar algunos términos clave y las figuras convenientes para clasificar su significado.

Tipos de Soldadura y Tipos de Juntas

Juntas

Es la unión de los miembros, o de sus extremos, que van a ser unidos o que han sido unidos.

Existen cinco (05) tipos básicos de juntas:

- Junta a Tope (Butt Joint);
- Junta en Esquina (Corner Joint);
- Junta en "T" (T Joint);
- Junta de Traslape (Lap Joint);

- Junta de Borde u Orilla (Edge Joint).

Los términos para designar cada uno de estos tipos de junta están definidos en las normas correspondientes, a las que debe remitirse el lector interesado en su significado preciso, pero la Figura 2.1 muestra de manera gráfica las características de cada tipo.

Existen otros tipos de juntas, tales como las juntas abocinadas o de pestaña (Flanged Joints) y juntas empalmadas a tope (Spliced Butt Joints), pero éstas son formas variantes de los cinco tipos ya mencionados.

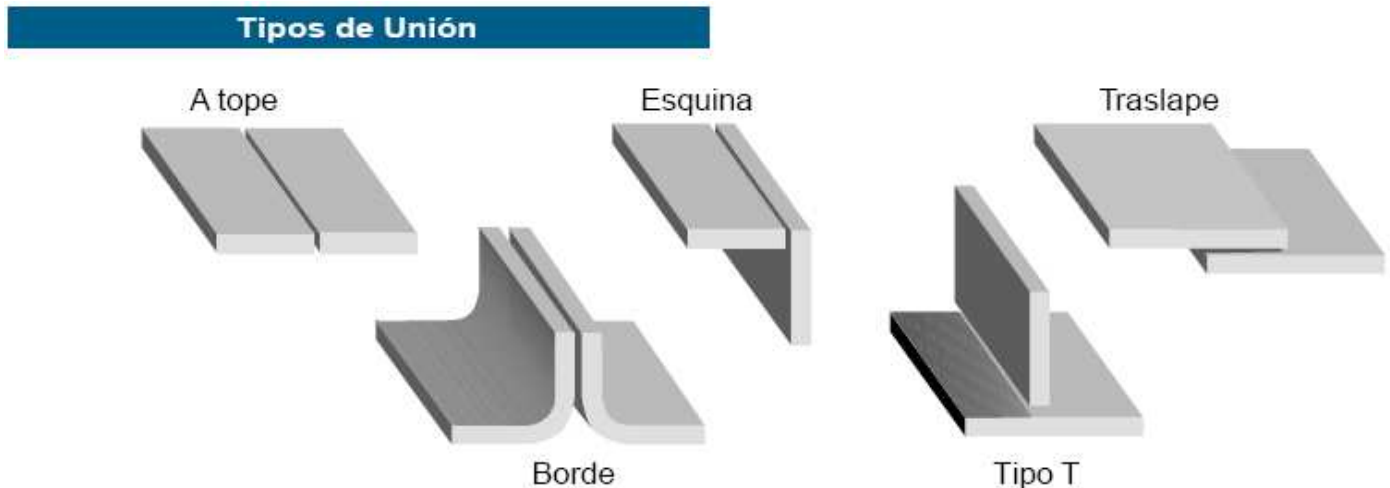


Figura 2.1

Tipos de Soldadura

Según la forma, la sección transversal del metal de soldadura y otras características, existen los siguientes tipos de soldadura:

- Soldadura de Ranura (Groove);
- Soldadura de Filete (Fillet);
- Soldadura de Pernos (Stud);
- Soldadura de Tapón (Plug);
- Soldadura de Botón (Slot);
- Soldadura de Puntos ó Proyección (Spot or Projection);
- Soldadura de Respaldo (Back Weld);
- Soldadura de Costura (Seam);
- Soldadura de Recubrimiento (Surfacing);
- Soldadura de Borde ó Reborde (Flange).

Por su parte, las soldaduras de ranura, dependiendo de la geometría de los bordes de los miembros de la junta, pueden ser de los siguientes tipos:

- Escuadra ó Cuadrada (Square);
- Bisel (Bevel);
- En "V" (V Groove Weld);
- En "U" (U Groove Weld);
- Abocinado en Bisel (Flare Bevel Groove Weld)
- Abocinado en "V" (Flare "V" Grove Weld).

Tipos de Soldadura

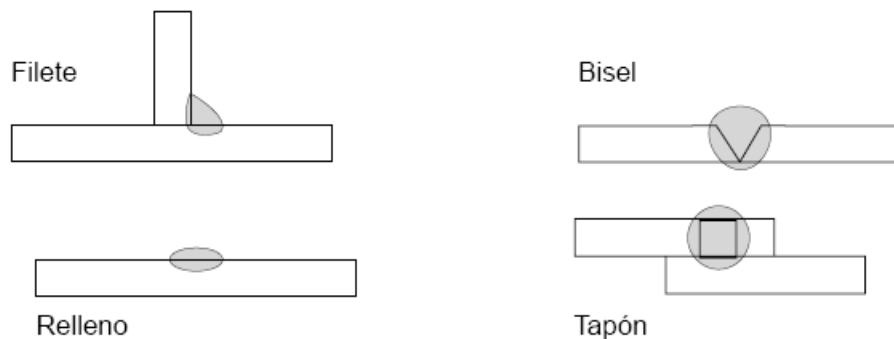


Figura 2.2a

Adicionalmente, las soldaduras mencionadas pueden ser dobles o sencillas. La figura 2.2b muestra, a manera de ejemplo, dos tipos de soldadura de ranura.

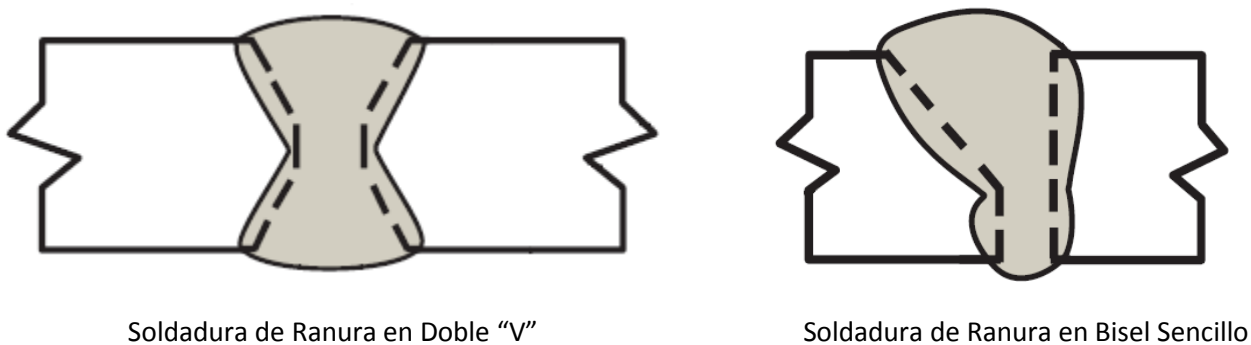


Figura 2.2b

Los tipos específicos de soldadura aplicables a cada junta están definidos en las normas sobre términos. Por otra parte, las ilustraciones y los ejemplos incluidos en el Capítulo 3, "Símbolos de Soldadura y de Exámenes no Destructivos", pueden ayudar a que el lector se familiarice con los diferentes tipos de junta y de soldadura.

Partes de las Juntas

Las partes o elementos de las juntas soldadas o a soldarse son relativamente numerosas, y a fin de poder interpretar y describir correctamente cualquier junta, es necesario identificar y ubicar cada una de sus partes. La figura 2.3 indica algunos de estos elementos en una junta aún sin soldarse.

- 1- Abertura de la Raíz
- 2- Cara de la Raíz
- 3- Cara de la Ranura
- 4- Angulo del Bisel
- 5- Angulo de la Ranura
- 6- Tamaño de la Soldadura de Ranura Indicado en el Símbolo de Soldar
- 7- Espesor de la Plancha

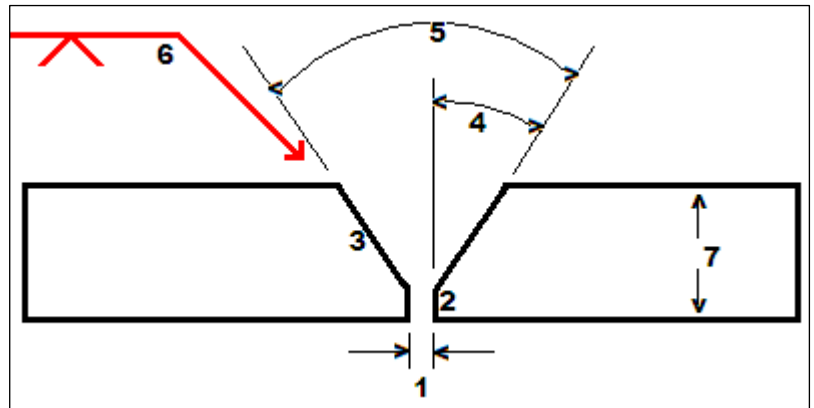


Figura 2.3 – Partes de las Juntas a Tope

Las soldaduras ya terminadas involucran condiciones, partes y rasgos adicionales a aquellos presentes en las juntas antes de ser soldadas, y resulta indispensable conocer la nomenclatura para designar tales partes tales partes y rasgos a fin de describir e interpretar toda la información relativa a las juntas ya soldadas. En las soldaduras de ranura, algunas de estas partes son el pie, la cara y el refuerzo de soldadura; y en las soldaduras de filete, algunas de estas partes son: la pierna, el tamaño y la garganta teórica.

Las figuras 2.4 y 2.6 ilustran la ubicación, nombre y características de algunos componentes de las juntas soldadas, pero se hace énfasis en el sentido de que el lector debe remitirse a las normas referidas a fin de conocer con precisión el significado de los términos incluido en tales figuras.

Otros Términos

Entre otros términos que se pueden considerar clave para que el inspector interprete adecuadamente dibujos, juntas, instrucciones y normas, se encuentran los siguientes:

Capa de Soldadura (Layer Weld): Un estrato de metal de soldadura consistente de uno o más cordones dentro de una soldadura de pasos múltiples.

Coalescencia (Coalescence): Crecimiento conjunto o interno del cuerpo de los materiales siendo soldados.

Cordón de Soldadura (Weld Bead): Una soldadura que resulta de un paso.

Cordón Oscilado u Ondulado (Weave Bead): Un tipo de cordón de soldadura hecho por oscilación transversal.

Cordón Recto (Stringer Bead): Un tipo de cordón de soldadura hecho sin movimiento oscilatorio apreciable.

Ensambladura Soldada (Weldment): Un ensamble cuyos componentes están unidos por medio de soldadura.

Junta Sencilla o Soldada por un Solo Lado (Single-Welded Joint): Una junta soldada por fusión por los dos lados.

Paso de Soldadura (Weld Pass): Progresión sencilla de una soldadura a lo largo de la junta. El resultado de un paso es un cordón o una capa de soldadura.

Secuencia de Soldadura (Welding Sequence): El orden de hacer las soldaduras en una parte a soldar.

Nota: Se utilizan diferentes secuencias a fin de reducir la cantidad de distorsión causada por las operaciones de soldadura. Las tres técnicas más comúnmente empleadas son: secuencia en retroceso (backstep sequence), secuencia en bloque (block sequence) y secuencia en cascada (cascade sequence).

Soldabilidad (Weldability): La capacidad de un material para ser soldado, bajo las condiciones de fabricación impuestas, dentro de una estructura específica adecuadamente diseñada, y de tener un comportamiento satisfactorio en el servicio intentado.

Soldadura (Welding): Un proceso de unión que produce la coalescencia de los materiales al calentarlos a una temperatura de soldadura, con o sin la aplicación de presión o por la aplicación de presión solamente, y con o sin el uso de metal de aporte.

Soldadura en el Respaldo (Back Weld): Una soldadura hecha en el respaldo de una soldadura de ranura (soldada por un solo lado).

Soldadura de Respaldo (Backing Weld): Respaldo en forma de soldadura (depósito de soldadura efectuado antes de depositar el primer paso por el otro lado y que actúa como respaldo).

Nota: Las juntas con soldadura de respaldo se consideran soldadas por los dos lados.

Soldadura de Sello (Seal Weld): Cualquier soldadura cuyo propósito principal es proporcionar un grado específico de hermeticidad (evitar fugas).

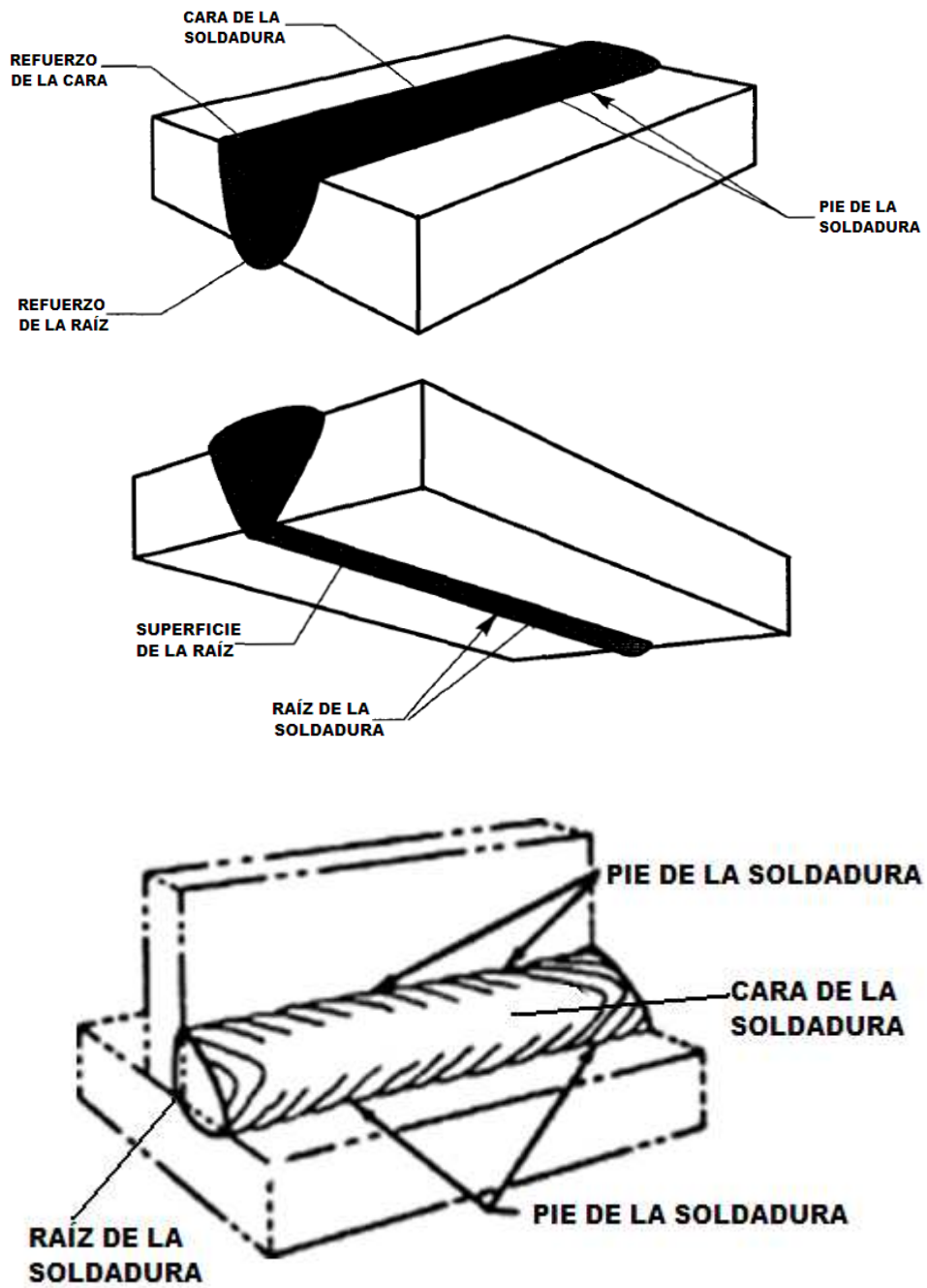
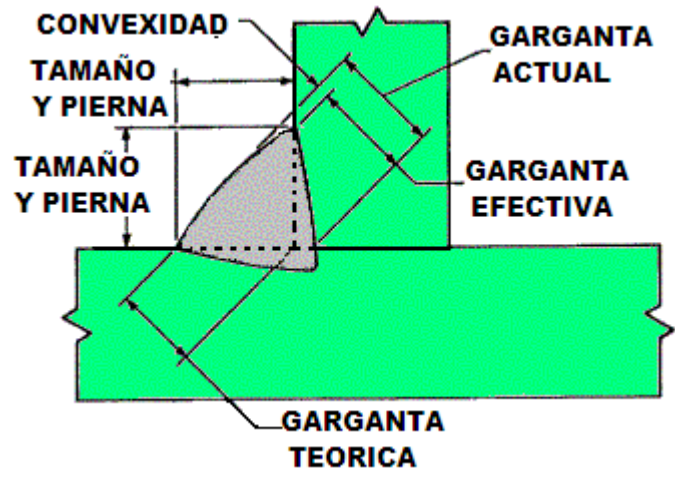
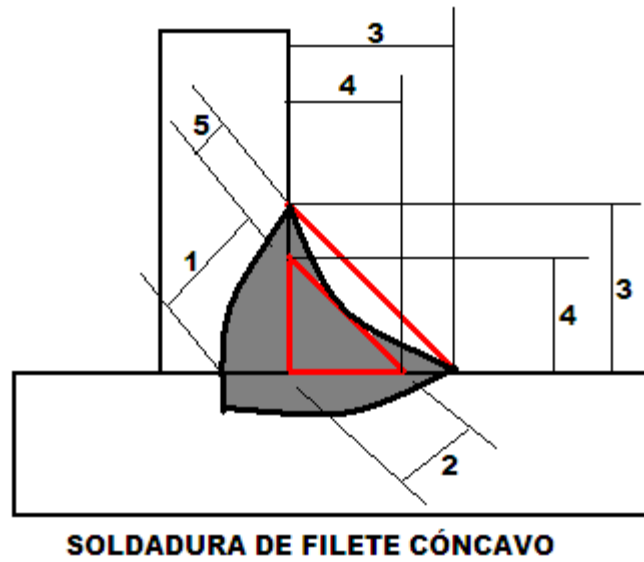


Figura 2.4 – Partes de las Juntas Soldadas

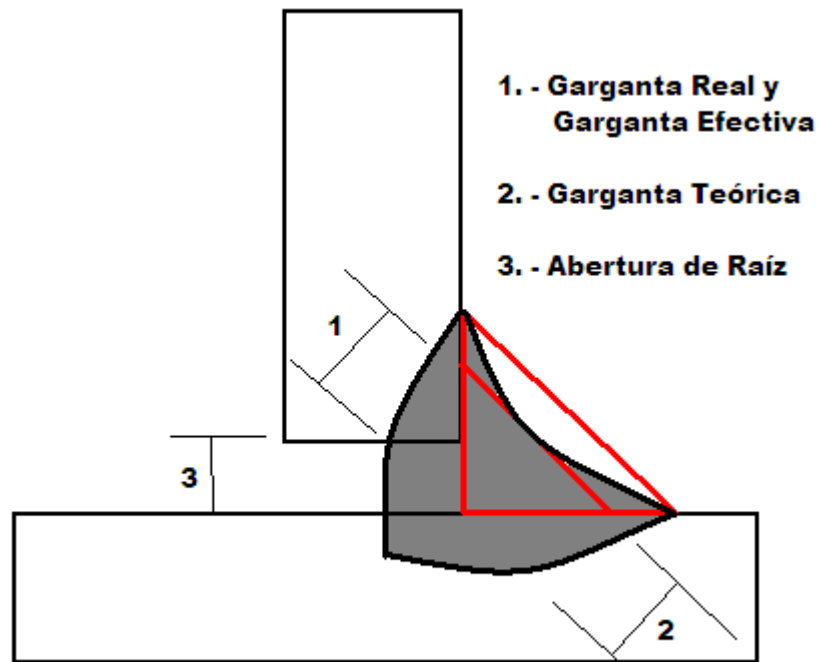


SOLDADURA DE FILETE CONVEXO

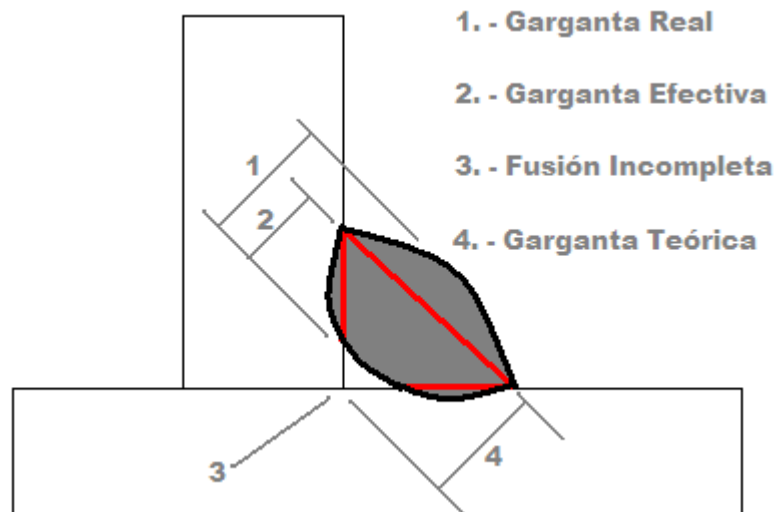


SOLDADURA DE FILETE CÓNCAVO

FIGURA 2.5 - TAMAÑOS DE LAS SOLDADURAS DE FILETE

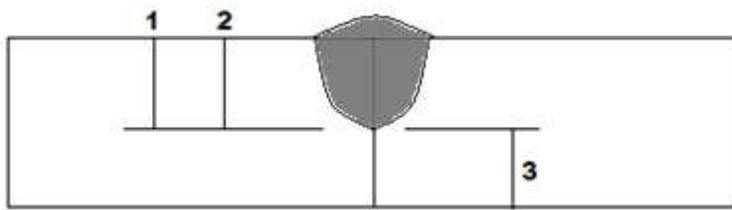


Soldadura de Filete con Abertura de Raíz

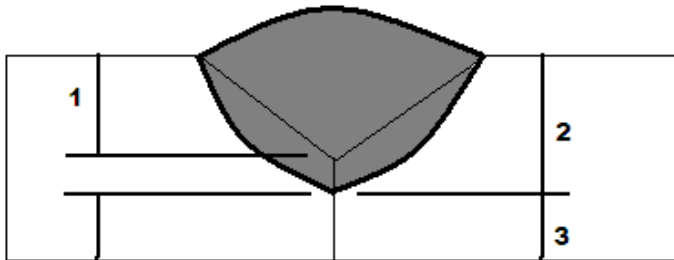


SOLDADURA DE FILETE CON FUSIÓN INCOMPLETA

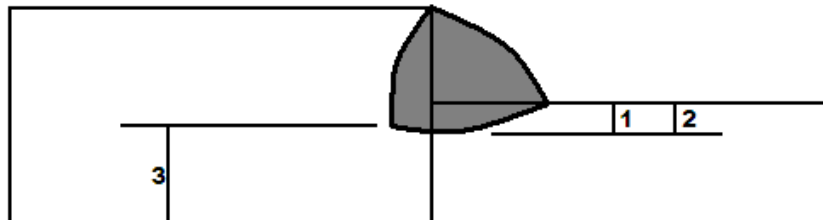
FIGURA 2.5 - TAMAÑOS DE LAS SOLDADURAS DE FILETE (CONTINUACIÓN)



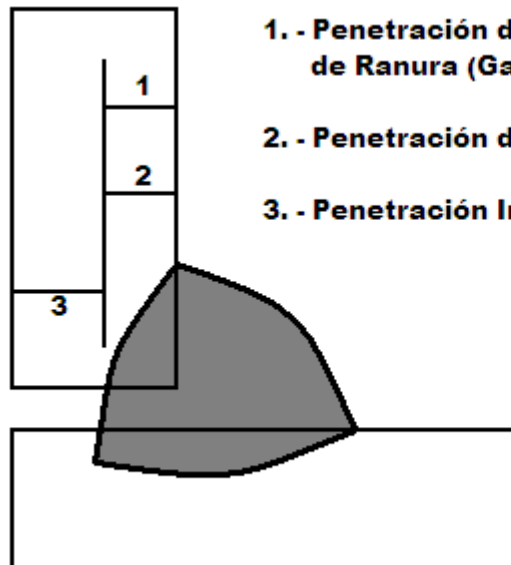
- 1. - Penetración de la Raíz
- 2. - Penetración de la Junta, Tamaño de la Soldadura de Ranura (Garganta Efectiva)
- 3. - Penetración Incompleta en la Junta



- 1. - Penetración de la Raíz
- 2. - Penetración de la Junta, Tamaño de la Soldadura de Ranura (Garganta Efectiva)
- 3. - Penetración Incompleta en la Junta



- 1. - Penetración de la Junta, Tamaño de la Soldadura de Ranura (Garganta Efectiva)
- 2. - Penetración de la Raíz
- 3. - Penetración Incompleta de la Junta



- 1. - Penetración de la Junta, Tamaño de la Soldadura de Ranura (Garganta Efectiva)
- 2. - Penetración de la Raíz
- 3. - Penetración Incompleta de la Junta

FIGURA 2.6 – PENETRACIÓN EN LA JUNTA Y EN LA RAÍZ Y PENETRACIÓN INCOMPLETA EN LA JUNTA

Capítulo 03

SÍMBOLOS DE SOLDADURA Y ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS

Contenidos:

DESCRIPCIÓN

Símbolos de Soldadura
Disposiciones Generales
Soldadura en Filete
Soldadura en Ranura
Símbolos para Ensayos No Destructivos (NDT-END)
Consideraciones Generales
Símbolos Suplementarios
Extensión y Localización de los Ensayos No Destructivos

PÁGINA

Introducción

Las características básicas, generales y detalladas con las que han de fabricarse los productos, son transmitidas por el diseñador a todo el personal involucrado por medio de instrucciones, especificaciones y, principalmente dibujos, ya que estos últimos constituyen el medio más eficaz para describir con exactitud detalles complicados.

Sin embargo, los dibujos a menudo son poco efectivos para representar conexiones soldadas, ya que con frecuencia involucran configuraciones complejas y detalles intrincados, mismos que deben ser comunicados con objetividad y precisión por el diseñador, a fin de que resulten claros y comprensibles para el personal de fabricación e inspección. Los detalles y configuraciones de las conexiones soldadas pueden resultar tan complicados que para describirlos sería necesario recurrir a numerosos dibujos detallados e información escrita. Un método para reducir tal volumen de información sin menoscabo de la precisión es el empleo de símbolos de soldadura.

Sin embargo, para que tales símbolos resulten útiles, es necesario que tengan el mismo significado para todo el personal, por lo que sus aplicaciones están estandarizadas por medio de normas.

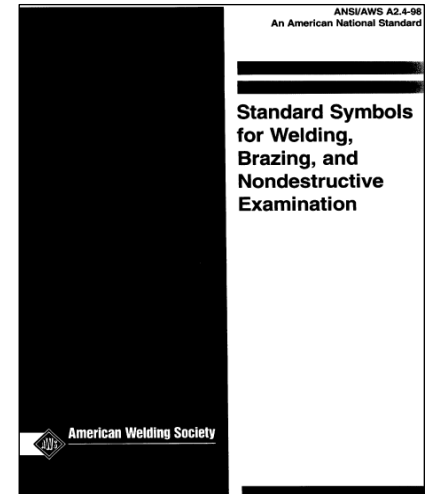
La norma americana que trata sobre este tema es la ANSI/AWS A2.4, “Símbolos Estándar para Soldadura, Soldadura Fuerte y Ensayos No Destructivos” y la edición vigente es la de 1998.

Para que los símbolos de soldadura, soldadura fuerte y ensayos no destructivos resulten efectivos, deben ser empleados apropiadamente. Si son mal aplicados o mal interpretados, causan confusión y problemas.

Los símbolos de soldadura y ensayos no destructivos están compuestos de elementos numerosos, cada elemento tiene un significado específico y una localización determinada con respecto de los otros, y existen ciertas convenciones en relación con su aplicación y disposición. Debido a lo anterior, el empleo correcto de estos símbolos requiere que sus usuarios conozcan con detalle cada elemento y las reglas asociadas con su construcción, uso e interpretación.

Por otra parte, existen varios tipos de soldadura (y sus respectivos símbolos) e innumerables situaciones de aplicación de cada tipo, por lo que el lector tendrá que remitirse a la norma o a la parte de la norma que resulte de su interés.

A continuación se consideran algunos aspectos clave sobre la construcción y aplicación de los símbolos que con mayor frecuencia necesita emplear el inspector.



Símbolos de Soldadura

Símbolos Básicos

La norma americana hace distinción entre los términos “Símbolos de Soldadura (Weld Symbol)” y “Símbolo de Soldar (Welding Symbol)”.

El símbolo de soldadura es un carácter gráfico que indica el tipo de soldadura y forma parte del símbolo de soldar.

El símbolo de soldar es una representación gráfica de una soldadura y está constituido por ocho elementos:

- Línea de Referencia;
- Flecha;
- Símbolo Básico de Soldadura;
- Dimensiones y Otros Datos;
- Símbolos Suplementarios;
- Símbolos de Acabado;
- Cola;
- Especificaciones del Proceso u Otras Referencias.

No es necesario usar todos estos elementos, a no ser que se requieran para clarificar algún detalle particular, pero cuando se utilicen, cada uno de ellos debe estar en la posición específica que se indica en la Figura 3.2.

Símbolos de Soldadura Básicos

Los símbolos de soldadura básicos deben dibujarse como se indica en la Figura 3.1 y sobre la línea de referencia.

Símbolos Suplementarios

Los símbolos suplementarios a usarse conjuntamente con el símbolo de soldar deben ser dibujados como se indica en la Figura 3.3.

Tipos Básicos de Juntas y Soldaduras Aplicables

Los tipos básicos de junta y las soldaduras aplicables a cada unos se muestran en la Figura 3.4.

CHAFLAN							
PLANO	INCLINADO	V	BISEL	U	J	V ENSANCHADA	BISEL ENSANCHADO

ANGULO	TAPON U OJAL	ESPARRA- GO	PUNTO O PROYECCION	COSTURA	REVERSO O RESPALDO	RECARGUE	BORDE	
							CANTO	ESQUINA

Figura 3.1 – Símbolos Básicos de Soldadura

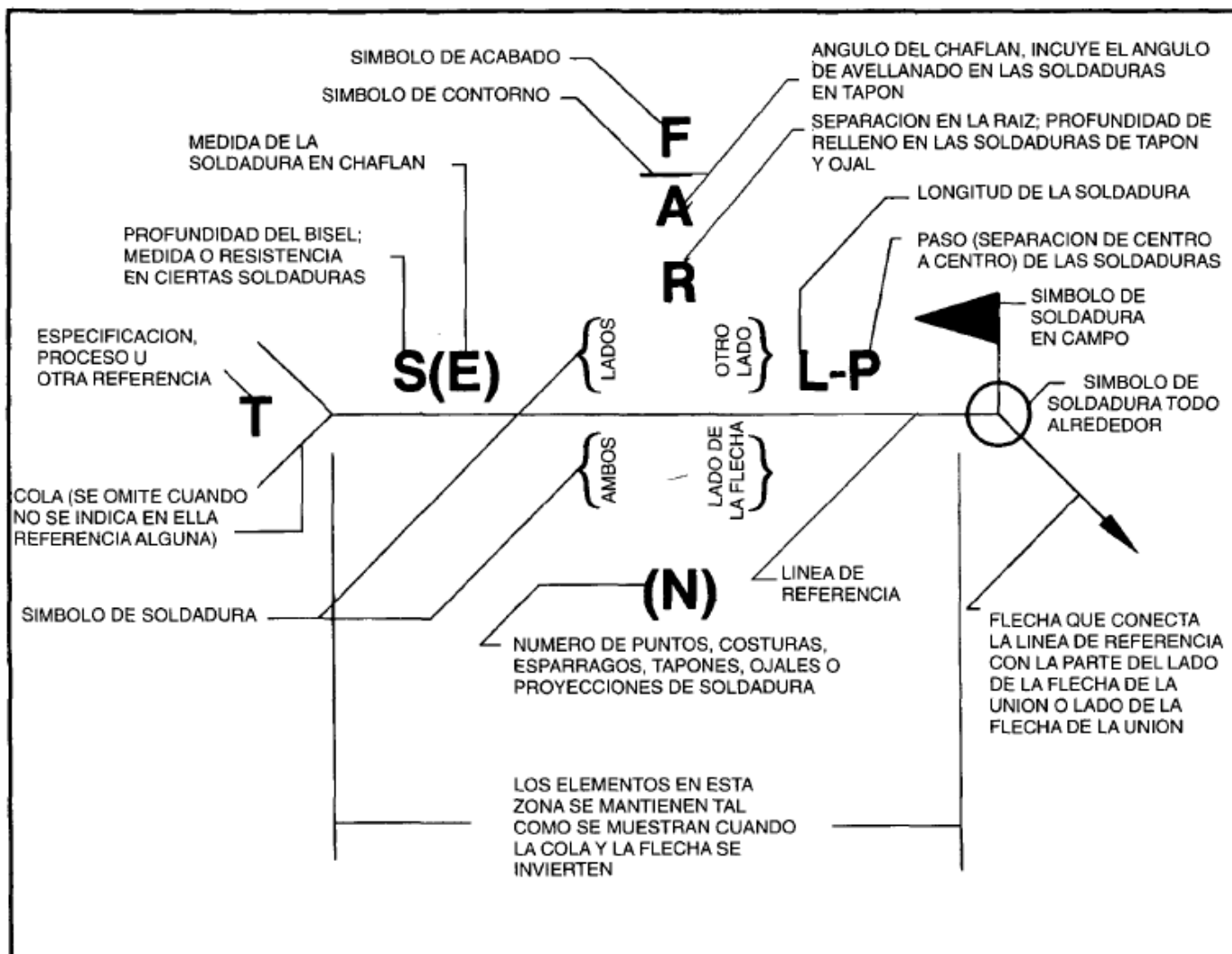
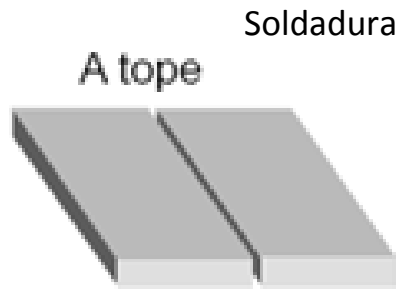


Figura 3.2 – Símbolo de Soldar y Localización Estándar de sus Elementos

SOLDAR TODO AL-REDEDOR	SOLDADURA EN CAMPO	REFUERZO DE RAZ	INSERTO CONSUMIBLE (CUADRADO)	RESPALDO O SEPARADOR (RECTANGULAR)	CONTORNO		
					A PAÑO O PLANO	CONVEXO	CONCAVO

Figura 3.3 – Símbolos Suplementarios



Soldaduras Aplicables

- Ranura Cuadrada
- Ranura en V
- Ranura en J
- Ranura en V-abocardada
- Ranura de bisel-abocardada
- Extremo doblado
- Fuerte



Soldaduras Aplicables

- Filete
- Ranura Cuadrada
- Ranura en V
- Ranura en bisel
- Ranura en U
- Ranura en J
- Ranura en V-abocardada
- Ranura de bisel-abocardada
- Extremo doblado
- Esquina doblada
- Punto
- Proyección
- Costura
- Fuerte



Soldaduras Aplicables

- Filete
- Tapón
- Agujero
- Ranura Cuadrada
- Ranura en bisel
- Ranura en J
- Ranura de bisel-abocardada
- Punto
- Proyección
- Costura
- Fuerte

Figura 3.4 – Tipos Básicos de Juntas y Soldaduras Aplicables

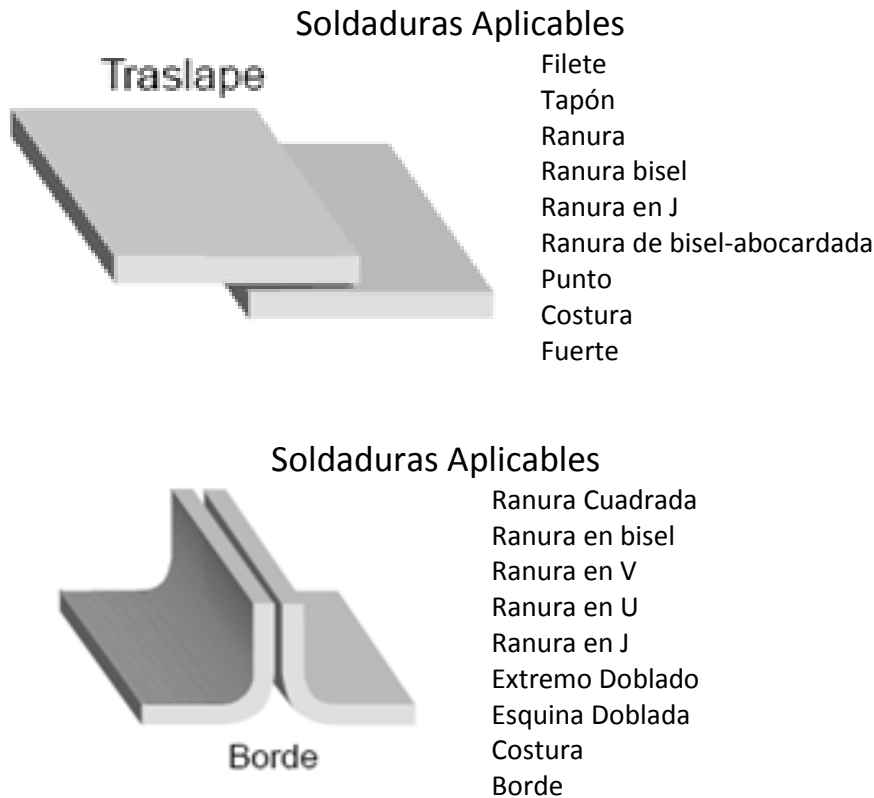
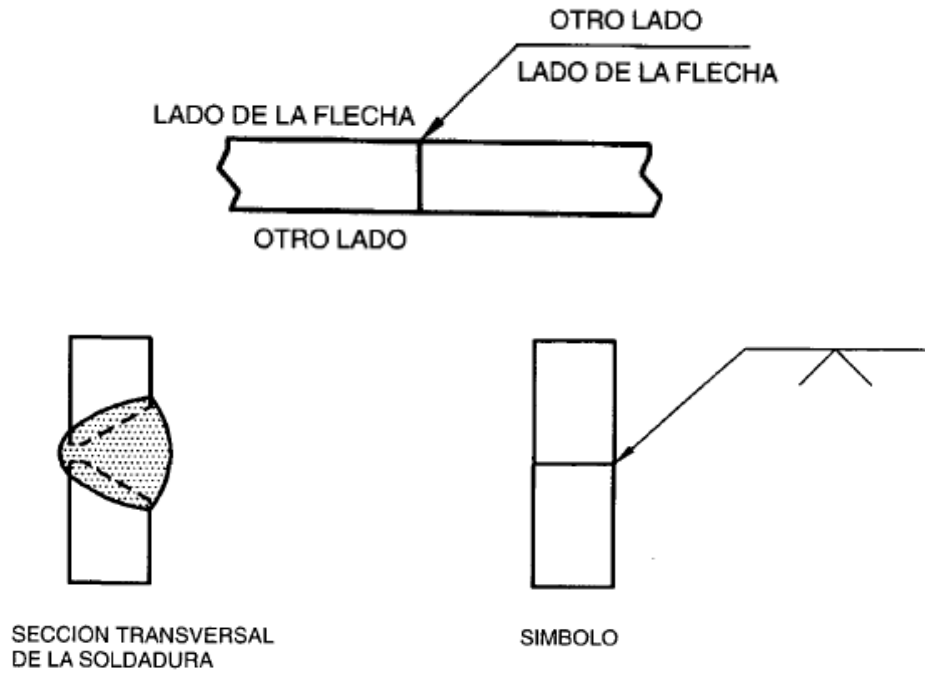


Figura 3.4 – Tipos Básicos de Juntas y Soldaduras Aplicables (Continuación...)

Disposiciones Generales

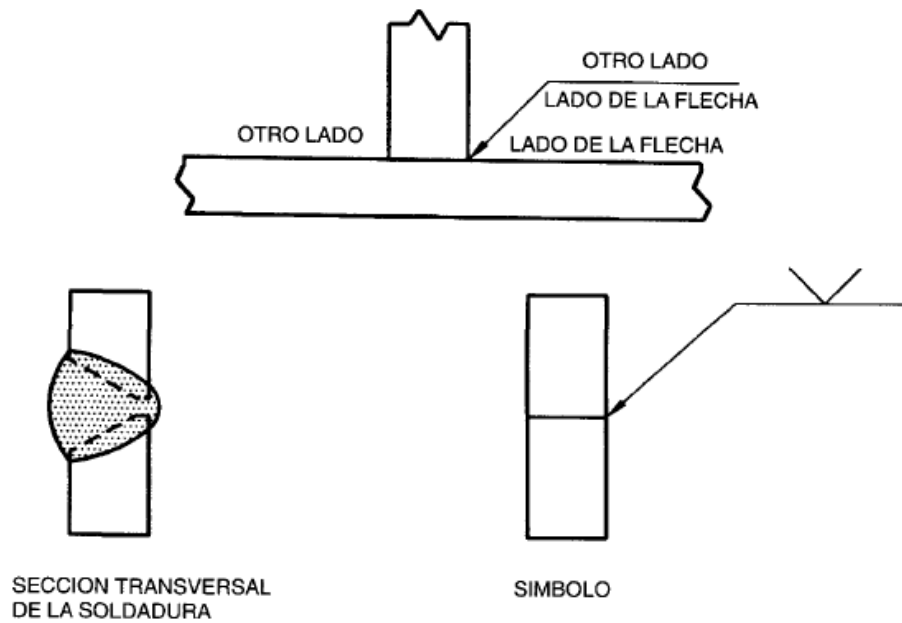
Significado de la Posición de la Flecha

La información correspondiente a lado de la flecha en la junta se sitúa por debajo de la línea de referencia, la información de la junta aplicable al otro lado de la flecha se sitúa por encima de la línea de referencia y, si la junta va a ser soldada por los dos lados, la información requerida se coloca a ambos lados de la línea se coloca a ambos lados de la línea de referencia como se indica en las figuras 3.5, 3.6 y 3.7.



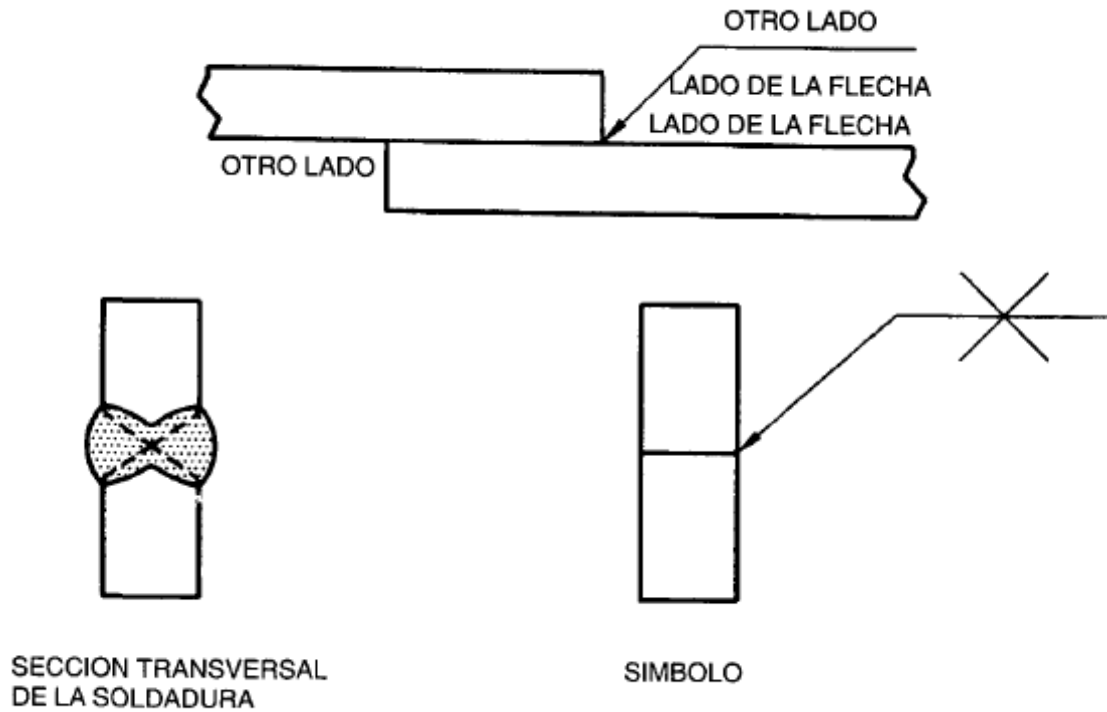
(A) LADO DE LA FLECHA DEL SIMBOLO DE SOLDADURA EN CHAFLAN EN V

Figura 3.5 – Símbolo para una Soldadura de Ranura en “V” del lado de la Flecha



(B) OTRO LADO DEL SIMBOLO DE SOLDADURA EN CHAFLAN EN V

Figura 3.6 – Símbolo para una Soldadura de Ranura en “V” del otro Lado de la Flecha



(C) AMBOS LADOS DEL SIMBOLO DE SOLDADURA EN CHAFLAN EN V

Figura 3.7 – Símbolo para Soldadura de Ranura en “V” por ambos lados de la Flecha

Flecha Quebrada o con Quiebre

Cuando sólo uno de los miembros de la junta va a ser preparado, como en el caso de las soldaduras de ranura en bisel, en J y abocinadas en bisel o en extremo, se emplea la flecha quebrada, cuyo quiebre debe apuntar hacia el miembro que debe ser preparado. El quiebre de la flecha se omite cuando resulta obvio qué miembro va a biselarse, o cuando no hay preferencia sobre cuál va a prepararse. La siguiente figura ejemplifica el empleo de la flecha quebrada.

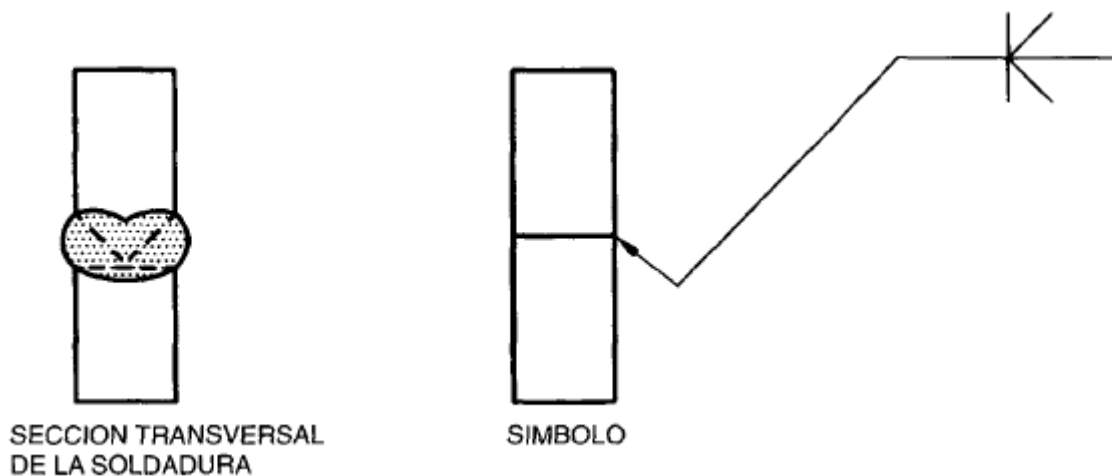


Figura 3.8 – Aplicación de la Flecha Quebrada para una Soldadura de Ranura de Doble Bisel

Símbolo de Penetración Completa (Melt-Thru Symbol)

El símbolo de penetración completa debe emplearse únicamente donde se requiera cien por ciento de penetración completa en las juntas o en los miembros y un refuerzo en la raíz de la soldadura, en soldaduras hechas por un solo lado.

Este símbolo debe colocarse en el lado de la línea de referencia opuesta al del símbolo de soldadura. Las dimensiones de la penetración completa no necesitan indicarse sobre el símbolo de soldar y, si se desea especificar la altura del refuerzo, ésta debe indicarse en el dibujo, a la izquierda del símbolo de penetración completa. La figura 3.9 ilustra el uso de este símbolo.

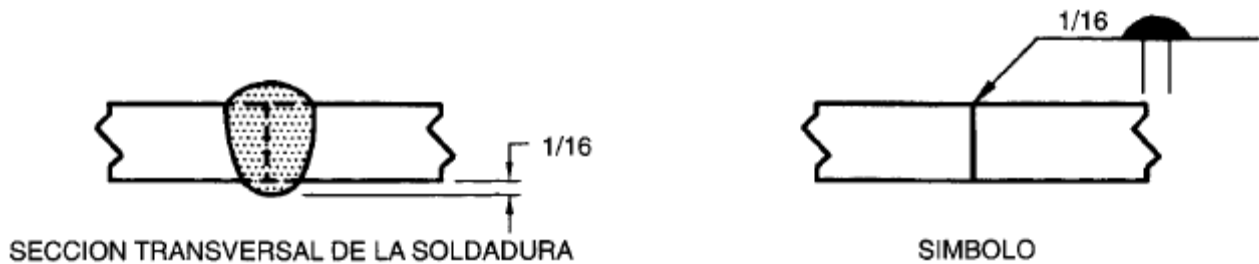


Figura 3.9 – Símbolo de Penetración Completa

Perfil o Contorno de la Soldadura y Métodos de acabado Superficial

Las soldaduras de ranura y el refuerzo de las soldaduras de penetración completa en los que se requiere un contorno a ras (a paño) o convexo sin que se use algún método de acabado (con excepción de la limpieza), se deben especificar añadiendo los símbolos de contorno a ras o convexo al símbolo correspondiente de soldadura.

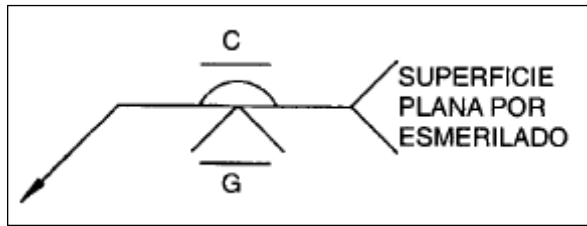
Si se requiere que tales contornos se obtengan mediante algún método mecánico, tan método debe especificarse con los símbolos de contorno y método de acabado correspondiente.

A continuación se indican los símbolos de acabado, mismos que se refieren al método empleado, no al grado de éste.

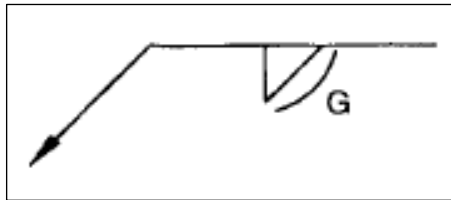
- C – Desbaste (Chipping)
- G – Esmerilado (Grinding)
- M – Maquinado (Machining)
- R – Laminado (Rolling)
- H – Martillado (Hammering)

Las soldaduras que requieren un acabado (aproximadamente a ras, convexo o cóncavo) a obtenerse mediante un método no especificado se indican añadiendo la letra “U” (unspecified) al símbolo de perfil.

Los símbolos de acabado y contorno también se aplican a las soldaduras de filete, pero para éstas también se puede emplear el símbolo de perfil cóncavo. La figura 3.10 ilustra el empleo de los símbolos de perfil y acabado.



Símbolo de perfil enrasado por medio de esmerilado por el lado de la flecha y desbaste por el otro lado de la flecha, en la soldadura de respaldo.



Símbolo de contorno convexo por medio de esmerilado en soldadura de filete.

Figura 3.10 – Uso de los Símbolos de Contorno y Acabado

Líneas de Referencia Múltiple

Para indicar la secuencia de operaciones se utilizan dos o más líneas de referencia. La primera operación se indica en la línea de referencia más cercana a la flecha, y las siguientes se especifican secuencialmente en otras líneas de referencia, como se indica en la figura 3.11.



Figura 3.11 – Símbolo de Soldar con Líneas de Referencia Múltiples

Otras Disposiciones

Están establecidas otras disposiciones sobre el uso de los símbolos tales como los usos de flechas múltiples, cambios de dirección de soldadura, combinación de varios tipos de soldadura en un solo símbolo de soldar y la combinación de estos con símbolos de ensayos no destructivos. Para conocer estas disposiciones, el lector tiene que remitirse a la norma AWS A2.4.

Soldaduras de Filete

Las dimensiones de las soldaduras de filete se indican en el mismo lado de la línea de referencia que el símbolo de soldadura (dependiendo de si la soldadura está del lado flecha o del otro lado).

El tamaño de las soldaduras de filete debe indicarse del lado izquierdo del símbolo, y si se requieren soldaduras por ambos lados de la junta, los símbolos de soldadura de filete a ambos lados de la línea de referencia deben tener especificados sus tamaños respectivos. El uso de los símbolos de soldadura de filete se indica en las figuras 3.12 y 3.13.

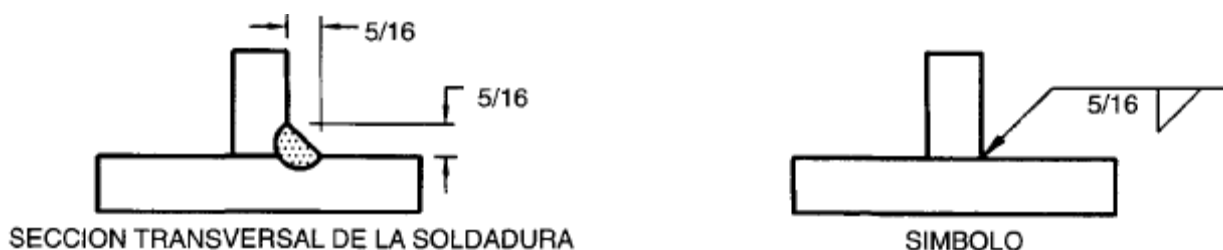


Figura 3.12 – Soldadura de Filete por Lado Flecha



Figura 3.13 – Soldadura de Filete por Ambos Lados

Tamaño de Soldaduras de Filete con Piernas Desiguales

La medida de una soldadura en filete con piernas desiguales se especifica a la izquierda del símbolo de soldadura. La orientación de la soldadura no queda especificada con el símbolo y tendrá que indicarse en el plano con claridad.

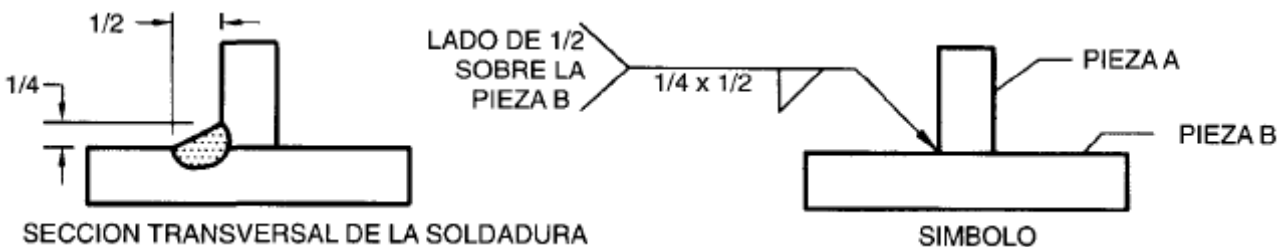


Figura 3.14 – Soldadura de Filete con Piernas Desiguales por el Otro Lado de la Flecha

Longitud Total y Longitud Especificada

Cuando las soldaduras de filete se extienden en la totalidad de la longitud de la junta, la longitud no necesita especificarse en el símbolo, pero si las soldaduras deben tener una longitud específica, ésta debe indicarse a la derecha del símbolo de soldadura y su extensión puede indicarse gráficamente en el dibujo mediante sombreado.

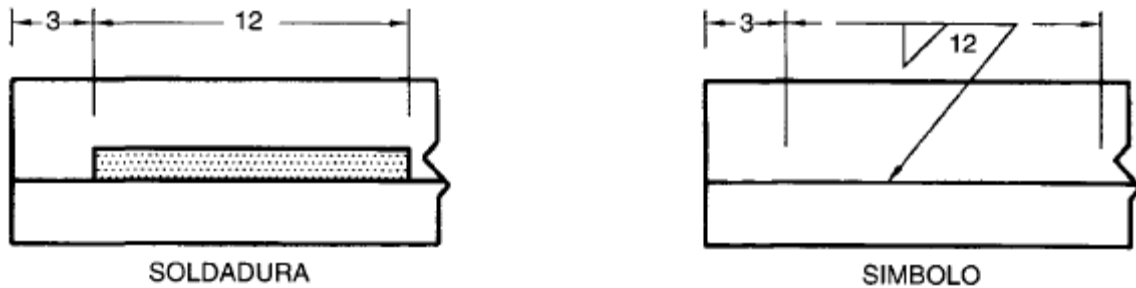


Figura 3.15 – Soldadura de Filete con Longitud Especificada

Soldaduras en Filete Intermitentes

Las soldaduras de filete intermitentes se especifican en el símbolo indicando la longitud de la soldadura (incremento) y el paso, ambos a la derecha del símbolo de soldadura. El paso es la distancia entre los centros de cada uno de los cordones parciales (incrementos).

Las soldaduras de filete intermitente pueden estar por un solo lado de la junta o en ambos lados, las soldaduras intermitentes pueden ser en cadena (si coinciden los centros de los incrementos en ambos lados de la junta) o alternados. Las figuras 3.16, 3.17 y 3.18 ilustran el uso de estos símbolos.

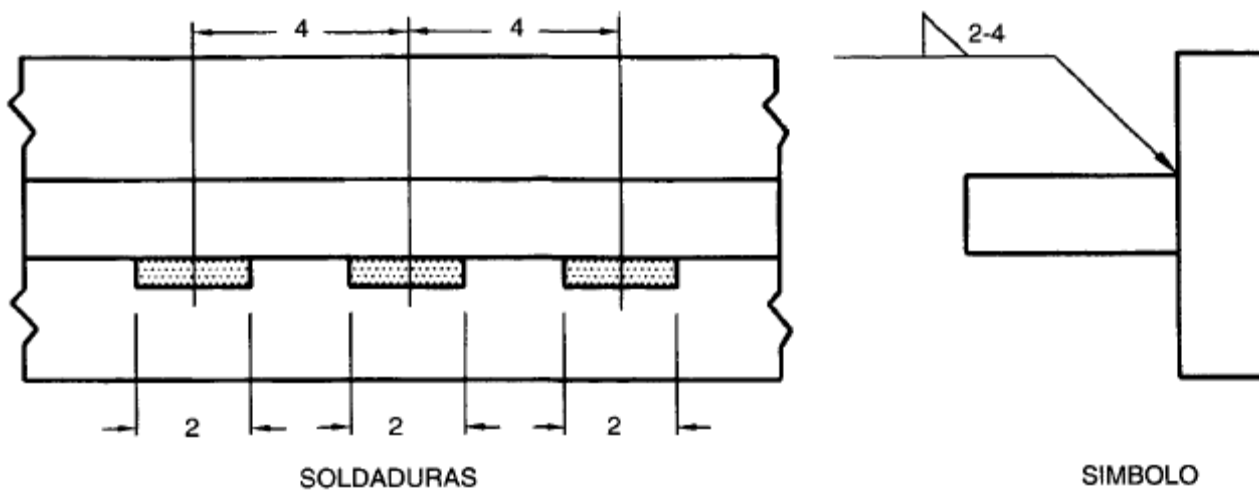


Figura 3.16 – Longitud y Paso de una Soldadura de Filete Intermitente

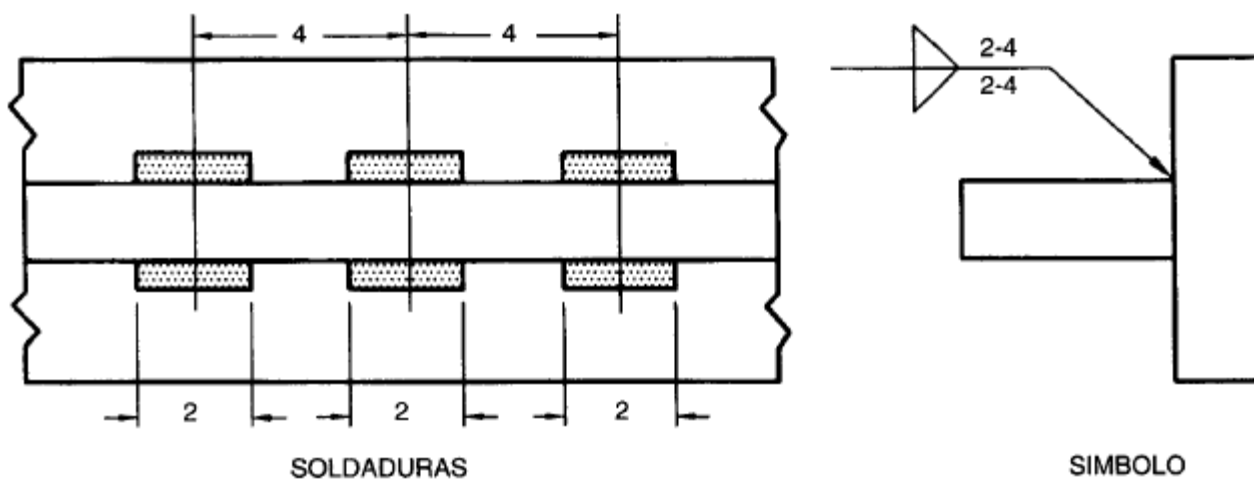


Figura 3.17 – Soldaduras de Filete Intermitentes en Cadena

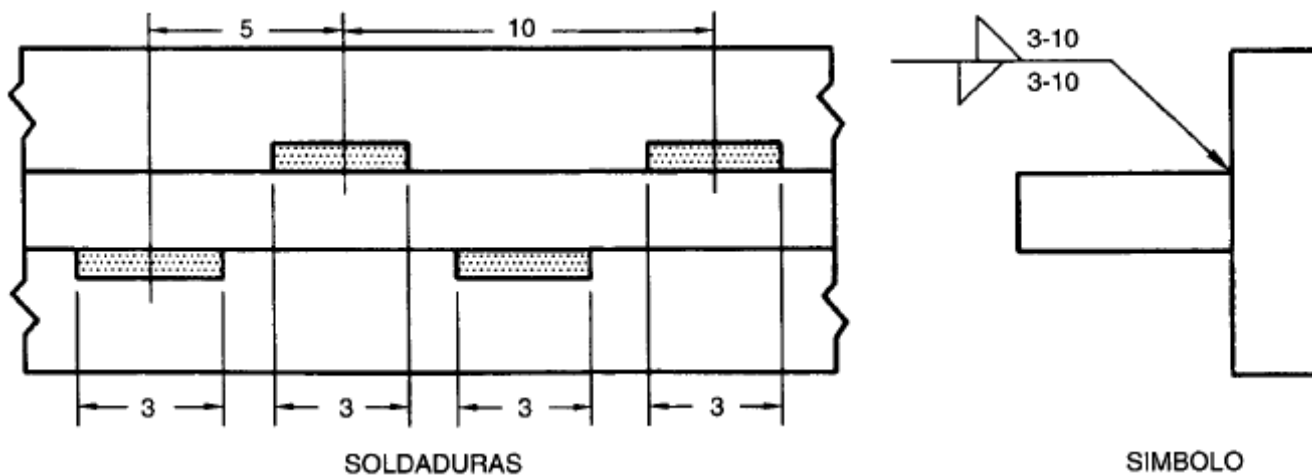


Figura 3.18 – Soldaduras de Filete Intermitentes Alternadas

Soldaduras de Ranura

Las dimensiones de la preparación de los bordes y de las soldaduras deben indicarse en el mismo lado de la línea de referencia que el símbolo de soldadura, según lo mostrado en la figura 3.19.

En la figura 3.19, las dimensiones están identificadas con letras que hacen referencia a los siguientes elementos:

- S: Se refiere a la profundidad de la preparación especificada. La dimensión correspondiente no se encierra entre paréntesis y se debe colocar del lado izquierdo del símbolo de soldadura.
- E: Indica el tamaño de la soldadura o garganta efectiva, se coloca después de la dimensión de la profundidad de la preparación y también del lado izquierdo del símbolo de soldadura. Siempre se encierra entre paréntesis.
- R: Abertura de Raíz.
- A: Ángulo de la Ranura.

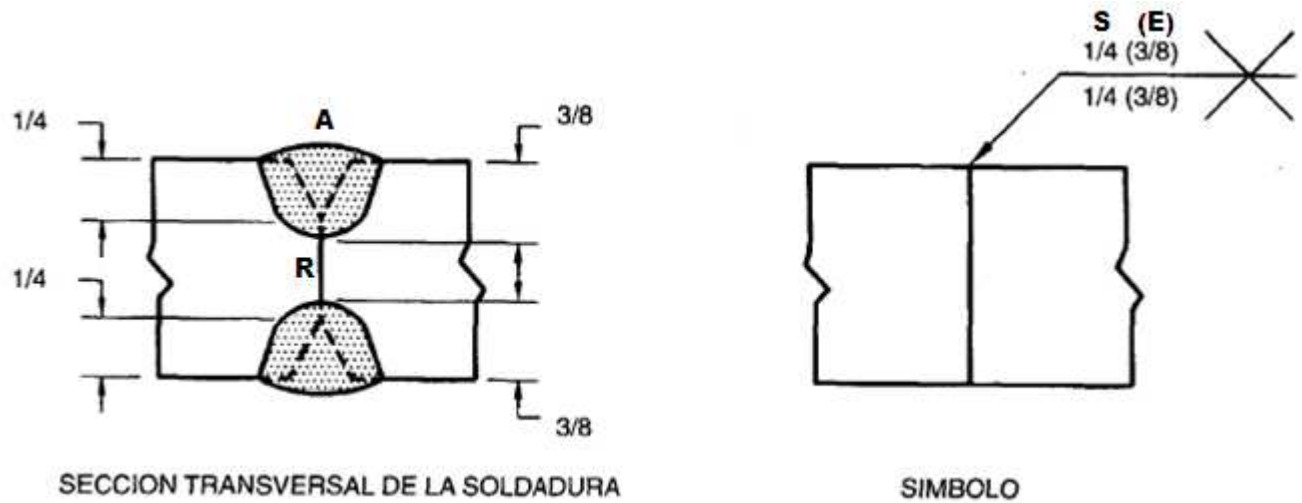


Figura 3.19 – Dimensiones en los Símbolos de Soldadura de Ranura

Cuando en el símbolo de soldar no se indican la profundidad de la preparación de la ranura ni la garganta efectiva para soldaduras de ranura sencillas y para soldaduras de ranura doble (soldadas por los dos lados) simétricas, se requiere penetración completa en la junta.

En el símbolo de soldar pueden emplearse diferentes combinaciones de profundidad de preparación (S) y garganta efectiva ϵ especificadas y no especificadas. Las reglas y aplicaciones de estas combinaciones están establecidas en las normas. Las figuras 3.20, 3.21, 3.22, 3.23 muestran algunos usos frecuentes de los símbolos para soldaduras de ranura.



Figura 3.20 – Designación de Garganta Efectiva sin Especificar Profundidad

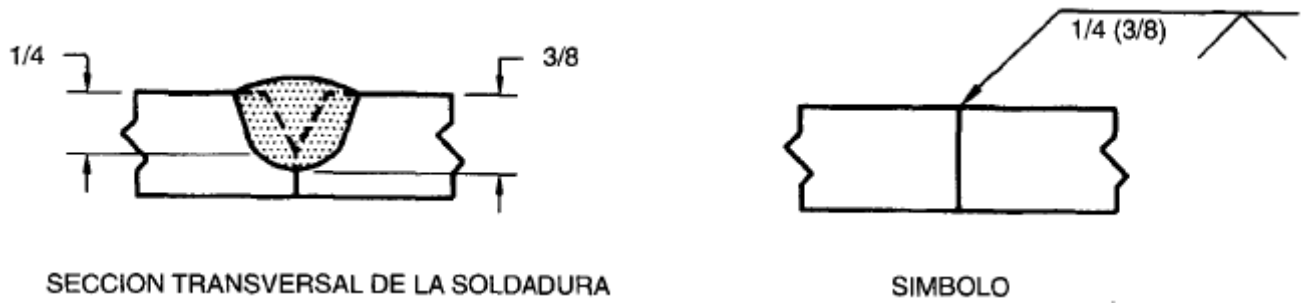


Figura 3.21 – Profundidad de Preparación “S” menor que la Garganta Efectiva (E)

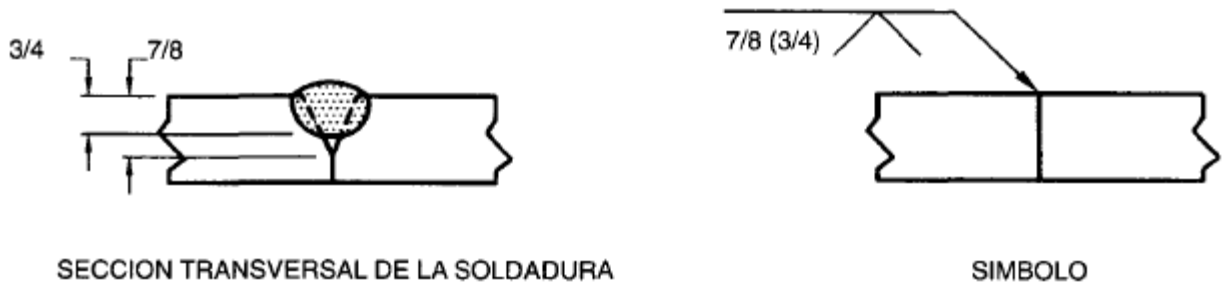


Figura 3.22 – Profundidad de Preparación “S” mayor que la Garganta Efectiva (E)

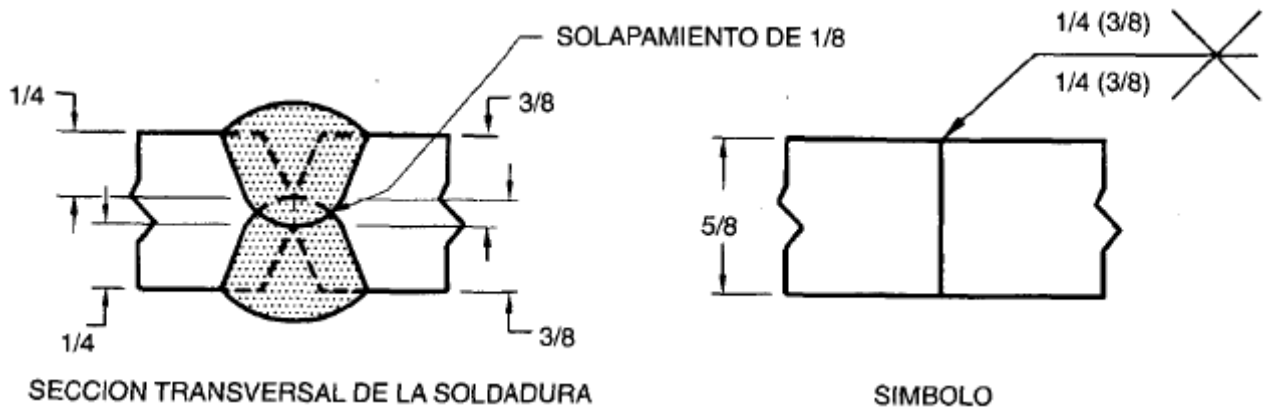


Figura 3.23 – Profundidad de las Preparaciones “S” menor que la Garganta Efectiva (E)

Símbolo para Exámenes No Destructivos (NDT-END)

L símbolo de examen consta de línea de referencia, flecha, designación de método de ensayo, extensión y número de los ensayos, símbolos suplementarios y cola (donde se indican especificaciones u otras referencias). El orden en que se sitúan estos elementos en el símbolo de ensayo se indican en la figura 3.24.

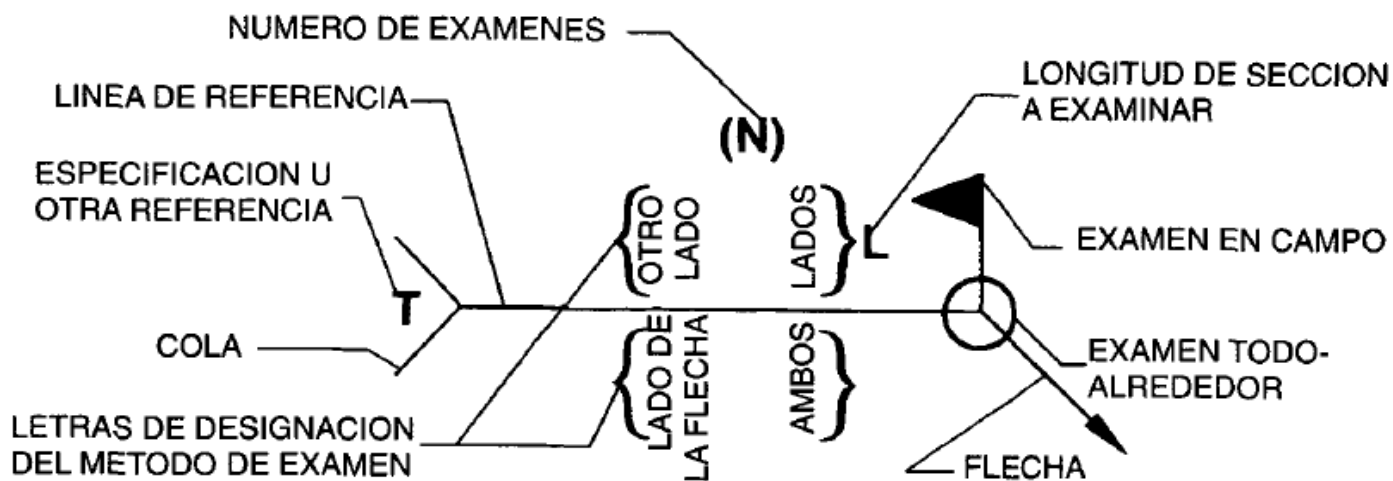


Figura 3.24 – Situación Normalizada de los Elementos del Símbolo de Ensayos No Destructivos

Designación del Método de Ensayo

Los métodos de ensayo no destructivo se especifican con la letra de designación que se indica a continuación, según la ASNT (American Society for Nondestructive Testing):

AET	=	Emisión acústica
ET	=	Electromagnético ó Corrientes parásitas (corrientes Eddy)
LT	=	Fuga (Leak Testing)
PT	=	Líquidos Penetrantes
MT	=	Partículas magnéticas
PRT	=	Comprobación (Proof)
NRT	=	Radiografía por Neutrones
RT	=	Radiografía
TIR	=	Termografía Infrarroja
UT	=	Ultrasonido
VT	=	Visual

Símbolos Suplementarios

Los símbolos suplementarios aplicables a los ensayos no destructivos se ilustran en la figura 3.25.

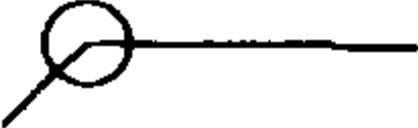


ENSAYO A TODO ALREDEDOR	ENSAYO EN TERRENO	DIRECCIÓN DE LA RADIACIÓN
		

Figura 3.25 – Ubicación Normalizada de los Elementos del Símbolo de Ensayo No Destructivo (NDT-END)

Consideraciones Generales

De manera similar ala que se emplea para los símbolos de soldadura, la flecha conecta la línea de referencia con la pieza a ser examinada. El lado a cual señala la flecha se considera el lado de la flecha de la pieza y, en el símbolo de ensayo, corresponde a la parte inferior de la línea de referencia; el lado opuesto al de la flecha en la pieza se considera el otro lado, y en el símbolo, corresponde a la parte superior de a línea de referencia.

Las figuras 3.26 y 3.27 ilustran el empleo de ensayos por el otro lado dela flecha y por el lado opuesto.

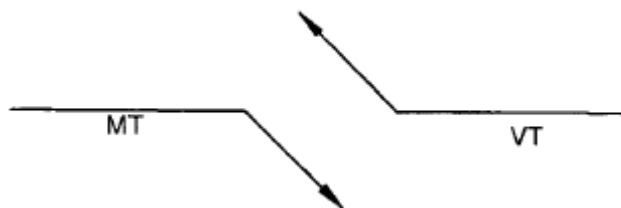


Figura 3.26 – Aplicación del Símbolo de Ensayo No Destructivo a Aplicar por el Lado Opuesto a la Flecha



Figura 3.27 – Aplicación del Símbolo de Ensayo No Destructivo a Aplicar por el Lado Opuesto a la Flecha

Símbolo en Ambos Lados

Los ensayos a efectuar sobre ambos lados de la pieza se deben indicarse situando las letras de designación para el método de ensayo especificado en ambos lados de la línea de referencia, ver figura 3.28.

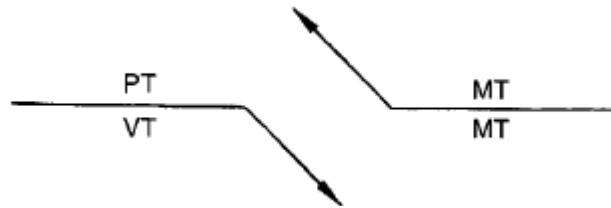
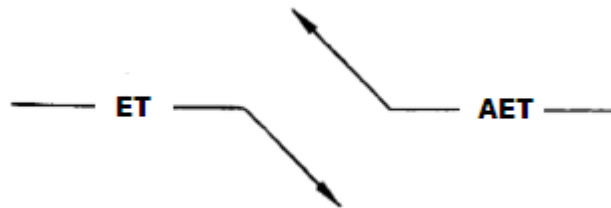


Figura 3.28 – Símbolos en Ambos Lados

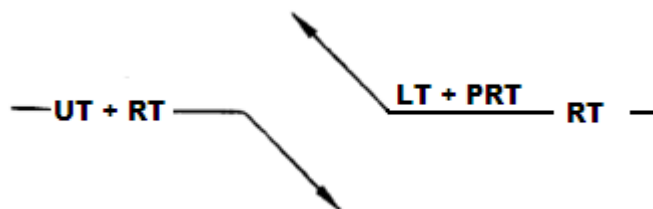
Símbolos centrados en la línea de referencia

Cuando los símbolos de examen no tienen significados del lado, fecha u otro lado, o no hay preferencia por la cual se va a efectuar el examen, los símbolos deben estar centrados en línea de referencia.



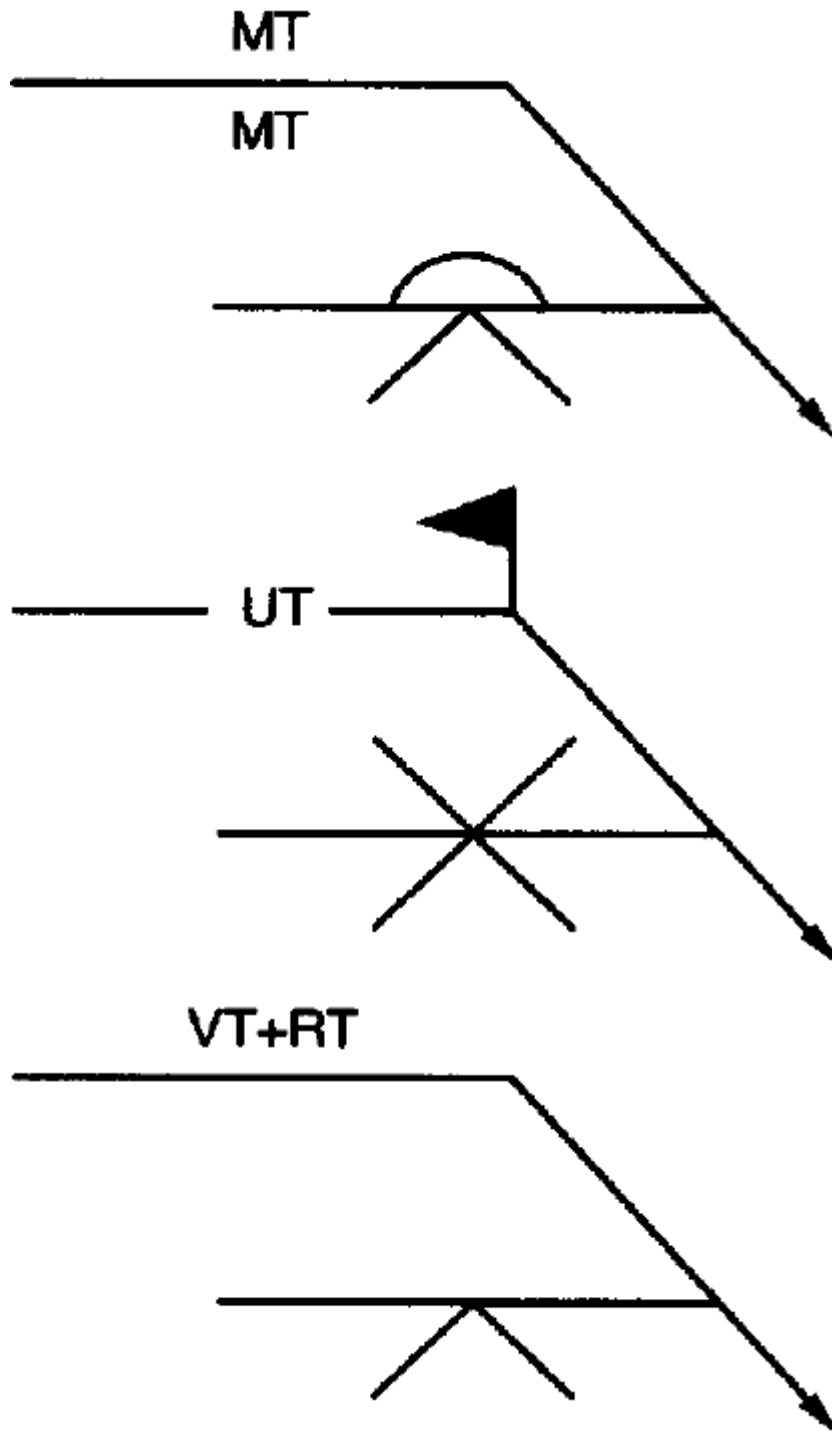
Combinaciones de exámenes

Para la misma pieza puede especificarse más de un método de examen, situando los símbolos combinados de los métodos de examen especificados en las posiciones apropiadas de la línea de referencia. Los símbolos para dos o más métodos de examen situados en el mismo lado o centradas en la misma línea de referencia, Se deben separar con un signo “mas”.



Combinación de símbolos de exámenes no destructivos y de soldar

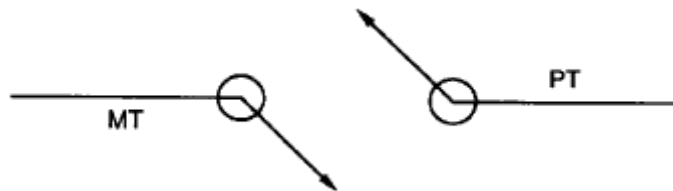
Los símbolos de exámenes no destructivos y los símbolos de soldar pueden combinarse.



Símbolos suplementarios

Examen todo alrededor

Los exámenes a aplicarse todo alrededor de una soldadura, unión o parte se especifican situando el símbolo de examen todo alrededor en la intersección de la flecha con la línea de referencia.



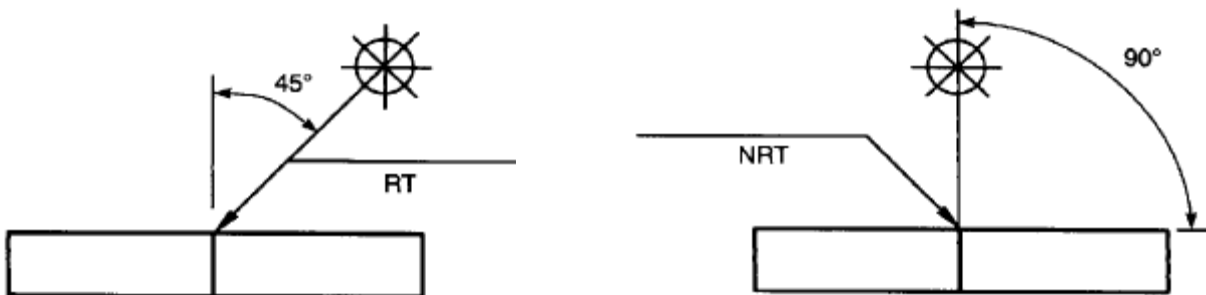
Examen en campo

Los exámenes a efectuarse en campo (no en el lugar de construcción inicial) se deben indicar situando el símbolo de examen en campo en la intersección de la flecha con las líneas de referencia.



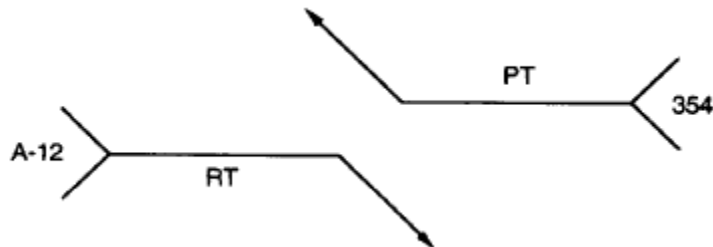
Dirección de la radiación

La dirección de la radiación penetrante puede especificarse, para asegurar su correcta interpretación, utilizando el símbolo de dirección de la radiación dibujando en el plano con el ángulo requerido, indicado en grados.



Especificaciones, códigos y referencias

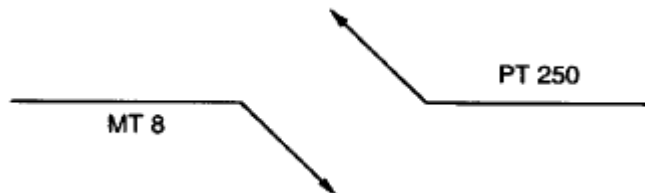
La información aplicable a los exámenes especificados que no sea práctico especificar de otra forma, puede indicarse en la cola del símbolo de examen.



Extensión y localización de los exámenes no destructivos

Longitud de la sección a examinar

Para especificar el examen de soldaduras o piezas donde solo la longitud de una sección necesita ser examinada. La dimensión de la longitud se debe situar a la derecha del símbolo de examen básico, en el mismo sistema de unidades que el estándar empleado en los dibujos correspondientes.



Examen de la longitud total

Cuando la longitud total de una pieza vaya a ser exámenes, no es necesario incluir la dimensión de la longitud en el símbolo de examen no destructivo.

Examen parcial

Cuando se requiere que solo un porcentaje de la longitud total de una soldadura o pieza sea examinada, con localizaciones a ser determinadas mediante un procedimiento específico, la longitud a examinarse se indica con el porcentaje apropiado, a la derecha de símbolo de examen.



Numero de exámenes

El número de exámenes a efectuarse aleatoriamente en una soldadura o pieza se especifica entre paréntesis, por encima o por debajo de los símbolos de examen, hacia fuera de la línea de referencia.



Capítulo 04

METALURGIA DE LA SOLDADURA

Contenidos:

DESCRIPCIÓN

PÁGINA

Introducción
Conceptos metalúrgicos básicos
Aleaciones
Difusión
Propiedades de los metales y las aleaciones
Metalurgia básica de los aceros
Clasificación de los aceros
Tratamientos térmicos del acero
Metalurgia de la soldadura
Transformaciones del acero durante la soldadura
Soldabilidad y carbono equivalente
Control de las propiedades de las juntas soldadas
Agrietamiento por hidrógeno
Soldadura de aceros inoxidables

Introducción

Las operaciones de la soldadura involucran muchos fenómenos metalúrgicos, tales como fusión, solidificación, difusión y transformaciones de fases en el estado sólido, entre otros.

Estos fenómenos influyen en las propiedades de las uniones soldadas, y si no son controlados, causan una serie de problemas –grietas, resistencia a la tensión o al impacto menores a las especificadas, resistencia a la corrosión inferior a la izquierda, etc.-, que pueden ser evitados o resueltos si se comprenden o aplican correctamente los principios metalúrgicos asociados con las prácticas y operaciones de soldadura, principios que el inspector necesita conocer para realizar su trabajo de manera efectiva.

La metalúrgica puede ser definida como la ciencia, tecnología y arte de trabajar los metales, desde su obtención a partir de los minerales hasta la fabricación de los productos finales.

El campo de estudio de la metalúrgica es muy amplio y tiene deferentes áreas de especialización, tales como la metalurgia física, la química, y la mecánica, o metalurgia extractiva y adaptativa, según clasificaciones anteriores.

Por su parte, la metalurgia de la soldadura no se puede considerar como una parte de la metalurgia general ni, por ejemplo, de la metalurgia física, sino como el área completa de estudio de la metalurgia, pero desde el punto de vista especializado de los fenómenos asociados específicamente con las operaciones, procesos y prácticas de la soldadura.

Como puede apreciarse después de leer los párrafos anteriores, el campo de la metalurgia de la soldadura es muy amplio, pero existen algunos principios que resultan claves para comprender los fenómenos que ocurren durante las operaciones de soldadura, principios que son útiles para controlar los cambios asociados con tales fenómenos y obtener uniones soldadas con las propiedades y calidad especificadas. Estos principios son tratados en el presente capítulo.

Conceptos Metalúrgicos Básicos

Las propiedades de los metales y sus aleaciones dependen de sus estructuras metalúrgicas o metalográficas (mismas que pueden examinarse por medio del microscopio óptico) y de aspectos submicroscópicos, tales como los patrones geométricos en que los átomos están dispuestos en los metales, por lo que el estudio de la metalurgia empieza necesariamente con la descripción de estos patrones.

Estructura Cristalina

La materia ordinaria existe en tres estados de agregación: gas, líquido, y sólido. La diferencia entre estos estados radica principalmente en la movilidad de los átomos, la separación entre ellos y el orden(o desorden) con que se encuentran disueltos en cada uno de los casos.

Mientras en el gas existe una gran movilidad de los átomos que interactúan con un desorden casi completo y la separación entre ellos es relativamente grande, en el estado sólido de los átomos están dispuestos de manera ordenada formando cristales, la distancia entre ellos es más reducida (con respecto a los otros estados) y su movilidad es muy limitada.

El estado líquido puede considerarse esencialmente como una estructura indeterminada, ya que no posee orden del estado sólido ni la separación relativamente grande y movilidad de los átomos que caracteriza al estado gaseoso.

Existen sustancias como el vidrio y el asfalto cuya rigidez corresponde a la de un sólido, Pero sus átomos no están dispuestos ordenadamente, por lo que no son considerados verdaderos sólidos, se les considera como líquidos sobrenfriados de muy elevada viscosidad en los que a la temperatura de solidificación de equilibrio, sus átomos tiene una modalidad muy limitada y no pueden desplazarse ordenadamente para formar cristales. Estas sustancias se denominan “amorfas”, Por otra parte, la densidad de los líquidos y la separación promedios entre sus átomos son muy cercanas a los de las sólidas. La diferencia principal entre los otros estados y el sólido consiste en que, en este ultimo, los átomos están dispuestos ordenadamente según modelos geométricos tridimensionales bien definidos. A esta configuración se le llama estructura cristalina.

Las estructuras cristalinas de los metales se describen en términos de un concepto geométricos idealizado llamado red especial.

Las redes especiales pueden ser visualizadas como un gran conjunto de puntos ordenados en el espacio, de tal manera que cada uno de ellos presenta una posición idéntica con respecto de los otros colocados a su alrededor. Si cada uno de estos puntos fuera unido con líneas imaginarias a los puntos más cercanos, se obtendría una configuración geométrica, la de un cubo por ejemplo, que repetiría definitivamente en todas la direcciones.

La red quedaría definitiva por el modelo geométrico individual formato al unir con líneas la cantidad mínima de los puntos mas cercanos entre si. Este modelo geométrico individual recibe el nombre de celda unitaria. En la siguiente figura se ilustra la red especial más simple, la cúbica.

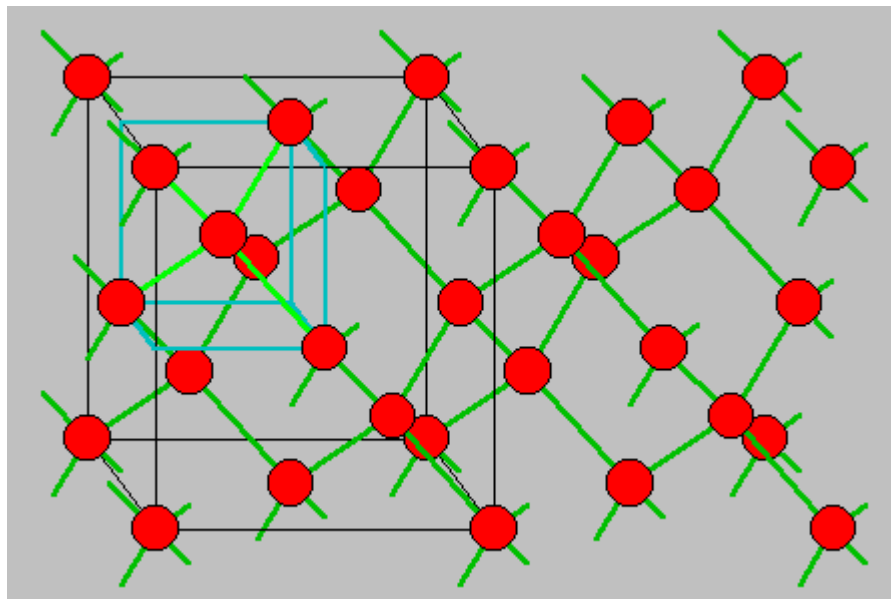


Figura 4.1 - Red Espacial Cúbica Simple en la que se indica una celda unitaria con trazo más grueso.

Las posiciones que guardan los átomos en las estructuras cristalinas de los sólidos siguen uno de los modelos geométricos de una red espacial, en la que un átomo o grupo de átomos ocupan las posiciones indicadas por los puntos de la red.

Aunque existe un número ilimitado de estructuras cristalinas posibles y 14 redes especiales simples, las estructuras cristalinas mas comúnmente encontradas en los metales son: la cúbica centrada en el cuerpo, la cúbica centrada En

las caras y la hexagonal compacta las siguientes figuras se muestra los esquemas de las redes especiales y las posiciones de los átomos (representados con esferas) en las estructuras cristalinas mencionadas.

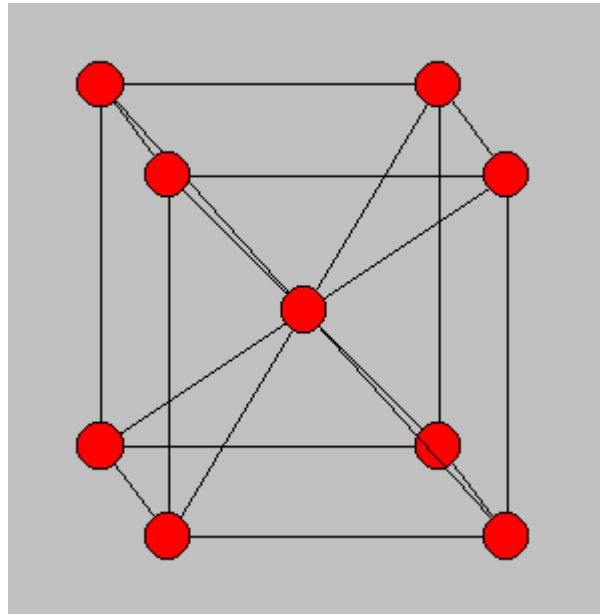


Figura 4.2 - Estructura Cristalina Cúbica Centrada en el Cuerpo (BCC)

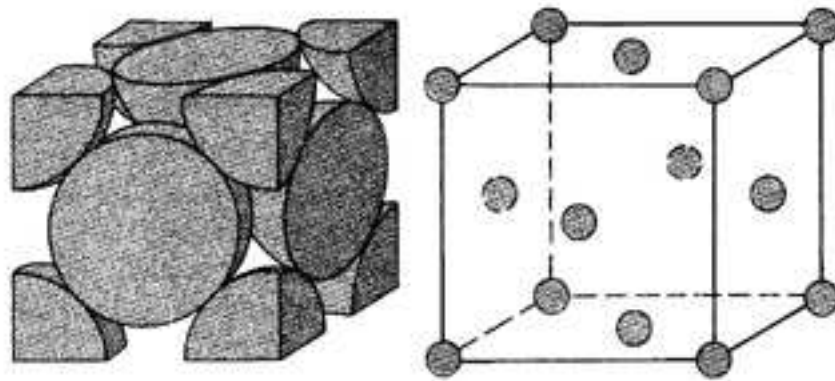


Figura 4.3 - Estructura Cristalina Cúbica Centrada en las Caras (FCC)

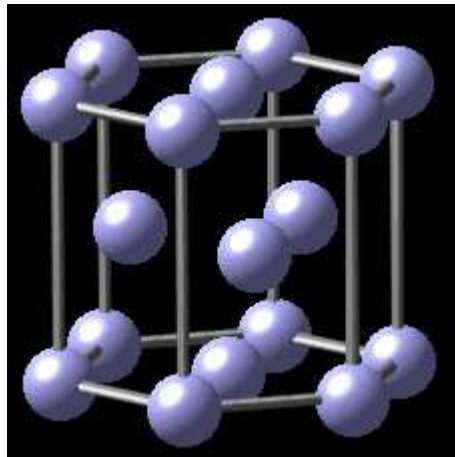


Figura 4.4 Estructura Cristalina Hexagonal Compacta.

Ya que en muchas propiedades de los metales están determinadas por la estructura cristalina, es conveniente hacer algunas consideraciones adicionales acerca de esta.

Primera: las estructuras cristalinas perfectamente regulares antes descritas son cristales ideales, muy útiles para comprender como están dispuestos los átomos, Pero las piezas metálicas están compuestas por cristales reales mas o menos perfectos que presentan imperfecciones o discontinuidades tales como vacancias, átomos intersticiales, defectos de Frenkel, átomos de impureza y dislocaciones. En las siguientes figuras se representan estas discontinuidades.

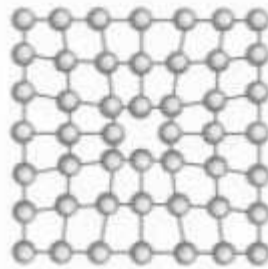


Figura 4.5 - Vacancia (Falta de un átomo en la red)

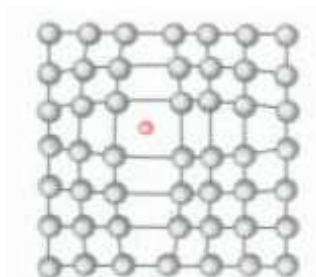


Figura 4.6 - Átomo Intersticial (exceso de un átomo en la red)

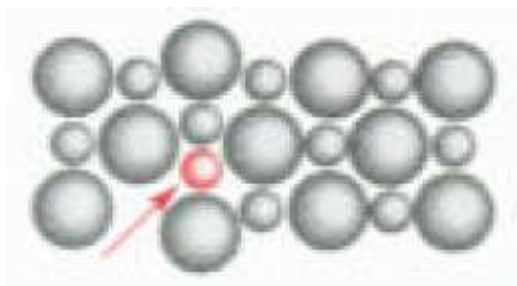


Figura 4.7 - Defecto de Frenkel (vacancia y átomo intersticial)

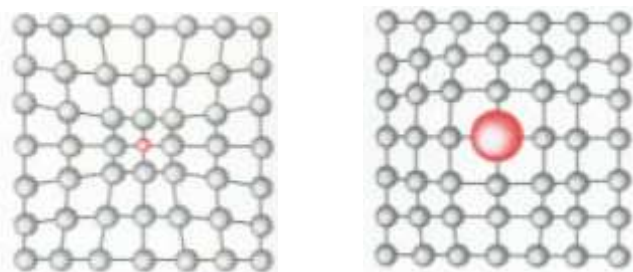


Figura 4.8 - Átomo de Impureza que Distorsiona la Perfección de la Red

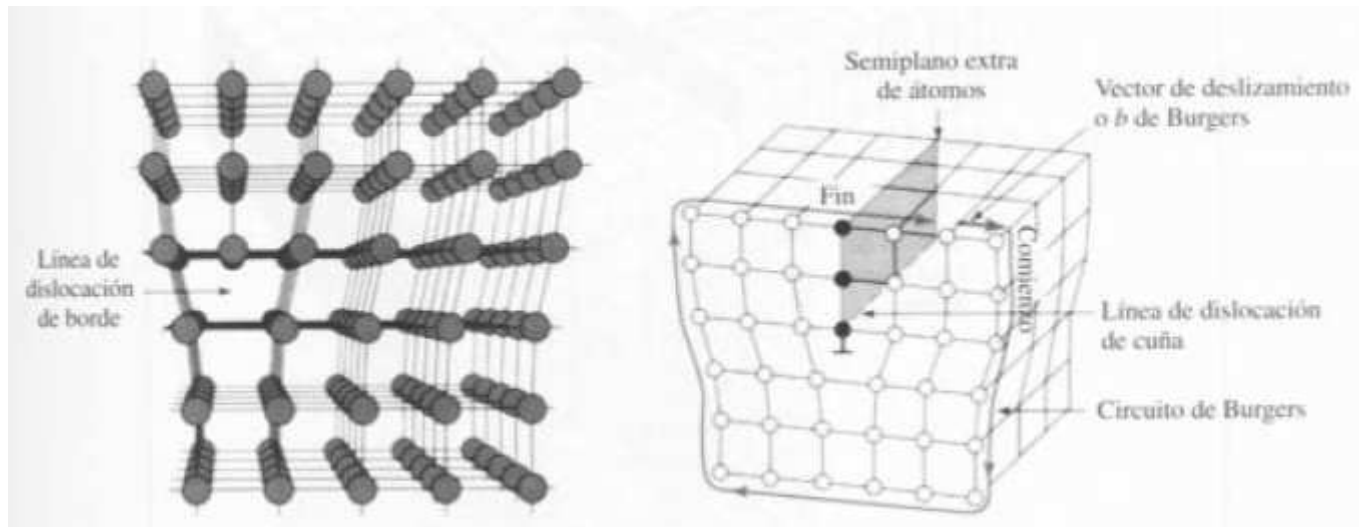


Figura 4.9 - Dislocación de Borde

Segunda: Los metales en estado sólido están compuestos por conjuntos de granos. Estos, a su vez, están contruidos por átomos agrupados formando "cristales individuales" –celdas unitarias– (cúbicos centrados en el cuerpo, por ejemplo) que tiene la misma orientación y se repiten indefinidamente en todas direcciones –la red especial–. La diferencia existe en un grano y otro es la orientación que presentan las agrupaciones de los cristales individuales. Los granos están "unidos" unos con otros formando una forma de transición (agrupación de átomos en forma irregular) llamada límite de grano. De acuerdo con esto, se puede considerar que los metales son materiales policristalinos, esto es, están contruidos de un número infinito de granos de diferente tamaño.

Para tener una idea más cercana de la naturaleza policristalina de los metales, considérese que un grano de hierro de tamaño típico (0.25 mm) contiene unos 10^{18} átomos.

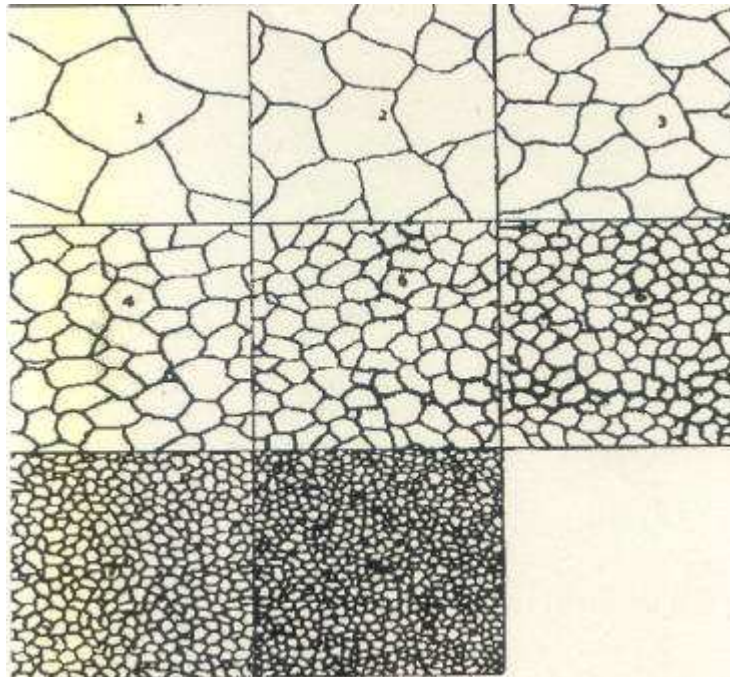


Figura 4.10 - Grados y Límites de Grano

Tercera: Las piezas metálicas de uso comercial no están fabricadas con metales puros, sino con mezclas de metales y elementos no metálicos. Estas mezclas de metales y elementos no metálicos. Estas mezclas reciben el nombre de aleaciones. Los elementos de aleación presentes en un metal puro ocasionan imperfecciones (discontinuidades) en las estructuras cristalinas.

Aleaciones

Debido a que los metales puros presentan propiedades mecánicas pobres, rara vez tienen aplicaciones industriales, Pero se ha desarrollado una gama muy amplia de aleaciones con propiedades específicas adecuadas para aplicaciones industriales particulares.

En términos generales, las aleaciones son mezclas de un metal base (presente en mayor proporción) con otro u otros elementos, metálicos o no metálicos. Mismos que influyen en las propiedades de los metales (sobre la dureza o la resistencia a la corrosión por ejemplo). El metal base (matriz o solvente) de las aleaciones puede formar mezclas mecánicas y mezclas homogéneas (soluciones) en el estado sólido con los elementos de aleación.

Las soluciones sólidas pueden ser dos tipos: sustitucionales e intersticiales. En las de primer tipo, los átomos de aleante ocupan las posiciones "normales" de los átomos de la matriz en la red cristalina. En las intersticiales, los átomos del aleante se alojan en algún "hueco" o intersticio entre los átomos de la matriz. Las figuras 4.11 y 4.12 representan los dos tipos solución.

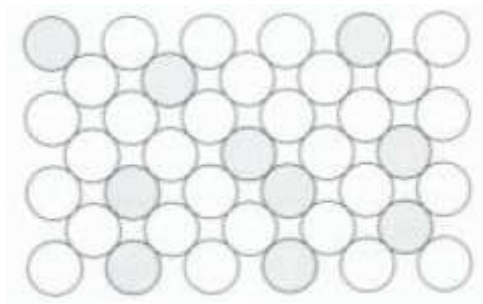


Figura 4.11 - Solución Sólida Sustitucional

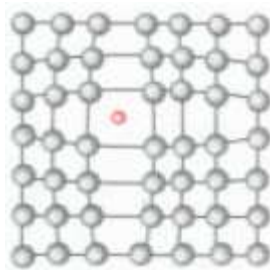


Figura 4.12 - Solución Sólida Intersticial

Ejemplos de soluciones sustitucionales son las aleaciones cobre-níquel y de solución intersticial es el sistema fiero-carbono.

El tipo de solución sólida y el grado de solubilidad dependen de algunos factores. Para que dos metales sean solubles entre si en todas las proporciones, deben satisfacer las siguientes condiciones, conocidas como reglas de Hume-Rothery, algunas de las cuales se mencionan a continuación:

- La diferencia en el tamaño aparente de sus átomos no debe ser mayor de 15%.
- Deben tener igual electronegatividad o una diferencia no apreciable en esta.
- Deben tener la misma valencia.

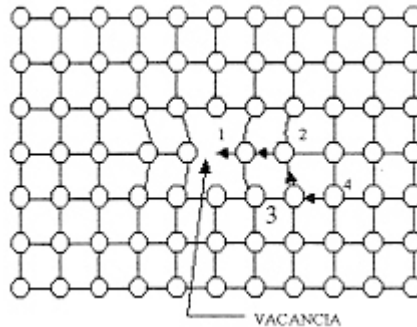
Dos metales que satisfagan estas condiciones (como el oro y la plata) formaran una solución sólida sustitucional en todas las proporciones. Si no se cumplen estas condiciones, la solubilidad solo será parcial.

Si la diferencia entre los tamaños aparentes de los átomos es mayor al 15%, las soluciones sólidas formadas serán intersticiales y la solubilidad estará muy restringida.

En los sistemas de solubilidad parcial, esta decrece al disminuir la temperatura. Las aleaciones de dos metales solubles en todas las proporciones en el estado sólido son mezclas homogéneas, es decir, presentan la misma composición y la misma estructura. Sin embargo, la mayor parte de las aleaciones industriales son de solubilidad restringida, en las que además de soluciones sólidas, están presentes porciones variables de material que difieren en composición química o estructura cristalina (o ambas a la vez) con respecto de la solución sólida. A estas porciones diferentes entre si se les denomina fases.

Difusión

En el estado sólido existe movimiento de los átomos, “saltando” de una posición de la red cristalina a otra posición de la red cristalina a otra posición cercana. A este movimiento de los átomos en el estado sólido se le denomina difusión.



Átomo 1 se desplazara a un lugar vacante, el átomo 2 ocupara el lugar que ocupaba el átomo 1 y así sucesivamente

Figura 4.13 desplazamiento por difusión de los átomos hacia lugares vacantes.

Los saltos de los átomos durante la difusión pueden ser de su posición original hacia la posición vacante en la red, sustituyendo a otro átomo en su posición en la red, o bien, alojándose intersticialmente.

Los factores que afectan a la difusión son: la temperatura (a temperatura ambiente la difusión se lleva a cabo muy lentamente), la concentración del soluto o aleante, la presencia de impurezas y el tamaño de grano.

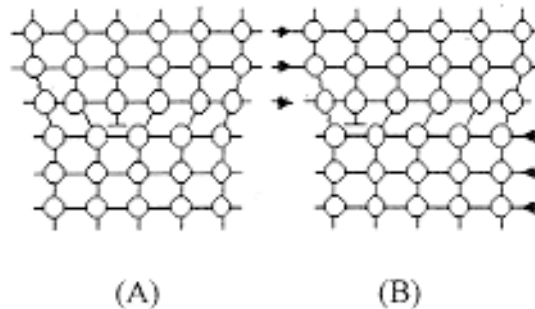
Propiedades de los metales y las aleaciones

La utilidad y la aplicación adecuada de los metales y aleaciones para fines específicos se mide y describe en función de sus propiedades, tales como resistencia a la oxidación y la corrosión y comportamiento a temperaturas muy altas o muy bajas. Las intrínsecas de los materiales de los materiales (resistencia mecánica, ductilidad, conductividad térmica, y eléctrica, etc.). Están determinadas por su configuración electrónica, la unión de tipo metálico de sus átomos y su estructura cristalina, pero para los fines prácticos de las aplicaciones industriales y de ingeniería de los metales, son otros los aspectos que hay que considerar para entender el comportamiento de las aleaciones comerciales.

Factores que determinan las propiedades de las aleaciones

Como se explicó anteriormente, las estructuras cristalinas de los metales no son perfectas, y las discontinuidades presentes en estas (vacancias, átomos de impureza e intersticiales, y principalmente las dislocaciones) tienen una gran influencia en el comportamiento de las aleaciones. La resistencia mecánica real de los metales ordinarios es mucho menor a la resistencia que en teoría debían tener de acuerdo con su estructura cristalina y su enlace mecánico. La causa de este radica en la existencia muy extendida de las dislocaciones en los cristales.

En la siguiente figura se muestra como se produce una deformación permanente en una red cuando una fuerza tiende a cizallar un cristal.



(A) dislocación de borde de una estructura cristalina y

(B) desplazamiento de la dislocación por un espacio de la red, debido a la acción de una fuerza cizallante

Figura 4.14 - Deslizamiento de una dislocación de borde.

El plano de átomos situado encima de la dislocación se desliza sobre el plano atómico inferior, restableciendo con los enlaces esta nueva distribución atómica es similar a la anterior y pueden ocurrir otros desplazamientos. Para producir esta deformación es necesaria una fuerza de solo aproximadamente una milésima parte de la que se requiere para producir el mismo desplazamiento en una estructura cristalina perfecta (eso es, sin dislocación)

De acuerdo con lo anterior, la deformación plástica de los metales ocurre principalmente por el deslizamiento de los planos cristalinos en la vecindad de las dislocaciones, que a su vez también se desplazan. Durante la deformación de los metales, las dislocaciones tienden a desplazarse hacia las superficies de las piezas o hacia los límites de grano, que son "zonas de alta concentración de defectos" en la red.

Después de considerar lo anterior, es evidente que las propiedades de las aleaciones dependen en su gran medida del tipo de imperfecciones existentes en la red. A continuación se indican los cinco mecanismos mediante los cuales se pueden producir modificaciones en las propiedades de las aleaciones.

a) Endurecimiento por deformación plástica o trabajo en frío.

Un metal puro sin deformaciones previas es "blando", es decir se puede deformar con relativa facilidad debido al deslizamiento de los planos cristalinos a través de las dislocaciones. El endurecimiento de los metales se produce cuando el deslizamiento se dificulta debido al complejo sistema de dislocaciones creado por deformaciones sucesivas. Durante la deformación plástica en frío, cada grano individual cambia de forma para que pueda ocurrir la deformación total de la pieza y los granos se alargan en el sentido de la deformación, y como resultado, el metal se hace más resistente, y es más difícil seguir deformándolo. El endurecimiento máximo posible de los metales puros se obtiene solo mediante deformaciones en frío.

b) Endurecimiento por aleación

Los elementos de aleación en las soluciones sólidas siempre provocan el endurecimiento del metal aleado. Si los átomos de aleante se distribuyen al azar no representan gran obstáculo para el deslizamiento de las dislocaciones,

pero estos átomos tienden a alojarse alrededor de las dislocaciones, dificultando el deslizamiento de manera que la fuerza necesaria para producir las deformaciones aumenta considerablemente. La figura 4.15 muestra como los átomos de aleante ubicados cerca de una dislocación obstaculizan los deslizamientos.

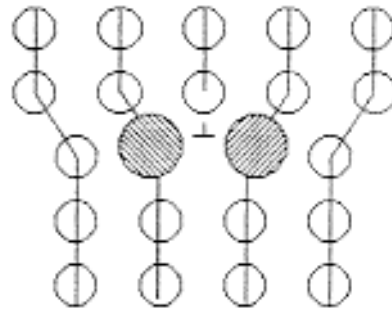


Figura 4.15 átomos aleante en posiciones cercanas a una dislocación.

C) Estructura de solidificación del grano.

La solidificación de los metales de soldadura (y en algunas piezas coladas) ocurre muy rápido y crea un patrón de segregación dentro de cada grano, por lo que la micro-estructura resultante consiste en dendritas finas en una red rica en soluto. Este tipo de estructura impide la deformación plástica bajo cargas de tensión.

D) Transformaciones de fase en el estado sólido

El endurecimiento de las aleaciones puede provocarse al transformar las fases originalmente presente en fases nuevas con propiedades diferentes. Estas reacciones de transformación se llevan a cabo por medio de procesos de calentamiento y enfriamientos a temperaturas adecuadas llamadas tratamientos térmicos. Las propiedades de las aleaciones dependen de las propiedades de las fases que la componen y de la forma en que dichas fases están relacionadas entre sí, Es decir, de la micro estructura que forman. Los tratamientos térmicos también producen cambios en las micro-estructuras.

E) Endurecimiento por precipitación (envejecimiento)

Este mecanismo es aplicable a algunos mecanismos es aplicable a algunos aceros y aleaciones no ferrosas constituidas por dos fases. Consiste en calentar la aleación a la temperatura adecuada para disolver una fase en la otra y enfriarla rápidamente, de manera que la fase disuelta no tenga tiempo de transformarse y la aleación resultante consista en una sola fase homogénea relativamente suave. Después se procede a volver a calentar la aleación a temperaturas específicas y la fase disuelta forma un precipitado fino dentro los granos de la otra fase, que suelta significativamente más resistente. Las propiedades mecánicas de las aleaciones envejecidas dependen de la temperatura y el tiempo de envejecimiento, Pero tratamientos a temperaturas excesivas o tiempos a la temperatura de envejecido no permiten el desarrollo de la resistencia y la dureza máximas posibles.

Metalurgia básica de los aceros

Los aceros son aleaciones de base de hierro en las que el principal elemento de aleación es el carbono (hasta un 20% en peso como límite teórico). Los aceros son las aleaciones de mayor aplicación industrial y las más usadas en fabricación de componentes, equipos y estructuras soldadas.

Para comprender el comportamiento de las uniones soldadas de acero durante su ejecución y su vida en servicio, es necesario entender algunos fundamentos de la metalurgia básica de los aceros, mismos que se examinarán brevemente en esta sección.

Los aceros poseen dos características fundamentales que provocan que en ellos pueda existir una amplia gama de propiedades y comportamientos posibles:

- Hierro y la mayor parte de sus aleaciones, al ser calentadas y enfriadas a determinadas temperaturas, sufren cambios de estructura cristalina y micro-estructura. Estas transformaciones son las causas por las que los aceros pueden ser tratados térmicamente y obtener en ellos una gran variedad de propiedades. Los cambios en el contenido de los elementos de aleación presentes en los aceros causan grandes cambios en las propiedades físicas, químicas y mecánicas

Transformaciones alotrópicas del hierro puro.

La propiedad de un elemento químico para presentar más de una estructura cristalina es conocida como polimorfismo o alotropía (si el cambio de estructura es reversible), y el cambio de la estructura cristalina se denomina transformación alotrópica, El hierro posee esta propiedad.

Las transformaciones alotrópicas que ocurren en el hierro puro dependen de la temperatura de que éste se encuentre. Las transformaciones se ilustran en la curva de enfriamiento mostrada en la figura 4.16 y se describen a continuación:

Temperatura ambiente hasta 910°C, el hierro puro presenta una estructura cristalina cúbica centrada en el cuerpo llamada hierro α (alfa) o ferrita hasta 767°C es ferromagnético, y de 767°C hasta 910°C es paramagnético.

De 910 a 1400°C, la estructura del hierro es cúbica centrada en las caras y es llamada austenita o hierro γ (gama), misma que es paramagnética.

Arriba de los 1400°C y hasta 1537°C, (temperatura de fusión) la estructura es nuevamente cúbica centrada en el cuerpo y es llamada hierro o ferrita (δ).

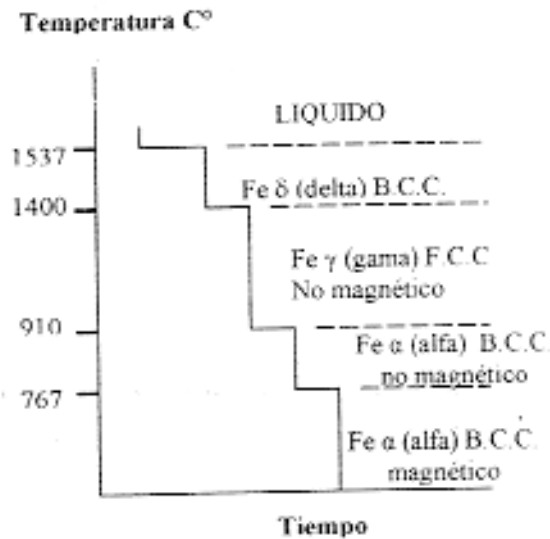


Figura 4.16 - Transformaciones alotrópicas del hierro puro

El hierro fundido, al enfriarse cambia de la fase líquida a la sólida. Los mecanismos de los cambios de fase son dos: nucleación (formación de partículas pequeñas de fase nueva) y crecimiento (aumento de tamaño de los núcleos). De manera simplificada, se puede decir que una vez que se forma un núcleo de la fase nueva (sólida, en el caso de la solidificación) a partir de un cristal individual (celda unitaria), el crecimiento de tal fase tiene lugar al ir cristalizando más átomos alrededor del primer cristal. Dependiendo de la composición química y la velocidad de solidificación, el modo de crecimiento puede ser dendrítico o celular. En ambos modos hay segregación de elementos de aleación (de soluto).

El patrón de crecimiento de los cristales de muchos materiales es similar a la forma de un pino, por lo que se aplica el término dendrítico (ramificado) a tal patrón.

Como en las aleaciones comerciales comunes la solidificación no se inicia en un solo núcleo, sino en un número muy grande de estos, al ir creciendo los diferentes cristales y aproximarse unos a otros, en las zonas intermedias entre los cristales, la solidificación ocurre en los planos de cada cristal, si no en forma "desordenada" dando lugar a los límites de grano, que son regiones altamente distorsionadas (con imperfecciones en la estructura cristalina). En forma y el tamaño del grano y en consecuencia, la proporción de los límites de grano, tiene una gran influencia sobre las propiedades de los metales.

Las figuras 4.17 y 4.18 ilustran el patrón de crecimiento dendrítico.

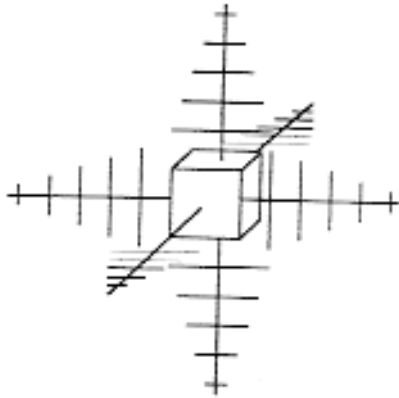


Figura 4.17 - Crecimiento dendrítico de un cristal cúbico

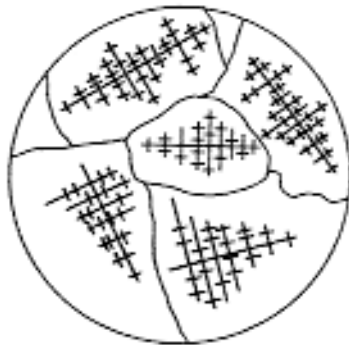


Figura 4.18 - Patrón de crecimiento dendrítico en los granos

Transformaciones de fase de los aceros

Las transformaciones antes de descritas son aplicables al hierro puro, pero no a los aceros, que contiene además del carbono, diversos elementos de aleación; dependiendo del contenido de éstos, las temperaturas y los productos de las transformaciones son diferentes a los ya indicados. Estas transformaciones son descritas mediante el diagrama fe-c y los diagramas de transformaciones isotérmicas y de enfriamiento continuo.

Diagrama Fierro-Carbono

El diagrama FE-C de la figura 4.19 indica las transformaciones en equilibrio que sufren los aceros al carbono. Aunque en sentido estricto no se trata de un verdadero diagrama de equilibrio (ya que esto implicaría que no hay cambios de fase con el tiempo) y el carburo de hierro no es completamente estable, la frase “transformaciones en equilibrio” se requiere a aquellos cambios que ocurren, desde un punto de vista práctico, en equilibrio, y tal diagrama

representa solamente los cambios y las fases de equilibrio (ferrita δ , austenita, ferrita, cementita y perlita), mismas que están presentes cuando el enfriamiento ocurre con "suficiente lentitud".

Como puede apreciarse en tal diagrama, los átomos de hierro, al solidificar, cristalizan primero como hierro δ (o hierro γ dependiendo del contenido del carbono) al conseguir el enfriamiento, se tendrá una estructura completa de austenita (hierro γ), cuyas transformaciones sucesivas, al continuar el enfriamiento, son de gran importancia.

La austenita puede mantener en solución sólida hasta un 2.00% de carbono. Existen temperaturas abajo de las cuales la austenita ya no es estable y tiende a descomponerse en fases que sí lo son. Estas fases son la ferrita (que no pueden tener en solución más de 0.02% de carbono) y la cementita (que es un compuesto intermetálico con 6.67% de carbono, cuya estructura cristalina es ortorrómbica). Si el enfriamiento de la austenita es suficientemente lento, de manera que se permita la difusión del carbono hacia regiones localizadas de la aleación, provocando que en algunas zonas la concentración de este elemento sea baja y se forme ferritas (que puede disolver hasta 0.02%), y en otras, que la concentración sea alta y se forme cementita (que contiene 6.67% c) o perlita, que es una mezcla de ferrita y cementita.

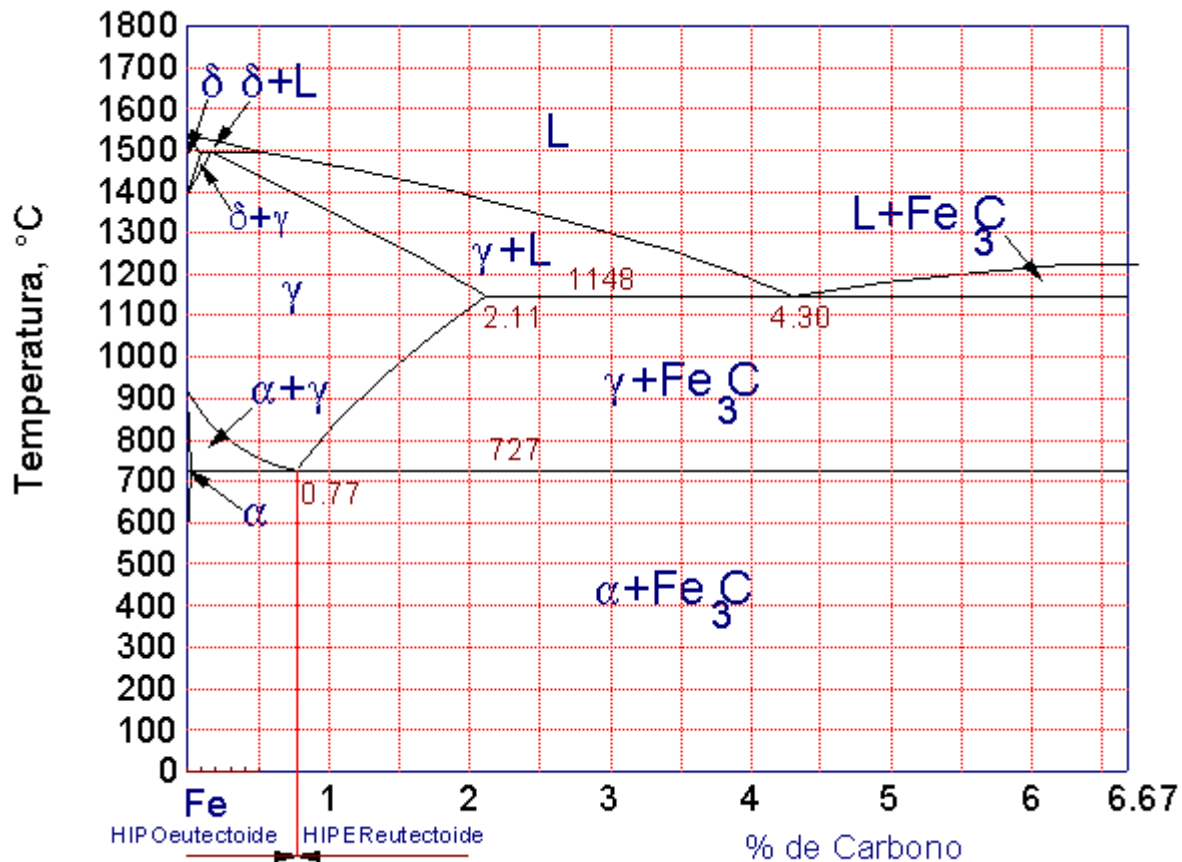


Figura 4.19 - Diagrama de equilibrio hierro-carbono

En el diagrama FE-C también están indicados los aspectos tales como la solubilidad del carbono en cada forma alotrópica del hierro y las temperaturas adecuadas para los diferentes tratamientos térmicos.

Este diagrama está caracterizado por tres puntos invariantes: un punto peritético (a 1493°C y 0.17%C), un punto eutectoide (a 723°C y 0.8%C) y un punto eutéctico (a 1147°C y 4.3%C).

De estos puntos, el que resulta de interés para la soldadura de los aceros es el eutectoide, en el cual, la estructura completamente austenítica se transforma (en condiciones de equilibrio) en la estructura 100% perlítica. Si el acero contiene menos del 0.8%C (aceros hipoeutectoides) la estructura contendrá, además de perlita, también ferrita libre, y si contiene más de 0.8%C (aceros hipereutectoides), la estructura contendrá cementita libre además de perlita.

Por su parte, la transformación peritética ocurre a temperaturas muy elevadas y en aceros de concentración de carbono muy baja. Esta transformación tiene solamente efectos secundarios sobre la estructura de los aceros a temperatura ambiente.

Los aceros de todas las composiciones (contenidos de carbono) que al solidificar pasan por la región de la transformación peritética, entran en el campo de la estructura cúbica centrada en las caras de la fase simple. Excepto por los efectos de la segregación dendrítica causada por las complejidades de esta transformación, estas aleaciones son equivalentes a composiciones de mayor contenido de carbono (0.51%) que solidifican directamente en fase cúbica centrada en las caras. Si durante el enfriamiento se permite el tiempo suficiente para que se produzca una solución homogénea, se pueden menospreciar los efectos de esta transformación.

Transformaciones fuera de equilibrio

Si el enfriamiento de la austenita hasta temperaturas cercanas a la ambiente es tan rápido que el carbono no puede difundir (como sucede en el tratamiento térmico simple), los productos de las transformaciones no estarán en equilibrio (son metaestables) y el diagrama FE-C no es útil para el estudio de los aceros enfriados en estas condiciones.

Una fase resultante del enfriamiento rápido de la austenita es la martensita, que tiene una estructura tetragonal centrada en el cuerpo (una estructura intermedia entre la cúbica centrada en las caras y la cúbica centrada en el cuerpo), con átomos de carbono en solución intersticial sobresaturada. Esta estructura es metaestable, muy dura y frágil. La austenita también puede transformarse en bainita (agregado de ferrita y carburo, con apariencia plumosa o acicular) si es enfriada y mantenida durante un lapso a temperatura constante, (entre unos 210°C a 510°C aproximadamente).

Las transformaciones que ocurren fuera de equilibrio son descritas de una manera práctica por los tipos de diagrama que se describen brevemente a continuación.

Diagramas de transformación isotérmica(T-I)

Los diagramas de transformaciones isotérmicas, transformaciones-temperaturas tiempo o TTT, describen gráficamente el tiempo y la velocidad de reacción de la transformación de austenita en perlita, bainita o martensita, así como las temperaturas a las cuales ocurren tales transformaciones.

En la figura 4.20 se muestra un diagrama TTT para el acero al carbono con 0.80% c.

Para tener una idea sobre la utilidad de este diagrama, considérese la temperatura de 700°C.

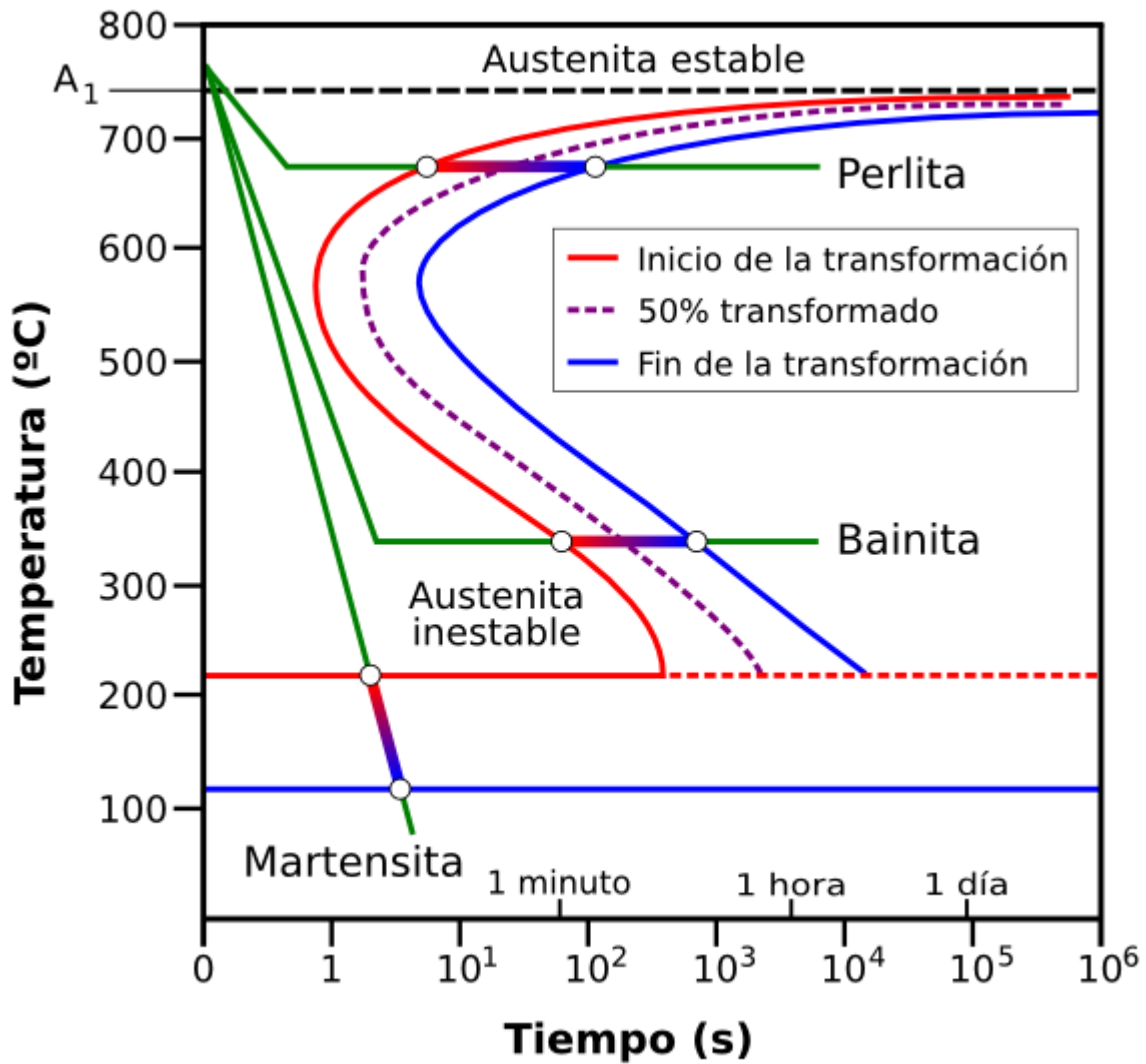


Figura 4.20 - Diagrama TTT de un acero Eutectoide

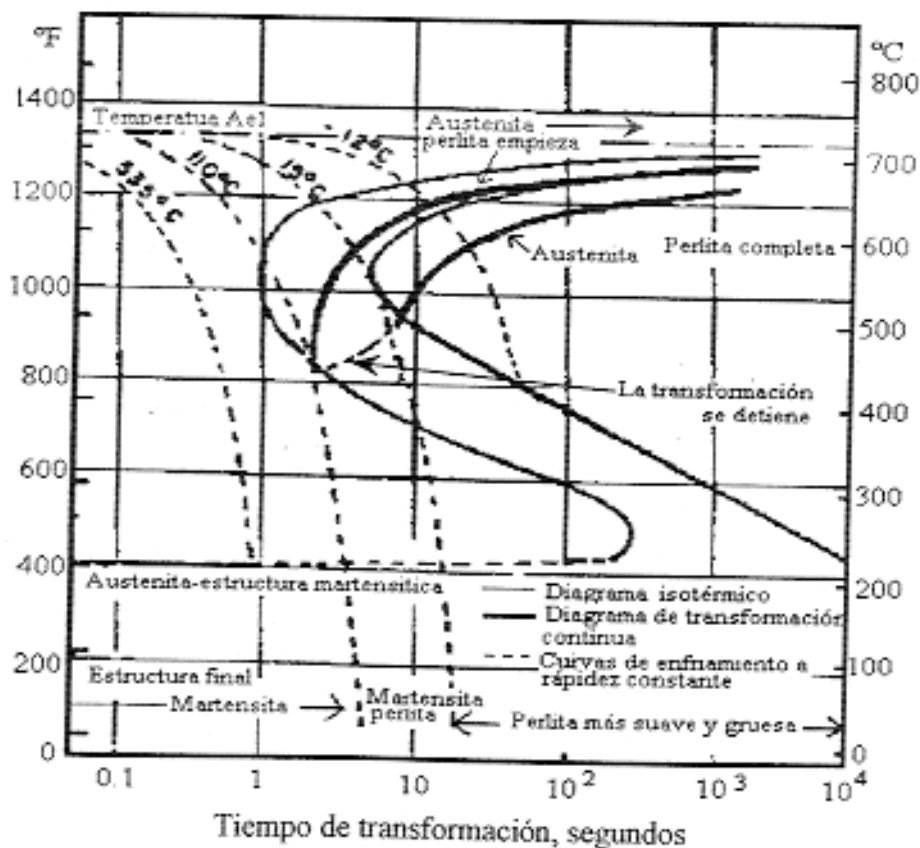


Figura 4.21 - Diagrama CCT(derivado de un diagrama TTT) para un acero autectoide

Puede observarse que la transformación se inicia a 480 segundos (8 minutos), y finaliza después de 7200 segundos (2 horas) y el producto es perlita gruesa. A 540°C (la nariz de la curva) la reacción empieza después de un segundo y continua hasta terminar en aproximadamente siete segundos, y el producto es perlita fina.

A temperaturas inferiores a la de la nariz, los productos de transformación cambian de perlita a bainita y martensita.

Es importante señalar que para cada acero térmicamente tratable, se han desarrollado diagramas TTT y que estos no deben usarse intercambiabilmente.

Diagramas de transformación durante enfriamiento continuo

Si bien los diagramas TTT son útiles para entender la transformación isotérmica de la austenita, en la mayoría de los tratamientos térmicos, y durante la soldadura, la austenita, en la mayoría de los tratamientos térmicos, y durante la soldadura, la austenita se transforma durante el enfriamiento hasta temperatura ambiente. Las curvas útiles para describir esta condición son los diagramas de transformación en enfriamiento continuo (continuous cooling transformation-CCT) o curvas T-E (transformación-enfriamiento)

Los diagramas CCT son similares a los TTT, pero difieren en que son los primeros, el inicio de la transformación tarda en ocurrir un tiempo mayor que el predicho por el diagrama TTT, y ésta ocurre a temperaturas inferiores. En la figura 4.21 se muestra un diagrama CCT.

Micro-estructura y metalografía.

La metalografía estudia la estructura microscópica y macroscópica de los metales y aleaciones. La mayor parte de los estudios metalográficos que se realizan son los microscópicos. Con estos se puede determinar las características tales como el tamaño de un grano, La forma y distribución de las fases presentes y las inclusiones no-metálicas. La micro-estructura revela el tratamiento térmico y mecánico a que se ha sido sometido del metal y, a partir de ésta, se puede predecir con precisión razonable el comportamiento esperado de las aleaciones estudiadas.

Las muestras a estudiar se seleccionan adecuadamente de manera que sean representativas de las partes a examinar, se desbastan y pulen a espejo y se atacan químicamente o electrolíticamente con los reactivos adecuados para revelar la estructura y luego se procede a su examen microscópico.

Las figuras 4.21, 4.22, 4.23, y 4.24 muestran las microestructuras que más comúnmente se encuentran en los aceros.

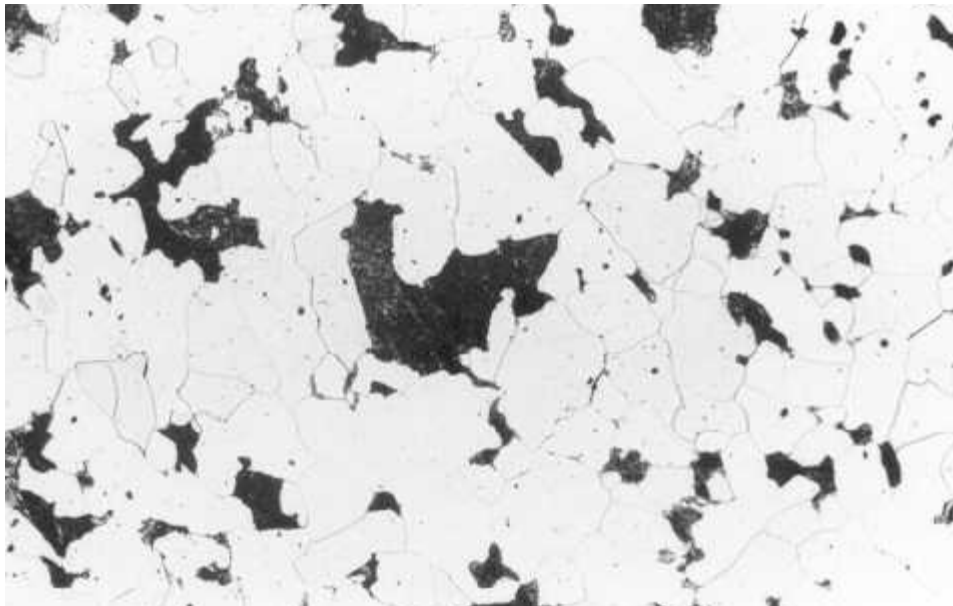


Figura 4.21 - Estructura Ferrítica, ataque: nital al 2%. 100X

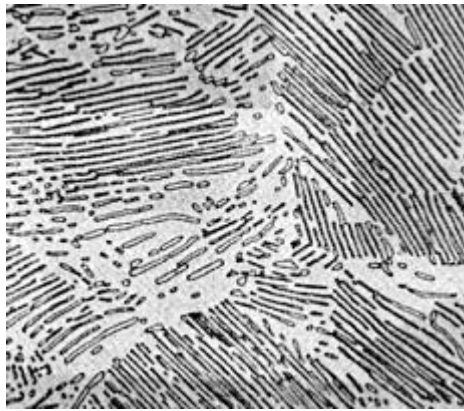


Figura 4.22-perlita laminar. Ataque: Picral al 4%1500X



Figura 4.23 - Martensita sin revenir. Ataque: Picral 2%, 400X

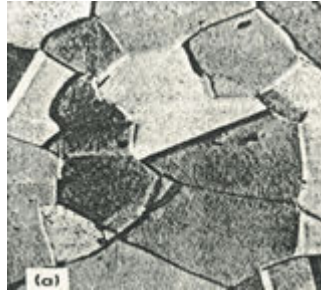


Figura 4.24-Estructura Austenítica. Ataque: Ácido oxálico, 500X

Efectos de los elementos de aleación en los aceros

Los elementos de aleación influyen de manera específica sobre las propiedades de los metales y sobre su comportamiento en procesos tales como tratamiento térmico y soldadura. La influencia de los elementos más comunes en los aceros.

Carbono

Presente hasta en un 2% (límite teórico); puede estar como solución sólida o combinado (formando carburos). Aumenta la resistencia mecánica y la respuesta a los tratamientos térmicos (capacidad de endurecimiento por temple o templabilidad) y disminuye la soldabilidad. Con diferentes contenidos de carbono se pueden obtener una gama muy amplia de propiedades mecánicas en los aceros. Algunos de estos efectos están implícitos en el diagrama FE-C.

Manganeso

Elemento soluble en el hierro, Mejora las propiedades mecánicas, aumenta la templabilidad del acero y disminuye los efectos dañinos producidos por el azufre, ya que tiene más afinidad por este elemento que el hierro y forma sulfuro de manganeso (MnS), compuesto que tiene solubilidad limitada en el hierro fundido, de manera que tiende a flotar y puede ser removido como escoria.

Compartido con el hierro, también tiene más afinidad por el oxígeno y el carbono por lo que forma óxido de manganeso y, si está presente en cantidades mayores a las requeridas para combinarse con el azufre presente, se combinará con el carbono del acero para formar carburo de manganeso.

Azufre y Selenio

Generalmente presente como impureza; debido a que forma una aleación eutéctica de bajo punto de fusión (sulfato de hierro, FeS), es indeseable para las operaciones de soldadura. En contenidos mayores de 0.05% causa fragilización en caliente y reduce la soldabilidad. Se adiciona como aleante en los aceros de maquinado rápido (Free cutting steels o aceros resulturados) de la serie AISI 11XX.

El selenio tiene un efecto en el acero casi idéntico al del azufre y ambos elementos podrían ser usados de manera intercambiable.

Fósforo

Generalmente presente como impureza. Es indeseable en las operaciones de soldadura en contenidos mayores al 0.04% causa fragilización en frío; se adiciona como elemento de aleación en los aceros de maquinado rápido (refosforados) de la serie 12XX.

Silicio

Se emplea como desoxidante en los aceros, ya que en forma de dióxido de silicio (SiO_2) que es insoluble en el metal fundido (y también sólido) y flota en la superficie del mismo y escapa hacia la escoria(o queda atrapado como inclusión), disuelve en el hierro y aumenta la resistencia mecánica y la tenacidad.

Cromo

Totalmente soluble en el hierro fundido y sólido y tiende a retener la fase ferrita. En aceros de media aleación (hasta de un 9%) aumenta la resistencia a la corrosión, la templabilidad y la resistencia mecánica a altas temperaturas, también reduce la soldabilidad. En contenidos mayores al 11% aumenta la resistencia a la corrosión en tal grado que forma la familia de los aceros inoxidable.

Molibdeno

Generalmente está presente en contenidos no mayores al 1% en los aceros de media y baja aleación. Aumenta la templabilidad y la resistencia mecánica a altas temperaturas, mejora la tenacidad y la resistencia a la corrosión, afina el grano y disminuye la soldabilidad.

Níquel

En los aceros de baja aleación aumenta la resistencia mecánica, la tenacidad, la ductilidad y la templabilidad y disminuye la soldabilidad. En los aceros inoxidable (con contenidos mayores al 11%Cr) se adiciona de un 8 a un 35%, ya que en contenidos mayores al 7%, retiene la fase austenita a temperatura ambiente, formando los aceros inoxidable austeníticos.

Aluminio

Se emplea como desoxidante, afina el grano y mejora la tenacidad; también es un elemento formador de ferrita.

Columbio y Titanio

Tienen afinidad por el carbono, oxígeno y nitrógeno y actúan como formadores de ferrita.

Tungsteno

Es un formador de ferrita, tiene una fuerte tendencia a formar carburos e incrementa la templabilidad.

Vanadio

Es formador de ferrita, tiene una tendencia fuerte a formar carburos e incrementa la templabilidad y reduce el crecimiento de grano austenítico durante el calentamiento.

Cobalto

Es un formador débil de austenita, tiene menos afinidad por el oxígeno y menor tendencia a formar carburos que el hierro y disminuye la templabilidad.

Clasificación de los aceros

De manera genérica y debido a la abundancia del hierro en la naturaleza, y que a las aleaciones de hierro son más usadas en la industria, los metales y sus aleaciones se clasifican en ferrosos y no ferrosos.

Las aleaciones ferrosas y en particular los aceros, se clasifican en base a algunas características comunes y existen muchos sistemas de clasificación, mismos que difieren entre autor y otro y entre una fuente y otra, por lo que se sugiere al lector considerar con ciertas reservas las clasificaciones y los límites respectivos de elementos de alineación que se establecen a continuación, pero que resultan útiles para propósitos prácticos.

Las principales clasificaciones se hacen en base a la composición química, a los métodos de acabado (aceros laminados en frío y caliente) y en base a la forma del producto (barras, placas, tubos, perfiles estructurales). A continuación se presenta una clasificación general de las aleaciones de hierro:

-Arrabio (pig iron)

-Hierros colados, entre los que se pueden citar el hierro colado gris, el blanco, el moldeado, el maleable, el nodular o dúctil y los hierros colados aleados.

-Hierro dulce

-Hierro forjado

-Hierro sinterizados por metalurgia en polvos.

-Aceros al carbono

-Aceros aleados

-Aceros para herramienta.

Los aceros son aleaciones de hierro y carbono (y otros elementos de aleación e impurezas) en las que el contenido de carbono varía entre 0.005 y 2.00% como límite teórico, Aunque en la práctica rara vez producen aceros con más de 1.00% c.

Aceros al carbono

Acero al carbono es un nombre incorrecto aplicado a los aceros cuyo principal elemento de aleación es el carbono. Este nombre sobrevive debido al uso popular; el nombre adecuado es acero simple, ya que por definición, acero es una aleación de hierro y carbono.

Los aceros simples, en base a su contenido de carbono pueden clasificarse de la siguiente forma:

Nombre Común	%C	Usos Típicos
Hierro Descaburrizado en Rollo	0,005 máx.	Lamina esmaltada y lamina no envejecida para embutido
Lingote de Hierro Armco	0,03 máx.	Lamina galvanizada, esmaltada y para embutido profundo
Acero de Bajo Carbono	0,15 máx.	Chasis y rines de automóviles, electrodos para soldadura
Acero Suave ó Dulce	0,15 – 0,35	Barras y perfiles estructurales
Acero de Medio Carbono	0,35 – 0,55	Herramientas y partes para máquinas
Acero de Alto Carbono	0,55 – 1,0	Rieles de ferrocarril, dados y resortes

Tabla 4.1 - Aceros Simples (al carbono)

Aceros aleados

Son aquellos en los que el límite especificado de elementos de aleación excede de 1,65%Mn, 0,60%Si ó 0,60%Cu, o bien, tienen un intervalo o una cantidad mínima definida de los siguientes elementos: aluminio, columbio, niobio, cromo, níquel, molibdeno, titanio, tungsteno, vanadio o circonio.

Puede considerarse de manera más o menos arbitraria, que los aceros de baja aleación son aquellos que tienen hasta un contenido total de aleantes de 5% a 10% y los de alta aleación de más de 10% y menos de 50%.

Aceros de Baja aleación

La mayoría de éstos se clasifican en uno de los siguientes grupos:

- Aceros de alta resistencia y baja aleación (para usos estructurales o para la construcción recipientes a presión)
- Aceros para maquinaria y para usos automotriz y aeronáutico
- Aceros para servicios a temperaturas elevadas
- Aceros para servicios de baja temperatura

Los siguientes términos se emplean para clasificar los productos de acero y tienen aplicación específica dentro de esta industria:

Grado: Se emplea para indicar la composición química.

Tipo: Indica la práctica y el grado de desoxidación empleada, o algún tratamiento térmico específico.

Clase: Describe algún atributo particular, nivel de resistencia, por ejemplo.

Designación: Ésta es la identificación específica de cada grado, tipo, o clase de acero por medio de números, letras, símbolos, nombres o una combinación de éstos para definir un acero particular.

Designaciones AISI/SAE

Los sistemas de designación de aceros al carbono y aleados de mayor uso en el continente americano son los establecidos por la American Iron and Steel Institute (AISI) y por la Society for Automotive Engineers (SAE). Estos dos sistemas de designación se basan en la composición química. Las designaciones AISI (que desde un punto de vista técnico son idénticas a las designaciones SAE son prácticas normalizadas, no especificaciones, si no designaciones normalizadas.

En las designaciones AISI/SAE, Los aceros se describen empleando un número formado por cuatro o cinco dígitos: el primero se refiere al tipo de acero, 1 indica el acero simple al carbono, 2 acero al níquel, 3 acero al cromo níquel, el segundo en los aceros aleación simple indica el contenido aproximado del aleante, mientras que los dos últimos, hacen referencia al contenido nominal de carbono, expresando en centésimas de porcentaje. Así la designación AISI 2520 describe un acero al manganeso, con un contenido del 5% de este elemento y el 0.20% de carbono. Las tablas 4.2 y 4.3 muestran las designaciones AISI/SAE generales de otros aceros de baja aleación.

Aceros de alta resistencia y baja aleación

Estos aceros, también conocidos como microaleados, son aceros de baja aleación que contienen pequeñas cantidades de aleantes para mejorar su resistencia mecánica, tenacidad, soldabilidad y, en algunos casos, su resistencia a la corrosión en medios específicos. Las propiedades de estos aceros son mejoradas por la combinación del afino de grano ferrítico, endurecimiento por precipitación y endurecimiento estructural. Estos aceros son utilizados principalmente en sus condiciones de laminación o normalizado, donde el proceso de laminación es parte integral del desarrollo de las propiedades mecánicas finales, sin embargo, el normalizado o el temple y revenido pueden mejorar la tenacidad en secciones de espesor grueso. Se han desarrollado prácticas de laminación especiales, tales como la laminación controlada, algunas veces realizadas por medio de enfriamiento con agua. Estas prácticas son conocidas como procesamiento termomecánicamente controlado.

DESIGNACIÓN	CONTENIDO NOMINAL DEL ELEMENTO Ó ELEMENTOS DE ALEACIÓN	TIPO DE ACERO
10XX	Aceros simples al carbono (1,00%C máximo)	Al carbono
11XX	Aceros resulfurados	
12XX	Aceros resulfurados y refosforados	
15XX	1,00 – 1,65% Mn	
13XX	Mn 1,75	
23XX	Ni 3,50	Al níquel
25XX	Ni 5,00	
31XX	Ni 1,25 / Cr 0,065 y 0,80	Al níquel - cromo
32XX	Ni 1,75 / Cr 1,07	
33XX	Ni 3,50 / Cr 1,50 hasta 1,57 (alto níquel)	
34XX	Ni 3,00 / Cr 0,77	
40XX	Mo 0,20 y 0,25	Al molibdeno
44XX	Mo 0,40 y 0,52	
41XX	Cr 0,50, 0,80 y 0,95 / Mo 0,12, 0,20, 0,25 y 0,30	Al cromo - molibdeno
43XX	Ni 1,82 / Cr 0,50 y 0,80 / Mo 0,25	Al cromo – níquel - molibdeno
43VXX	Ni 1,82 / Cr 0,50 / Mo 0,12 y 0,25 / V 0,03 min	
47XX	Ni 1,05 / Cr 0,45 / Mo 0,20 y 0,35	
81XX	Ni 0,30 / Cr 0,40 / Mo 0,12	Al cromo – níquel - molibdeno
86XX	Ni 0,55 / Cr 0,50 / Mo 0,20	
87XX	Ni 0,55 / Cr 0,50 / Mo 0,25	
88XX	Ni 0,55 / Cr 0,50 / Mo 0,35	
93XX	Ni 3,25 / Cr 1,20 / Mo 0,12	
94XX	Ni 0,45 / Cr 0,40 / Mo 0,12	
97XX	Ni 0,55 / Cr 0,20 / Mo 0,20	
98XX	Ni 1,00 / Cr 0,80 / Mo 0,25	
46XX	Ni 0,85 y 1,82 / Mo 0,20 y 0,25	Al níquel - molibdeno
48XX	Ni 3,50 / Mo 0,25	
50XX	Cr 0,27, 0,40, 0,50 y 0,65	Al cromo
51XX	Cr 0,80, 0,87, 0,92, 1,00 y 1,05	
50XXX	Cr 0,50	
51XXX	Cr 1,02 / C 1,00 min.	
52XXX	Cr 1,45	
61XX	Cr 0,60, 0,80 y 0,95 / V 0,10 y 0,15	Al cromo – vanadio
72XX	W 1,75 / Cr 0,75	Al tungsteno – cromo
92XX	Si 1,40 y 2,00 / Mn 0,65, 0,82 y 0,85 / Cr 0,00 y 0,65	Al silicio – manganeso
9XX	Varios grados SAE	Aceros de alta resistencia baja aleación
XXBXX	B denota Boro	Aceros al Boro
XXLXX	L denota Plomo	Aceros al Plomo

Tabla 4.2 - Designaciones AISI/SAE para aceros al carbono y de baja aleación

Designación	Tipo de Acero
WX	Temple al agua
SX	Resistencia al impacto
OX	Temple en aceite
AX	Temple al aire
DX	Alto carbono y alto cromo
HXX	Trabajo en aceite
TX	Rápidos (base tungsteno)
MX	Rápidos (base molibdeno)
LX	Propósitos especiales
FX	Carbono – tungsteno
PX	Moldes

Tabla 4.3 - Designación AISI/SAE para aceros grado herramienta

Los principales microaleantes que se emplean para incrementar la resistencia de estos aceros son niobio y el vanadio, mismos que se adicionan de manera sencilla o combinados, en contenidos de aproximadamente el 0.10%. Para algunas aplicaciones, por ejemplo en secciones de espesor grueso o donde se requiere mayor resistencia, también se adicionan cromo, níquel, y molibdeno en su formulación. Estos aceros de bajo contenido de carbono, y sus propiedades mecánicas altas (su resistencia a la tensión oscila entre 60,000 y 120,000 PSI) no dependen de productos de alto contenido de carbono tales como la perlita, martensita o bainita. Debido a su bajo contenido en carbono, Estos aceros poseen una excelente soldabilidad.

Los principios metalúrgicos (micro-aleación, endurecimiento subestructural) involucrados en la producción de estos aceros y los métodos adecuados para soldarlos (control escrito sobre las temperaturas de precalentamiento y entre pasos y sobre el calor aportado por pasos)

Aceros de alta aleación

Como se mencionó anteriormente, los aceros de alta aleación contienen mas de un 10% de contenido total de aleantes, principalmente de cromo, níquel y manganeso.

Dentro de este grupo están clasificados los aceros austeníticos al manganeso, los inoxidables y los resistentes al calor.

Aceros Austeníticos al manganeso

Son aceros que contienen el 10% o más de un manganeso y alto carbono, poseen gran tenacidad y pueden ser endurecidos cuando son sometidos a trabajo en frío. Su estructura cristalina a la temperatura ambiente. Estas aleaciones son conocidas como aceros hadfield al manganeso y son adecuados para condiciones de servicio en las que se requiere buena resistencia contra la abrasión o a cargas de impacto, por ejemplo en cruces o puntos de cambio de carriles de ferrocarril o en equipo para movimiento de tierra.

Aceros inoxidables

Son aceros de alta aleación mas importantes desde el punto de vista comercial. Son definidos como aquellos que resisten al ataque de muchos medios corrosivos a temperaturas atmosféricas y elevadas. Esta resistencia se debe a su alto contenido de cromo, de por lo menos el 11% cual provoca que en las superficies se forme una película densa y delgada de oxido de cromo, misma que protege contra la corrosión posterior. A algunos aceros inoxidables se les adiciona níquel (más del 7%) para retener la estructura austenítica a temperatura ambiente; otros elementos de aleación empleados a estos aceros son el molibdeno, el titanio, el columbio, el cobre, el selenio y el azufre.

Además de su alta resistencia a la corrosión, algunos de estos aceros poseen propiedades tales como la tenacidad en temperaturas bajo cero, buena resistencia mecánica a altas temperaturas o la capacidad de mantenerse en condición no magnética bajo una gran variedad de condiciones.

Hay tres tipos básicos de aceros inoxidables:

Los austeníticos, los ferríticos y los martensíticos. Los últimos contienen la menor cantidad de cromo y mayor contenido de carbono y poseen alta templabilidad. También existen aleaciones endurecibles por precipitación, y las superausteníticas, superferríticas y duplex; estas últimas tienen micro-estructura compuesta por austenita y ferrita.

Los grados comunes de los aceros inoxidables laminados o forjados están clasificados con designaciones AISI en base a su composición química, pero este sistema, sino por otros medios tales como marcas comerciales.

Las designaciones AISI clasifican a los aceros inoxidables en series y en grados. Por ejemplo, el grado 304 es la aleación más común de la serie 300, que corresponde a los aceros inoxidables austeníticos al cromo-níquel. Dentro de esta serie existen aproximadamente 30 grados, por ejemplo, el 316, que también contiene molibdeno. Además de los tres dígitos principales que componen las designaciones Básicas, en algunos casos adiciona un sufijo para denotar alguna característica o variante de algún grado. Por ejemplo, la designación 304L indica que este grado, que tiene la misma composición que el 304, con excepción del contenido "L" es menor que para el grado estándar.

La Tabla 4.4 muestra, de manera resumida, las series o grupos generales de aceros inoxidables, pero obviamente, el lector interesado en la composición y propiedades de un acero en particular, debe consultar las especificaciones correspondientes.

Clasificación AISI de la serie	Tipo de Aleación
2xx	Al Cr-Ni-Mn, Autenítico, no templeable, no magnético
3xx	Al Cr-Ni, Auteníticos, no templables, no magnéticos
4xx	Al Cr, no templables, ferríticos y magnéticos
5xx	Al Cr, templables, martensíticos y magnéticos
Ninguna	Endurecidos por precipitación, martensíticos, austeníticos y semi-austeníticos

Tabla 4.4 - Designaciones AISI/SAE para aceros inoxidable

Para el caso de las piezas fundidas de acero inoxidable, el instituto de aleaciones coladas (ACI) de la sociedad de fundidores de acero de América, los diferentes tipos o clases de aleación están estandarizados y se designan de manera típica por un sistema alfanumérico que sigue el modelo "HX-XX" o "CX-XX" la letra C indica servicio resistente a la corrosión y la letra H servicio resistente al calor, la segunda letra indica la localización aproximada de los contenidos de níquel y cromo del grado de la aleación en el diagrama ternario FE-CR-NI; el dígito o dígitos que siguen representan el contenido máximo de carbono para servicio C, o el punto medio del intervalo del contenido de carbono para servicio H, en las centésimas de puntos porcentual, las letras que siguen a este dígito representan elementos químicos especiales en el grado de la aleación. por ejemplo: la clasificación CF8M indica que se trata de una aleación resistente a la corrosión, F la posición correspondiente a los contenidos de cromo y níquel en el diagrama ternario mencionado, 8 se refiere al contenido máximo de 0.08% C y la M indica que contiene molibdeno. Muchos tipos de aleaciones coladas son similares a sus contrapartes laminadas con designación AISI, así, la aleación CF8M fundida corresponde a la composición química a la aleación AISI 316 laminada.

Aceros resistentes al calor

Los aceros aleados con contenidos relativamente bajos de cromo, por lo general entre 4 y 6% de la serie 5XX, poseen mucho más resistencia a la corrosión que los aceros comunes y pueden endurecerse por templado en aceite o al aire. las propiedades de estos aceros son intermedias entre los aceros de baja aleación de la serie 5XX y los aceros inoxidable martensíticos del tipo 400. son adecuados para condiciones de corrosión moderada o a temperaturas inferiores a unos 540°C y se utilizan ampliamente para equipo de refinerías petroleras, tales como intercambiadores de calor, cuerpos de válvula y anillos para bombas.

Por otra parte, se han desarrollado clases especiales de aceros de alta aleación o aceros inoxidable para ser usados en servicios a altas temperaturas, y en la actualidad existen aceros resistentes al calor que son

muy parecidos a ciertos aceros inoxidable y a veces sólo difieren de estos por pequeñas modificaciones en sus composiciones químicas.

Especificaciones ASTM para aceros

Las especificaciones establecidas por la ASTM cubren virtualmente todos los materiales que se fabrican, incluidos los metales ferrosos. Estas especificaciones, mismas que son descritas en el capítulo 7 de este texto, se refieren a los materiales según la forma del producto (tubo, placa de acero) método de fabricación (forjado, laminación) y aplicación (uso estructural o para recipiente a presión, para bajas o altas temperaturas) En algunos casos, las especificaciones ASTM, para los diferentes grados o tipos que incluyen, adoptan las clasificaciones AISI o ACI.

Tratamientos térmicos del acero

Como se mencionó anteriormente, el intervalo amplio de las propiedades mecánicas que tiene los aceros se debe a que tales propiedades pueden ser modificadas por la adición de elementos de aleación y por los cambios de fase que se pueden provocar mediante tratamientos térmicos.

Factores que influyen en la transformación de la austenita

En las secciones anteriores también se indicó que las transformaciones de fase de los aceros dependen (además del contenido de carbono y otros elementos de aleación) de las condiciones en las que ocurre el enfriamiento de la austenita, principalmente la velocidad y la temperatura a la que enfría el metal: si el enfriamiento ocurre lentamente, la transformación de la austenita será en condiciones de equilibrio y pueden ser descritas mediante el diagrama F_e-C , y si la velocidad de enfriamiento es mayor, la transformación será fuera de equilibrio y puede ser descrita por los diagramas TTT o CCT, si el enfriamiento es a una temperatura constante o si es continua, respectivamente. Otros factores importantes que determinan la transformación de los aceros son la composición química, el tamaño de grano austenítico y la homogeneidad de la austenita.

Templabilidad

Si bien los diagramas TTT Y CCT representan las características de la transformación de los aceros, no son suficientes para predecir con precisión su estructura y propiedades. El concepto de la respuesta al tratamiento térmico de temple o templabilidad es un método útil para describir tales transformaciones y se emplea la prueba de "Jominy" para predecir con precisión razonable la respuesta al temple y la estructura y propiedades de los aceros. Esta prueba ha sido estandarizada por ASTM, SAE y AISI.

La templabilidad no debe confundirse con la dureza, ya que la dureza máxima de un acero está en función de su contenido en carbono, mientras que la templabilidad se formará martensita cuando son enfriados al aire, pero los de baja templabilidad requerirán de las altas velocidades de enfriamiento para que la martensita se forme.

Tratamientos térmicos

Los tratamientos térmicos son combinaciones de operaciones de calentamiento y enfriamiento, durante tiempo y velocidades determinadas, que se aplican a un metal o aleación en estado sólido para producir las propiedades deseadas.

Los tratamientos térmicos de los aceros involucran la transformación de la austenita, y la forma en que ocurre ésta, así como la naturaleza y la micro-estructura de sus productos, determinan las propiedades de los aceros tratados.

Los tratamientos térmicos más comunes que se aplican a los aceros en la industria en general se describen brevemente a continuación:

Recocido

Consiste en calentar una pieza a tratar y mantenerla a temperatura adecuada, y enfriarla lentamente durante el intervalo de transformación y hasta temperaturas más bajas; el enfriamiento normalmente ocurre dentro del horno.

Cuando el término reconocido se aplica a metales ferrosos, implica que se trata de recocido total, y se emplea para reducir dureza y los esfuerzos residuales, mejorar la maquinabilidad, facilitar en trabajo en frío y obtener las propiedades deseadas.

El recocido total se realiza a más de unos 100°C por encima de la temperatura superior de transformación de la austenita (líneas A_{c3} y A_{cm} del diagrama F_e-C). Adicionalmente, también existen los recocidos de recristalización, isotérmico e intermedio.

Normalizado

Consiste en calentar aleaciones ferrosa a temperaturas mayores (aproximadamente de 50° a 100°C) a la temperatura superior de transformación de la austenita y luego enfriarlas hasta la temperatura ambiente en el aire quieto.

El propósito del normalizado es producir un acero de mayor resistencia y dureza que el obtenido por el recocido total; también puede ser usado para mejorar la maquinabilidad, modificar y mejorar las estructuras dendríticas de piezas de fundición, así como refinar el grano y homogenizar la micro-estructura para mejorar las respuesta a las operaciones de endurecimiento. Algunas veces las aleaciones normalizadas son sometidas al tratamiento de revenido.

Temple o templado

Consiste en calentar las piezas y enfriarlas rápidamente. Si se trata de aceros hipoeutectoides, se deben calentar aproximadamente unos 50°C arriba de la temperatura superior de transformación y para aceros hipereutectoides al carbono, la temperatura de calentamiento está entre las líneas A_{cm} y $A_{3.1}$ del diagrama F_e-C .

El enfriamiento debe efectuarse de tal manera que se exceda la velocidad crítica de enfriamiento para obtener estructura martensítica; si el enfriamiento ocurre a una velocidad de enfriamiento de los aceros varía con la composición química y otros factores, de manera que hay medios de temple adecuados para

cada tipo de acero. Los medios de temple que se emplean en la industria se enumeran a continuación, en la orden descendente en cuanto a la severidad del temple o velocidad de enfriamiento: salmuera (solución acuosa al 10% de cloruro de sodio), agua simple, sales fundidas o líquidas, aceite soluble y soluciones acuosas, aceite y aire.

Revenido

Es un calentamiento que se da a las aleaciones templadas, y en algunos casos a las normalizadas, a temperatura inferior de transformación, normalmente entre 200 y 430°C, aunque algunos tratamientos de revenido se realizan a temperaturas inferiores y superiores al intervalo antes indicado.

El propósito del revenido es aumentar la tenacidad de la martensita templada, que es una estructura muy dura y frágil; la tenacidad aumenta a expensas de disminuciones ligeras de la dureza. La micro-estructura resultante de este tratamiento es llamada martensita revenida y en términos sencillos, se puede decir que consiste de finas partículas de carburo que precipitan en la matriz.

Relevado de esfuerzos (Alivio de Tensiones)

El relevado de esfuerzos o alivio de tensiones consiste en calentar una pieza o estructura, o una porción de éstas, a una temperatura suficiente para relevar la mayor parte de los esfuerzos residuales. Las piezas son mantenidas a la temperatura de tratamiento durante el tiempo especificado, y después se les enfría uniformemente.

Este es el tratamiento térmico más usado en las partes soldadas, y la temperatura de alivio de esfuerzos para la mayor parte de los aceros al carbono y de baja aleación oscila entre 595 y 630 °C

Metalurgia de la soldadura

En las operaciones de soldadura por fusión, con o sin metal de aporte, las partes soldadas son sometidas a un ciclo térmico que consta de las siguientes etapas:

- calentamiento localizado muy rápido de los metales (base y de aporte)
- aparición de metal fundido que, por lo menos en una parte, proviene del metal base.
- formación de una zona o charco de metal de metal fundido.
- Enfriamiento rápido del conjunto (metal base y de soldadura).
- gradientes de temperatura a lo largo de toda la junta soldada.

Durante las operaciones de soldadura ocurren fenómenos metalúrgicos tales como la fusión, reacciones de gases con el metal líquido, reacciones de fases líquidas no metálicas con el metal fundido, interacciones de fases líquidas y sólidas, solidificación, segregación y reacciones en el estado sólido.

Las características del ciclo térmico de soldadura y los fenómenos que ocurren durante ésta influyen grandemente en la micro-estructura, propiedades y sanidad de las uniones soldadas. En las secciones siguientes se analiza cómo influyen estos factores en la calidad de las juntas.

Ciclo térmico de las juntas soldadas

Al efectuarse las operaciones de soldadura, las juntas experimentan un ciclo de calentamiento y enfriamiento en el que sus diferentes partes se ven sometidas a un amplio intervalo de temperatura, que oscila desde temperaturas superiores a la fusión, en el metal de soldadura, hasta prácticamente la ambiente, en el metal base pasando por el intervalo de transformación. La siguiente figura ilustra las partes de una junta soldada.

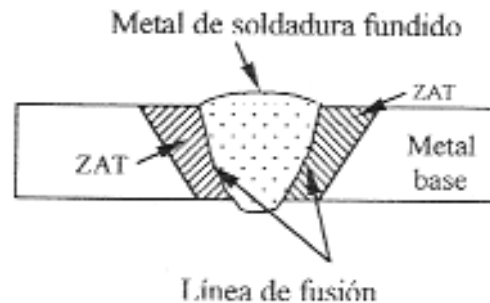


Figura 4.25 - Partes de las juntas soldadas

La porción del metal base que no se funde durante la soldadura, pero que es calentada a temperaturas en las que se alteran la micro-estructura y las propiedades mecánicas del metal base, es llamada zona afectada térmicamente (ZAT)

La resistencia mecánica y la tenacidad de la zona afectada térmicamente depende del tipo del metal base, y del proceso y el procedimiento de soldadura usados. Los metales base en los que más influye la soldadura son aquellos cuya ZAT se ve sometida a recocido o endurecimiento por ciclos térmicos que involucran altas temperaturas.

Desde el punto de vista del tipo del metal base, el efecto del calor de soldadura sobre la ZAT puede describirse en términos de las siguientes clases de aleaciones que pueden ser soldados:

- metales base endurecidos por solución sólida, normalmente presentan pocos problemas en la zona afectada térmicamente, y si no sufren transformaciones en el estado sólido, el efecto del ciclo térmico es pequeño y las propiedades de la ZAT son afectadas mínimamente, aunque hay crecimiento de grano cerca de la línea de fusión, pero esto no afecta significativamente las propiedades mecánicas si la zona de grano grueso consta de una franja de sólo unos cuantos granos. Ejemplos de este tipo de metales base son las aleaciones de aluminio, las de cobre, los aceros de bajo carbono laminados en caliente y los aceros, algunos inoxidable austeníticos y ferríticos.
- aleaciones endurecidas por deformación plástica en frío. La zona afectada térmicamente de estas aleaciones re-cristaliza en las regiones calentadas por encima de la temperatura de re-cristalización, y las propiedades mecánicas del metal en esta zona descienden considerablemente; estas propiedades no pueden ser recuperadas mediante tratamiento térmico.

Si la ZAT de estas aleaciones sufre transformaciones alotrópicas, los efectos de la soldadura son aún más complejos. Algunos aceros y las aleaciones de titanio pertenecen a este grupo y pueden tener dos zonas re-cristalizadas. La figura 4.26 ilustra el efecto del ciclo térmico en los metales base, deformados en frío.



Figura 4.26 - Zonas afectadas térmicamente con granos recristalizados

En esta figura se muestra la micro-estructura del metal base no afectado (a) con los granos típicamente alargados debido a la deformación mecánica, los granos equiaxiales (b) de la ZAT que se formaron donde fue excedida la temperatura de re-cristalización y los granos gruesos que crecieron en las regiones sometidos a temperaturas cercanas al punto de fusión. Las aleaciones que sufren transformaciones alotrópicas pueden tener dos zonas re-cristalizadas, donde la primera zona de grano fino resulta de la re-cristalización de la fase alfa trabajada en frío, y la segunda región de grano fino resulta de la transformación alotrópica de la fase de temperatura más alta.

-Aleaciones endurecidas por precipitación

Estas responden al calor de la soldadura de manera similar a las aleaciones deformadas en frío, es decir, la ZAT sufre un ciclo de recocido. El comportamiento de la ZAT de estas aleaciones es complejo debido a que el ciclo térmico de soldadura produce efectos diferentes en cada región de las juntas.

La micro-estructura de la ZAT de las aleaciones endurecidas por precipitación consta de dos regiones, la correspondiente a la zona de solución (adyacente al metal de la soldadura fundido) de grano grueso, y la zona sobre-envejecida. la primera es una fase en solución sólida más suave que el metal base, pero puede ser endurecida por medio de un tratamiento de envejecimiento, la segunda, la zona sobre-envejecida (calentada debajo de la temperatura de tratamiento de solución) por el calor de soldadura, también es más suave que el metal base, y el tratamiento de envejecimiento no recupera las propiedades mecánicas en esta región. En particular las de alta resistencia, y deben tomarse precauciones, tales como el empleo de bajos calores aportados por paso, para minimizar la cantidad de metal base suavizado.

-Aleaciones endurecidas por transformaciones de fase

Las aleaciones de tipo de mayor interés son los aceros con contenidos de carbono y otros elementos de aleación suficientes para que la austenita se transforme en martensita durante la etapa de enfriamiento del ciclo térmico de soldadura. Las transformaciones martensíticas pueden ocurrir en dos casos: En los aceros templados y revenidos antes de ser soldados y en los aceros (fundidos, normalizados o en condición de laminación) que poseen suficiente templabilidad para que la austenita se transforme en martensita durante el ciclo térmico de soldadura; en ambos casos la ZAT se comporta de una manera similar. Este comportamiento es analizado con mayor detalle en la sección correspondiente a las transformaciones que sufre el acero durante la soldadura.

Cambios dimensionales

Los cambios de temperatura que ocurren durante la soldadura son rápidos, localizados y heterogéneos. Las diferentes partes de las juntas soldadas se calientan y enfrían a temperaturas y velocidades diferentes, y cada región se expande y contrae a su propia velocidad.

Debido a esta falta de uniformidad en la expansión y contracción, se generan esfuerzos residuales en las juntas. Estos esfuerzos pueden ser lo suficientemente severos para producir deformaciones y aún grietas en el metal de soldadura fundido y en la ZAT.

Los metales, al soldarse, sufren tres formas básicas de cambios dimensionales que se describen a continuación y se ilustran en la figura 4.27

-expansión térmica (figura 4.27 A)

Casi todos los materiales se expanden al calentarse. La expansión volumétrica se describe comúnmente en términos lineales, mismos que resultan más fáciles de expresar y son más convenientes para fines de medición. La cantidad de expansión (L) puede calcularse con las siguientes fórmulas:

$$\Delta L = L_0 \alpha \Delta T \quad \text{ó} \quad L_f = L_0 (1 + \alpha \Delta T)$$

Donde:

ΔL = Cambio de longitud (cm)

α = Coeficiente de expansión térmica (cm/°C)

ΔT = Incremento de temperatura

L_f = Longitud final (cm)

L_0 = Longitud (cm)

Esta ecuación es válida sólo dentro de un límite de temperaturas y mientras no haya cambios de fase o de estado.

El grado con que ocurren la expansión y la contracción es una función de la temperatura y se expresa por medio del coeficiente de expansión térmica.

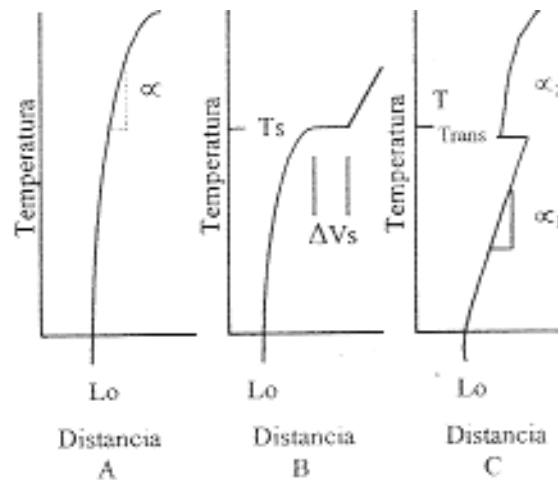


Figura 4.27 - Formas básicas de cambios dimensionales durante la soldadura. (Acero ideal)

-Cambios de volumen durante la fusión y la solidificación (figura 4.27-B) Estos se deben a que durante los cambios de fase del estado sólido al líquido y viceversa, se origina un incremento o una disminución de las distancias entre los átomos.

-Cambios dimensionales por transformaciones de fase (figura 4.27-C) las transformaciones de las aleaciones generalmente están asociadas con cambios de volumen. Estos cambios se deben a que el “empaquetamiento” de los átomos cambia de una estructura cristalina a otra. El fierro, al cambiar de la fase γ (austenita, de estructura cúbica centrada en las caras) a la fase α (ferrita, de estructura cúbica centrada en el cuerpo) presenta aumento de volumen. También hay un incremento de volumen (aproximadamente de 4.3%) asociado con la transformación de austenita en martensita.

Esfuerzos residuales

Las contracciones que ocurren a lo largo de las juntas soldadas, durante la fase de enfriamiento del ciclo térmico de soldadura, mismas que se desarrollan a diferentes velocidades y varían en magnitud en cada región de las juntas, originan esfuerzos residuales en éstas. Los esfuerzos residuales son definidos como aquellos que están presentes en los materiales (incluidas las juntas soldadas) sin que estén sujetos a fuerzas externas o gradientes térmicos. Estos esfuerzos pueden ser de una magnitud suficiente para provocar, en las partes soldadas, deformación, distorsión, agrietamiento y disminución de propiedades tales como resistencia a la tensión, tenacidad y resistencia mecánica a bajas temperaturas. Algunos factores que influyen en los esfuerzos residuales son el grado de restricción de las juntas, la diferencia de los coeficientes de expansión térmica de los metales soldados, la secuencia de soldadura, el calor total aportado y la velocidad de enfriamiento. Estos esfuerzos pueden reducirse y controlarse, en alguna medida, con el empleo de precalentamiento y control sobre el calor aportado por paso.

Una vez generados en las partes soldadas, los esfuerzos residuales pueden eliminarse en porción considerable mediante el empleo del tratamiento térmico posterior a la soldadura conocido como alivio o relevado de esfuerzos, mismo que, en algunos casos, por requisitos de contrato o de las normas aplicables, es obligatorio.

Trasformaciones de l acero durante la soldadura

Las regiones de las zonas afectadas térmicamente, en los aceros que se endurecen por transformaciones de fase durante la soldadura, así como su relación con las temperaturas picos alcanzadas y el diagrama F_e-C se muestra en la figura 4.28.

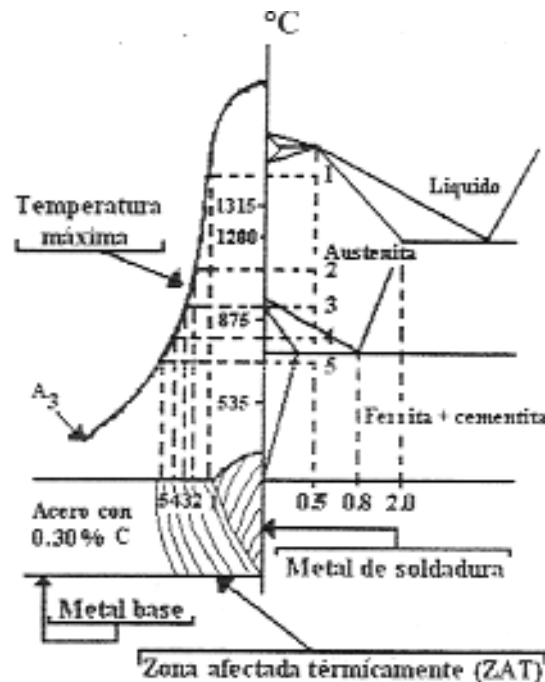


Figura 4.28 - Relación aproximada de las temperaturas picos en las juntas soldadas y el diagrama F_e-C

La región 1 de la ZAT de la figura anterior es la más próxima a la línea de fusión y contiene grano grueso que creció rápidamente debido al calentamiento a temperaturas cercanas a la de fusión; el tamaño de grano grueso aumenta la templabilidad, de esta región puede transformarse rápidamente en martensita durante el enfriamiento. La región 2 también se austeniza, pero la temperatura que alcanza es demasiado baja para producir crecimiento de grano, por lo que su templabilidad no se incrementa significativamente, pero aún puede transformarse en martensita si la velocidad del enfriamiento es suficientemente rápida o si el contenido de aleación es suficientemente alto. En la región 3, algunos granos se transforman en austenita y otros no, y el tamaño de grano es muy fino. En la región 4 no ocurre transformación austenítica, pero los granos de ferrita se ven sometidos a un efecto de revenido por el calor de soldadura.

El calor aportado por el paso influye en forma directa en la velocidad de enfriamiento, por lo que determina los productos finales de transformación y el ancho de cada región de la ZAT. Debido a que la martensita de alto contenido de carbono es dura y frágil, puede crear problemas de alta dureza y agrietamiento en la ZAT. La martensita por sí sola, generalmente no provoca agrietamiento, pero si contiene hidrógeno disuelto o está sometida a esfuerzos residuales altos, es probable la ocurrencia de grietas. La dureza de la ZAT es una función del contenido de carbono en el metal base, y cuando el contenido de carbono aumenta, también se incrementa la susceptibilidad al agrietamiento y la dureza, y disminuye la tenacidad.

La dureza de la ZAT generalmente es buen indicador de la cantidad de martensita presente y de la susceptibilidad al agrietamiento: Cuando la dureza del metal es inferior a 250 HB y no se toman las precauciones debidas.

Resulta evidente que el diagrama FE-C es útil para entender las transformaciones de la austenita que ocurren en la ZAT cuando el enfriamiento es lento y se forman fases de equilibrio, y que los diagramas TTT y CCT también ayudan a comprender las transformaciones fuera de equilibrio que ocurren cuando el enfriamiento es rápido, pero la soldadura involucra fenómenos y condiciones que difieren de los descritos en tales diagramas, por lo que las fases presentes en la ZAT y la proporción de estas (así como las propiedades) resultan diferentes de las que pudieran preverse con los diagramas mencionados debido a las siguientes razones:

En el caso de los tratamientos térmicos que describen los diagramas, el acero es mantenido a la temperatura establecida durante un tiempo suficiente para disolver los carburos y desarrollar una estructura austenítica homogénea con tamaño de grano relativamente uniforme, mientras que en el ciclo térmico de soldadura, las temperaturas pico de austenitización varían desde aproximadamente el punto de fusión hasta la temperatura crítica inferior, y la duración de este ciclo térmico.

Por otra parte, a temperaturas pico cercanas a la línea de fusión, la difusión es más rápida y los átomos de soluto (principalmente de carbono) se dispersan uniformemente en la austenita, el grano austenítico crece. A temperaturas pico ligeramente superiores a la inferior de transformación de la austenita, los carburos no pueden disolverse completamente en ésta, y los átomos de soluto que no se disolvieron debido a la temperatura relativamente baja no pueden difundirse lejos del sitio original del carburo. Así la austenita en las regiones de temperatura pico inferior, contienen unas áreas con alto contenido de aleación y otras con bajo contenido de ésta, y la austenita en esta zona es de grano fino.

Las regiones calentadas a temperaturas pico intermedias presentan homogeneidad y tamaños de grano austenítico que oscilan entre los extremos mencionados.

Después de las consideraciones anteriores, es obvio que para obtener las micro-estructuras y propiedades deseadas en las juntas soldadas, es necesario controlar la velocidad de enfriamiento durante el ciclo térmico de soldadura.

Existen varios factores que influyen sobre la velocidad de enfriamiento y algunos métodos para controlarla, pero antes de analizarlos, es conveniente examinar otros aspectos.

Soldabilidad y carbono equivalente

En las precedentes se han tratado a los aceros como si únicamente estuvieran aleados con carbono, ya que este es el elemento de aleación que más afecta las propiedades de los aceros, incluida la soldabilidad, pero todos los otros elementos presentes en la composición química también afectan a las propiedades.

Desde el punto de vista de la soldadura, el efecto de mayor interés que la composición química tiene en los aceros es la templabilidad (tendencia a la formación de martensita) de la ZAT, y la alta dureza, fragilidad y tendencia al agrietamiento asociadas con la martensita, factores relacionados con la soldabilidad. Como se consideró anteriormente, a mayor contenido de carbono corresponde una mayor templabilidad y dureza, pero también menor soldabilidad.

Los otros elementos de aleación también afectan a la soldabilidad y su influencia puede ser estimada en términos de su efecto comparado con el efecto del carbono. Así el efecto total del contenido de aleantes puede ser expresado en términos de equivalente en carbono o carbono equivalente (CE), y para estimar éste, se han desarrollado una serie de fórmulas empíricas como la que se indica a continuación.

$$CE = \%C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15}$$

Existen diversas ecuaciones para determinar el CE, y cada una de ellas fue desarrollada para diferentes aplicaciones y resultan válidas sólo en determinados intervalos de composición química, por lo que deben tomarse las precauciones necesarias para emplear la fórmula correcta en cada caso. Otra ecuación de CE, útil para establecer relaciones entre la composición química y la dureza debajo del cordón y la sensibilidad al agrietamiento es la siguiente:

$$CE = \%C + \frac{\%Mn}{4} + \frac{\%Si}{4}$$

De manera ilustrativa, aunque no del todo precisa, el concepto “equivalente en carbono” puede interpretarse como el efecto total que la composición química tiene sobre la soldabilidad, expresado en términos de la fracción del efecto del carbono sobre ésta con que cada elemento de aleación contribuye. Otra forma de interpretar este concepto es considerar que cada elemento de aleación aumenta la resistencia mecánica del acero, y disminuye su soldabilidad sólo en una fracción de la que la disminuye el carbono.

Por su parte, la soldabilidad es definida por la AWS de la siguiente manera:

La capacidad de un material para ser soldado bajo las condiciones de fabricación impuestas, dentro de una estructura específica adecuadamente diseñada, y que cumpla satisfactoriamente en el servicio al que se destina.

De acuerdo con la esta definición, la soldabilidad de un material debe juzgarse independientemente de los factores de diseño, y se da por cierto que se cumplen las siguientes condiciones:

-El material a soldarse es de acuerdo para la aplicación a la que se va a someter.

– El diseño de la unión es adecuado para la aplicación prevista.

En términos más sencillos, soldabilidad es la propiedad de un material de ser soldado de manera que la junta resultante posea las mismas propiedades del metal base. En esta “definición” hace referencia a condiciones ideales, pero ilustra algunos aspectos clave de la soldabilidad, aunque en la realidad sucede que piezas metálicas correspondientes a la misma especificación y clase, suelen presentar variaciones en sus propiedades, y la junta, en la ZAT, el metal base y el metal de soldadura depositando, siempre poseen estructuras y propiedades diferentes.

En la práctica, es aceptable obtener juntas soldadas con propiedades y estructura razonablemente uniformes, siempre y cuando cumplan con los requisitos especificados. Esto se consigue mediante la selección adecuada de los metales de aporte y empleo de los procesos y procedimientos de soldadura apropiados para cada aplicación.

La soldabilidad, en términos de la sensibilidad al agrietamiento debajo de los cordones y de la dureza, es inversamente proporcional al carbono equivalente. Por lo general, los aceros con bajos valores de CE poseen una soldabilidad excelente, pero cuando este valor excede de 0.40, la soldabilidad disminuye considerablemente. Así un

acero con 0.20% de carbono y 1.60% de manganeso, tiene un CE de 0.60 valor que indica una sensibilidad al agrietamiento relativamente alta.

Control de las propiedades de las juntas soldadas

De acuerdo con las consideraciones anteriores, la micro-estructura de la ZAT depende principalmente de la composición química (CE) y de la velocidad de enfriamiento, y ya que las propiedades están determinadas por la micro-estructura, las propiedades finales de las juntas soldadas de un acero en particular, esto es, con una composición química específica, están determinadas por la velocidad de enfriamiento.

La velocidad de enfriamiento, por su parte, depende del espesor de los miembros de la junta, de la temperatura a la que se encuentra justo antes de la aplicación de cada paso de soldadura y de calor aportado por paso.

Debido a lo anteriormente expuesto, a fin de tener soldaduras con las propiedades deseadas (resistencia a la tensión, tenacidad, ductilidad, dureza y resistencia a la corrosión) y libres de condiciones indeseables es necesario, entre otros factores, controlar la velocidad de enfriamiento. Tal control puede ejercerse por medio de las siguientes variables de soldadura:

Pre calentamiento

El pre calentamiento es el calor aplicado al metal base o sustrato para obtener y mantener en éste la temperatura de pre calentamiento. Esta última se define como la temperatura del metal base en el volumen que rodea el punto a soldar inmediatamente antes de que se inicie la soldadura. En soldaduras de pasos múltiples, también es la temperatura a la que se encuentra el metal base antes de que se inicien el segundo paso y los subsecuentes.

Generalmente, en los procedimientos se especifica la temperatura mínima de pre calentamiento, aunque en algunos casos también el límite máximo, y éste coincide con la temperatura máxima entre pasos.

El pre calentamiento disminuye la velocidad de enfriamiento, con lo que se puede evitar la formación de martensita y se previene o minimiza el agrietamiento; también reduce las variaciones de temperatura y los cambios dimensionales de expansión y concentración, con lo que se reducen los esfuerzos residuales.

Temperatura entre pasos

Está, en soldaduras de pasos múltiples, es la temperatura a la que se encuentra el área a soldar entre pasos de soldadura.

Normalmente se especifica la temperatura máxima permitida entre pasos, aunque también suele establecerse la mínima, que por lo general coincide con la mínima de pre calentamiento.

Las temperaturas muy altas entre pasos provocan reducciones de la velocidad de enfriamiento, incremento en el ancho de la ZAT y excesivo crecimiento de grano, lo que a su vez provoca que las propiedades mecánicas disminuyan. En la práctica, en los aceros simples al carbono existen pocos problemas asociados con la temperatura entre pasos, pero se sueldan aceros templados y revenidos o aceros inoxidable austeníticos, las altas temperaturas entre pasos que causan serios problemas.

Calor aportado

El calor aportado por paso es la energía calorífica que se introduce en la junta soldada en cada paso de soldadura, e influye de manera directamente proporcional en la velocidad de enfriamiento. Para soldadura con arco, el calor aportado puede calcularse fácilmente por medio de la siguiente fórmula:

$$H = \frac{EI(60)}{V}$$

Donde:

H= calor aportado en Joules/pulg.

E= voltaje del arco, en voltios

I= corriente de soldadura, en amperios

V= velocidad del arco, en pulgadas/minuto

Debido a que no todo el calor generado por el arco se introduce en la junta, puede aplicarse un factor de eficiencia en la fórmula anterior. Se sugieren los valores siguientes:

75-80% para métodos de aplicación manual.

80-95% para métodos de aplicación semiautomática y mecanizada

90-100% para el proceso de arco sumergido, con métodos de aplicación mecanizada o automática.

El excesivo calor aportado por paso puede ocasionar los mismos problemas que las temperaturas entre pasos muy altas, y también pueden incrementar los esfuerzos residuales y la distorsión.

El propósito de las consideraciones anteriores es ilustrar de manera cualitativa la influencia que el precalentamiento, la temperatura entre pasos y el calor aportado tienen sobre la velocidad de enfriamiento (y sobre la microestructura y las propiedades de las juntas soldadas), y que hacer énfasis en el sentido de que estas variables deben ser controladas de manera rigurosa, dentro de los intervalos establecidos en las especificaciones de procedimiento de soldadura calificados, a fin de que el inspector no pierda de vista la importancia que tiene el hecho de asegurar que durante sus asignaciones de inspección, tales variables se mantengan dentro de los valores especificados. En el capítulo 8 de este texto se analizan con mayor detalle estas variables.

Otra categoría de variables de soldadura asociadas con las descritas en los párrafos anteriores, corresponde al tratamiento térmico posterior a la soldadura, en particular, el de relevado de esfuerzos. Este se emplea para reducir los esfuerzos residuales, mismos que, durante la soldadura pueden ser minimizados mediante el empleo de diseños de junta y técnicas adecuadas, pero no pueden ser evitados por completo. En el capítulo 8 también se hacen algunas consideraciones adicionales acerca de estos tratamientos, en particular las relacionadas con los requisitos de las normas.

Agrietamiento por hidrógeno

Un fenómeno relacionado con la etapa de enfriamiento del ciclo térmico de soldadura es el agrietamiento asociado con la absorción de hidrógeno en el metal de soldadura. Este fenómeno es conocido como agrietamiento retardado o por hidrógeno, o agrietamiento en frío o debajo del cordón. Las grietas pueden ocurrir en el metal de soldadura o en la ZAT cuando se sueldan aceros al carbono y de baja aleación, particularmente en aquellos en los que se forma martensita durante el enfriamiento.

Este tipo de agrietamiento ocurre después de que las juntas soldadas se han enfriado a temperaturas bajas (debajo de unos 150°C), algunas horas o algunos días después de la soldadura. Este fenómeno siempre está asociado con el hidrógeno disuelto en el metal de soldadura y queda atrapado en la junta durante la solidificación y la subsecuente transformación en martensita.

Las posibles fuentes de hidrógeno son la humedad y otros compuestos hidrogenados procedentes del metal de aporte, del revestimiento del electrodo, de los fundentes, del gas de protección o de contaminación del metal base o de aporte. Esta humedad y estos compuestos hidrogenados se disocian con el calor del arco de soldadura y se introducen como hidrógeno atómico (difusible) en el metal de soldadura fundido. El hidrógeno atómico es relativamente soluble en la austenita y virtualmente insoluble en la ferrita, pero al enfriar rápidamente la junta, la austenita se transforma en un agregado de ferrita y carburos o en martensita, en las que el hidrógeno queda atrapado en solución.

Durante el enfriamiento y las transformaciones de fase, el hidrógeno disuelto es rechazado y tiende a concentrarse en los defectos de la estructura cristalina, donde se forma hidrógeno molecular que puede generar altas presiones que inducen esfuerzos de tensión localizados e incrementan los esfuerzos residuales de tensión.

En los aceros simples al carbono, las transformaciones ocurren a temperaturas relativamente altas (aproximadamente 700°C), por lo que los átomos de hidrógeno tienen suficiente movilidad, de manera que pueden difundirse fuera del metal. Además, los productos de transformación de alta temperatura (ferrita más carburos) que se forman en el metal de soldadura y la ZAT son relativamente dúctiles y resistentes al agrietamiento.

En los aceros templables que se enfrían rápidamente se forma martensita, la cual es más susceptible al agrietamiento, a más bajas temperaturas, por lo que la movilidad de los átomos de hidrógeno es menor. La causa más probable de agrietamiento en frío es la combinación de martensita e hidrógeno.

El potencial de agrietamiento debido al hidrógeno en el metal de soldadura y en la ZAT también depende de la composición química, del contenido de hidrógeno y los niveles de esfuerzos presentes.

Las dos precauciones universalmente empleadas para minimizar los riesgos de ocurrencia de este tipo de problemas son el pre-calentamiento del metal base para disminuir la velocidad de enfriamiento y el empleo de procesos de bajo hidrógeno.

En relación con los procesos de bajo hidrógeno, no resulta sencillo evitar que los materiales consumibles de soldadura (particularmente los electrodos de bajo hidrógeno y los fundentes aglomerados para el proceso de arco sumergido) correspondientes absorban humedad del medio ambiente. Para evitar que estos materiales consumibles absorban humedad, deben almacenarse y manejarse en condiciones rigurosamente controladas. Una de las responsabilidades clave del inspector de soldadura es asegurar que dichos materiales son almacenados, manejados y empleados en forma correcta. En el capítulo 5 se tratan con más detalle los requisitos y precauciones asociados con los procesos de bajo hidrógeno.

Soldadura de aceros inoxidables

Para soldar exitosamente a los aceros inoxidables, al igual que cualquier grupo de aleaciones, es necesario entender y controlar los fenómenos metalúrgicos específicos que ocurren durante las operaciones de soldadura de este tipo de aleaciones; mismas que presentan diferencias importantes con respecto de los aceros al carbono y de baja aleación consideradas anteriormente.

Algunas de estas diferencias son el coeficiente de expansión térmica y la conductividad térmica de los aceros inoxidable austeníticos. El primer es un 50% mayor que el de los aceros al carbono, por lo que se presentan más problemas de distorsión, y la segunda es menor (con respecto de los aceros al carbono), por lo que para soldarlos se requiere menor calor de soldadura, ya que éste no se disipa lejos de la junta.

La mayoría de los aceros inoxidable tienen buena soldabilidad y pueden ser soldados mediante varios procesos soldadura, incluyendo los de arco, resistencia, haz de electrones, haz láser, fricción y soldadura fuerte, pero debido a los fenómenos particulares que ocurren durante las operaciones de soldadura deben usarse procedimientos especiales.

Aceros inoxidable austeníticos

Con el propósito de ilustrar algunos fenómenos particulares que ocurren al soldar aleaciones diferentes a los aceros al carbono, y de esta manera mostrar al lector que la soldadura de cada grupo de aleaciones requieren del estudio y conocimiento de los fenómenos y principios metalúrgicos específicos involucrados, a continuación se consideran algunos aspectos clave de la soldadura de los aceros inoxidable austeníticos.

Existen tres problemas comunes asociados con la soldadura de este tipo de aceros, mismos que se describen brevemente a continuación:

Sensitización de la ZAT.

Si estos aceros son mantenidos por periodos relativamente largos a la temperatura de sensitización, que oscila en entre 427 y 871°C, parte del cromo en solución cerca de los límites de grano se difunde hacia éstos, donde se forman y precipitan carburos de cromo. Como resultado de este hecho, hay una reducción de la contención de cromo en las regiones cercanas a los límites de grano, por lo que en estas regiones se reduce la resistencia a la corrosión.

Si durante la soldadura las partes permanecen en el tiempo suficiente para que precipiten carburos de cromo en la ZAT, durante el servicio pueden ocurrir fallas por corrosión inter-granular. Las siguientes figuras, tomadas del Volumen 4, 7ª Edición del *Manual de Soldadura de AWS*, ilustran este tipo de corrosión en un acero inoxidable tipo 304.

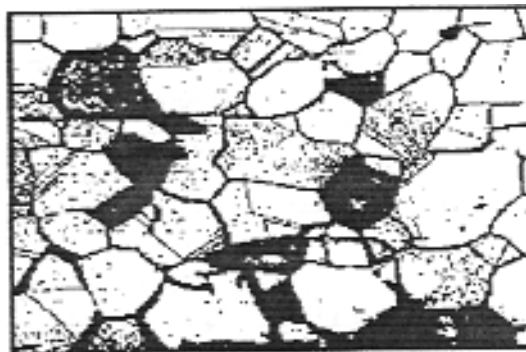


Figura 4.29 - Micro estructura de una ZAT sensitizada, con corrosión intergranular

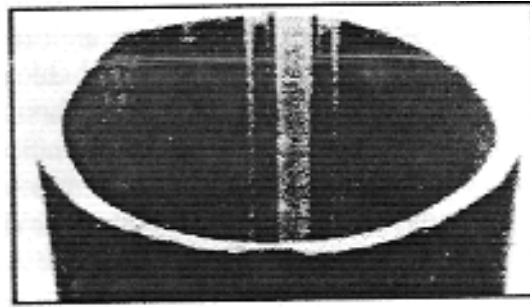


Figura 4.30 - Sección de un tubo con corrosión intergranular en la ZAT

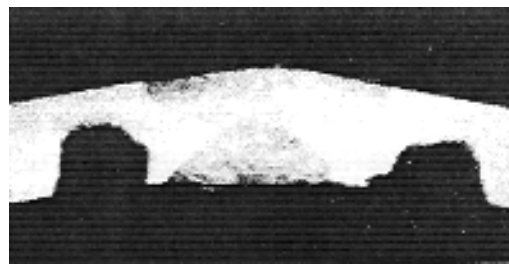


Figura 4.31 – Macrografía de una sección transversal que muestra la extensión de la zona con corrosión intergranular.

Estos problemas pueden ser evitados de las siguientes maneras: Usar materiales base y de aporte de bajo contenido de carbono para reducir la cantidad de carbono disponible para combinarse con el cromo; soldar sin precalentamiento, con bajas temperaturas entre pasos y bajos calores aportados por paso, a fin de reducir el tiempo de las piezas soldadas en la temperatura de sensitización; usar metales base y de aporte estabilizados, que es, que contengan elementos que reaccionen con el carbono para permitir que el cromo permanezca en solución y no reducir la resistencia a la corrosión. Algunos tipos de aceros inoxidable estabilizado son el 321 que contiene titanio, y el 347 que contiene columbio y tantalio, los cuales son formadores de carburos más fuertes que el cromo.

Agrietamiento en caliente

La composición química de la mayor parte de los metales de aporte para aceros inoxidable austeníticos esta formulada para contener, en el metal de soldadura fundido, aproximadamente del 3 al 18% de ferrita δ , con el propósito de evitar el agrietamiento en caliente que se presenta en metales de soldadura completamente austeníticos.

Este agrietamiento es causado por compuestos metálicos de azufre y fósforo de bajo punto de fusión, los cuales tienden a penetrar en los límites de grano y provocar las grietas mientras el metal de soldadura se enfría y se desarrollan los esfuerzos de contracción.

Existen varias teorías para explicar los efectos benéficos de la ferrita δ en los metales de soldadura de los aceros inoxidable, las principales son las siguientes: el fósforo y el azufre tienen mas alta solubilidad en la ferrita que en la austenita, por lo que esta actúa como un vertedero preferencial de las impurezas que promueven el agrietamiento; los metales de soldadura que contienen ferrita δ tienen un intervalo mas pequeño de temperatura de solidificación; el coeficiente de expansión térmica de la ferrita es menor que el de la austenita, por lo que la presencia de ferrita

reduce los esfuerzos de contracción; las micro-estructuras de dos fases inhiben la propagación de las grietas más efectiva que las micro-estructuras de una sola fase.

El contenido de ferrita δ de los metales de soldadura de los aceros inoxidable austeníticos puede predecirse a partir de la composición química de los depósitos de soldadura, por medio de los diagramas, de constitución desarrolladas en base a relaciones empíricas. El primero de estos diagramas fue desarrollado por Schaeffler en 1949 y a partir de entonces se han elaborado varios más, como el de DeLong (en 1956) y el de Kotecki y Siewert (en 1992). El contenido de ferrita también puede ser determinado prácticamente por medio de instrumentos magnéticos.

Si bien el agrietamiento en caliente puede evitarse ajustando la composición de los metales base y de aporte para obtener micro-estructuras con ferrita delta en la matriz austenítica, la cantidad de ferrita normalmente no debería ser mayor que la necesaria para evitar el agrietamiento (y en algunos casos debe evitarse o minimizarse, a pesar del riesgo de agrietamiento), ya que su presencia puede reducir la resistencia a la corrosión en ciertos medios, y los excesos de ferrita reducen la ductilidad y la tenacidad.

Formación de fase sigma

Los aceros inoxidable austeníticos con ferrita delta y altos contenidos de cromo y molibdeno, si son mantenidos por periodos largos a temperaturas entre 750 y 850°C, en su micro-estructura puede formarse un componente duro y frágil llamado fase sigma, la cual reduce la resistencia a la corrosión. Este problema es mayor en aceros en los que han precipitado carburos de cromo, y también se presenta en los aceros inoxidable estabilizados, particularmente si el elemento de estabilización usado es el niobio.

Es conveniente apuntar que las consideraciones precedentes acerca de la metalurgia y la soldadura de los aceros inoxidable austeníticos son superficiales, que fueron analizadas de una manera simplificada y que muchos aspectos de interés, tales como la selección de metales de aporte, no fueron considerados y, por otra parte, tampoco se analizaron los aspectos claves de soldadura de los otros grupos de aceros inoxidable.

Lo anterior se debe a que estos temas son demasiado extensos y especializados ya que están fuera de las posibilidades de este texto, pero se juzgo pertinente que además de la metalurgia de la soldadura de los aceros al carbono y de baja aleación -que fue tratada con mayor amplitud, aunque de manera incompleta-, de debieron incluir algunas consideraciones sobre la soldadura de otras aleaciones, con la finalidad de mostrar al lector la necesidad de consultar las obras especializadas correspondientes.

Capítulo 05

PROCESOS DE SOLDADURA

Contenidos:

DESCRIPCIÓN

PÁGINA

Introducción
Generalidades
Procesos de soldadura y métodos de aplicación
Naturaleza del arco eléctrico
Proceso de soldadura SMAW
Variables específicas
Condiciones de almacenamiento y secado de electrodos
Consumibles, especificaciones y clasificaciones
Proceso de soldadura GMAW
Variables específicas
Consumibles, especificaciones y clasificaciones
Proceso de soldadura FCAW
Variables específicas
Consumibles, especificaciones y clasificaciones
Proceso de soldadura GTAW
Variables específicas
Consumibles, especificaciones y clasificaciones
Proceso de soldadura PAW
Variables específicas
Consumibles, especificaciones y clasificaciones
Proceso de soldadura SAW
Variables específicas
Consumibles, especificaciones y clasificaciones

Procesos de soldadura y métodos de aplicación

Con el propósito de establecer un marco de referencia útil para ubicar los procesos de soldadura y sus métodos de aplicación en el contexto de la inspección, a continuación se presenta la Carta Maestra de los Procesos de Soldadura de la AWS (Figura 5.1 y Tabla 5.1), las características propias de cada método de aplicación (Figura 5.2) y cuales de estos son aplicables a algunos procesos (Figura 5.3).

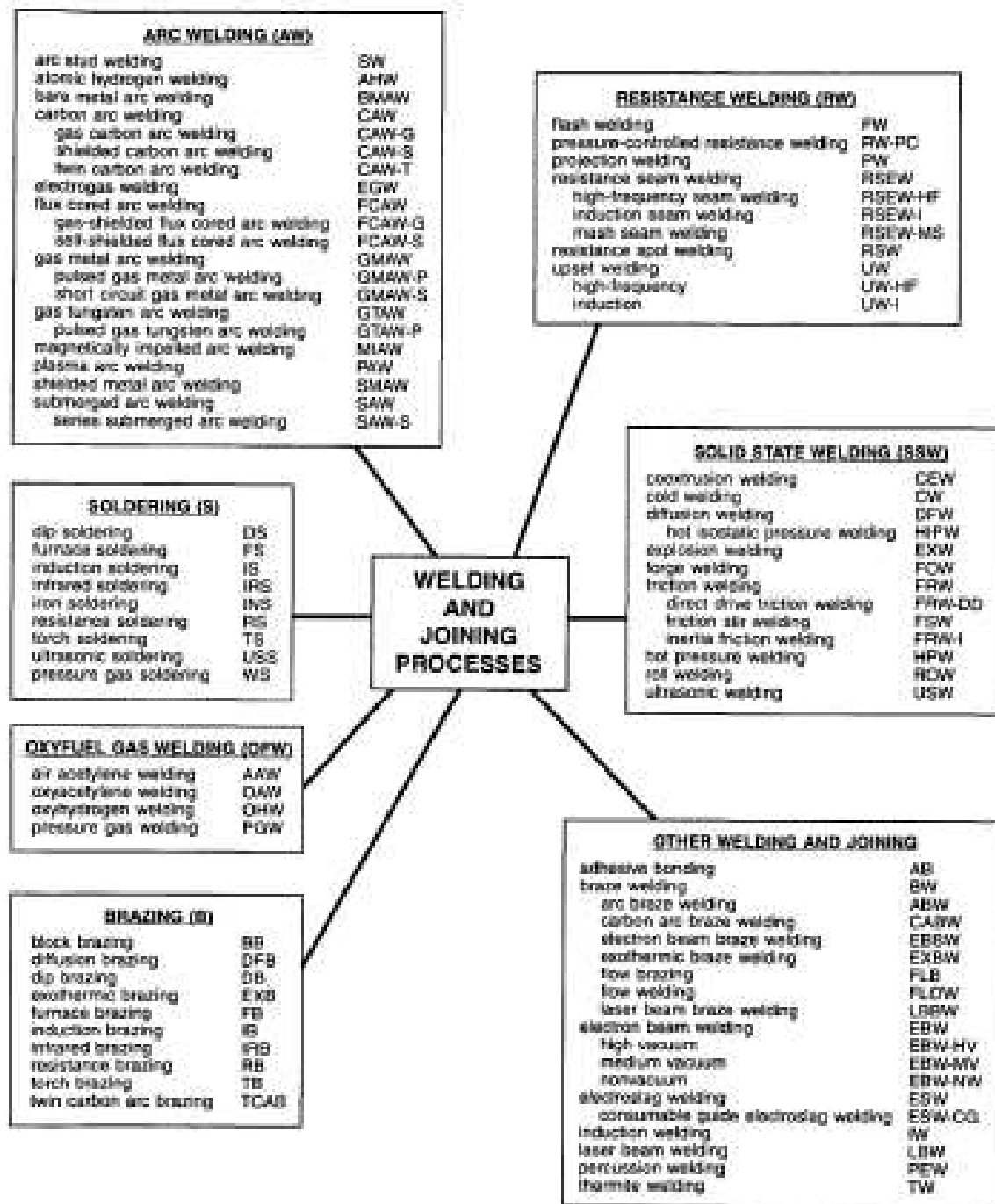


Figura 5.1-Carta Maestra de los Procesos de Soldadura (de acuerdo con la Norma ANSI/AWS A3.0-94, "Términos y Definiciones Estándares de Soldadura")

SOLDADURA POR ARCO (ARC WELDING – AW)

Soldadura con hidrogeno atómico.....	AHW
Soldadura con hidrogeno.....	BMAW
soldadura.de arco con electrodo de carbón.....	CAW
soldadura de arco con electrodo de carbón y gas.....	CAW-G
Soldadura por arco con electrodo de carbón protegido.....	CAW-S
Soldadura por arco con electrodos gemelos de carbón.....	CAW-T
Soldadura pon electro-gas.....	EGW
Soldadura por arco con electrodo tubular.....	FCAW
Soldadura por arco metálico protegido con gas.....	GMAW
Soldadura por arco metálico pulsado protegido por gas.....	GMAW-P
Soldadura de arco metálico en corto circuito protegido con gas.....	GMAW-S
Soldadura por arco de tungsteno protegido con gas.....	GTAW
Soldadura por arco pulsado de tungsteno protegido con gas.....	GTAW-P
Soldadura por arco de plasma.....	PAW
Soldadura por arco metálico protegido con electrodo recubierto.....	SMAW
Soldadura de pernos por arco eléctrico.....	SW
Soldadura por arco sumergido.....	SAW
Soldadura por arco sumergido en serie.....	SAW-S

SOLDADURA EN ESTADO SÓLIDO (SOLID-STATE WELDIGN-SSW)

Soldadura de coextrusión.....	CEW
Soldadura en frío.....	CW
Soldadura por difusión.....	DFW
Soldadura por explosión.....	EXW
Soldadura por forja.....	FOW
Soldadura por fricción.....	FRW
Soldadura por presión en caliente.....	HPW
Soldadura por rodillos.....	ROW
Soldadura por ultrasonido.....	USW

Tabla 5.1- Procesos de soldadura (de acuerdo con la norma ANSI/AWS A 3.0- 94, “términos y defecciones estándar de soldadura)

SOLDADURA FUERTE (BRAZING-B)

Soldadura fuerte exotérmica.....	EXB
Soldadura fuerte por bloque.....	BB
Soldadura fuerte por difusión.....	DFB
Soldadura fuerte por inmersión.....	DB
Soldadura fuerte por flujo.....	FLB
Soldadura fuerte por horno.....	FB
Soldadura fuerte por inducción.....	IB
Soldadura fuerte por rayos infrarrojos.....	IRB
Soldadura fuerte por resistencia.....	RB
Soldadura fuerte por flama (con antorcha).....	TB
Soldadura fuerte por arco con electrodos gemelos de carbono.....	TCAB

Soldadura blanda (soldering - s)

Soldadura blanda por inmersión.....	DS
Soldadura blanda en horno.....	FS
Soldadura blanda por inducción.....	IS
Soldadura blanda por rayos infrarrojos.....	IRS
Soldadura blanda con hierro.....	INS
Soldadura blanda por resistencia.....	RS
Soldadura blanda por flama (con antorcha).....	TS
Soldadura blanda por ultrasonido.....	USS
Soldadura blanda por agitación.....	WS

Tabla 5.1- Procesos de soldadura (continuación)

OTROS PROCESOS DE SOLDADURA

Soldadura por haz de electrones.....	EBW
Soldadura por haz de electrones en alto vacio.....	EBW-HV
Soldadura por haz de electrones al medio vacio.....	EBW-MV
Soldadura por haz de electrones sin vacio.....	EBW-NV
Soldadura por electro-escoria.....	ESW
Soldadura por flujo.....	FLOW
Soldadura por inducción.....	IW
Soldadura por haz laser.....	LBW
Soldadura por percusión.....	PEW
Soldadura por aluminotermia.....	TW

SOLDADURA POR RESISTENCIA (RESISTANCE WELDING-RW)

Soldadura por chispa.....	ASP
Soldadura por proyección.....	FLSP
Soldadura por resistencia.....	RSEW
Soldadura por resistencia con alta frecuencia.....	RSEW-HF
Soldadura por resistencia con inducción.....	RSEW-I
Soldadura por resistencia.....	RSW
Soldadura por recalcado.....	UW
Soldadura por recalcado con alta frecuencia.....	UW-HF
Soldadura por recalcado con inducción.....	US-I

ROCIADO TÉRMICO (THERMAL SPRAYING-THSP)

Rociado por arco eléctrico.....	ASP
Rociado por flama.....	FLSP
Rociado por plasma.....	PSP

SOLDADURA CON GAS OXI-COMBUSTIBLE (OXIFUEL GAS WELDING-OFW)

Soldadura por aire acetileno.....	AAW
Soldadura por oxi- acetileno.....	OAW
Soldadura por con oxi-hidrogeno.....	OHW
Soldadura con gas a presión.....	PGW

Tabla 5.1- Procesos de Soldadura (continuación)

CORTE POR ARCO (ARC CUTTING-AC)

Corte por arco con el electrodo de carbón y aire.....	CAC-A
Corte por con arco de electrodo de carbón.....	CAC
Corte por arco metálico protegido con gas.....	GMAC
Corte por arco de tungsteno protegido con gas.....	GTAC
Corte por arco de plasma.....	PAC
Corte por arco metalito protegido con electrodo recubierto.....	SMAC

CORTES POR OXIGENO LOS PROCESOS INCLUIDOS EN ESTE GRUPO SON:

Corte con fundente químico.....	FOC
Corte con polvos metálicos.....	POC
Corte con gas oxi-combustible.....	OFC
Corte con oxiacetileno.....	OFC-A
Corte con oxi-hidrogeno.....	OFC-H
Corte con oxi-gas natural.....	OFC-N
Corte con oxi-propano.....	OFC-P
Corte con arco y oxígeno.....	AOC
Corte con lanza de oxígeno.....	LOC

OTROS CORTES

Corte por haz de electrones.....	EBC
Corte por haz láser.....	LBC
Corte por haz láser y aire.....	LBC-A
Corte por haz láser evaporativo.....	LBC-EV
Corte por haz láser con gas inerte.....	LBC-IG
Corte por haz láser con oxígeno.....	LBC-O

Tabla 5.1- Procesos de soldadura (continuación)

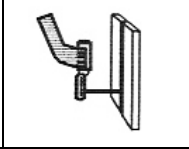
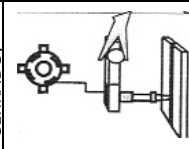
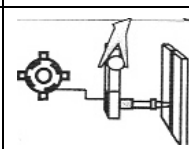
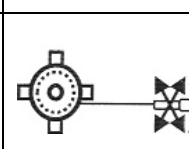
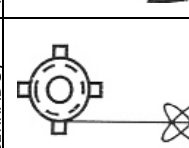
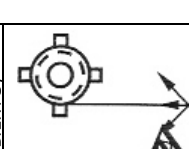
Método de Aplicación →	MA MANUAL (CIRCUITO CERRADO)	SE - SEMIAUTOMÁTICO (CIRCUITO CERRADO)	ME - MECANIZADO (CIRCUITO CERRADO)	AU - AUTOMÁTICO (CIRCUITO CERRADO)	AD - CONTROL ADAPTABLE (CIRCUITO CERRADO)	RO - ROBOTIZADO (CIRCUITO CERRADO O ABIERTO)
Función y elementos de soldadura por arco						
Iniciar y mantener el arco	Persona	Máquina	Máquina	Máquina	Máquina (con sensor)	Máquina (Robot)
Alimentar el electrodo al arco	Persona	Máquina	Máquina	Máquina	Máquina	Máquina
Controlar el calor para la penetración adecuada	Persona	Persona	Máquina	Máquina	Máquina (con sensor)	Máquina (Robot, sólo con sensor)
Mover el arco a lo largo de la junta (desplazamiento)	Persona	Persona	Máquina	Máquina	Máquina (con sensor)	Máquina (Robot)
Guiar el arco a través de la junta	Persona	Persona	Persona	Máquina vía trayectoria programada	Máquina (con sensor)	Máquina (Robot, sólo con sensor)
Manipular la antorcha para dirigir el arco	Persona	Persona	Persona	Máquina	Máquina (con sensor)	Máquina (Robot)
Corregir el arco para compensar desviaciones	Persona	Persona	Persona	No se corrigen, por lo que hay riesgos de discontinuidades	Máquina (con sensor)	Máquina (Robot, sólo con sensor)

Figura 5.2 – Relaciones persona-máquina para métodos de aplicación en soldadura por arco

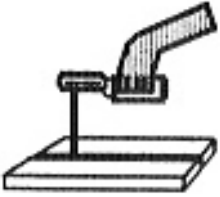
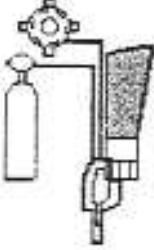
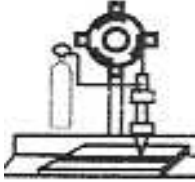

Método de aplicación →	MA - MANUAL	SA - SEMIAUTOMATICO	ME - MECANIZADO	AU - AUTMÁTICO
Procesos de soldadura ↓				
ARCO METÁLICO PROTEGIDO	EL MAS POPULAR	NO USADO	NO USADO	ESPECIAL
ARCO DE TUNSTENO PROTEGIDO CON GAS	EL MAS POPULAR	POSIBLE PERO RARO	USADO	USADO
ARCO PLASMA	EL MAS POPULAR	NO USADO	USADO	USADO
ARCO SUMERGIDO	NO ES POSIBLE	POCO USADO	EL MÁS POPULAR	POPULAR
ARCO METÁLICO PROTEGIDO CON GAS	NO ES POSIBLE	EL MAS POPULAR	USADO	POPULAR
ARCO CON ELECTRODO TUBULAR	NO ES POSIBLE	EL MAS POPULAR	USADO	POPULAR
ELECTROESCORIA	NO ES POSIBLE	POSIBLE PERO RARO	EL MÁS POPULAR	USADO
SOLDADURA FUERTE CON ANTORCHA	EL MAS POPULAR	USADO	USADO	USADO
GAS OXICOMBUSTIBLE	EL MAS POPULAR	NO USADO	POCO USADO	POCO USADO
CORTE TÉRMICO	EL MAS POPULAR	XXX---XXX---XXX	POPULAR	POPULAR

Figura 5.3 – Métodos posibles de aplicación de varios procesos de soldadura

Naturaleza del arco eléctrico

El arco es una corriente eléctrica que fluye entre dos elementos (el electrodo y la pieza de trabajo) pasando de uno al otro a través de una columna de gas ionizando llamado "plasma".

El arco de soldadura se caracteriza por su corriente alta y voltaje bajo que requiere de una alta concentración de electrones para transportar la corriente.

El espacio entre el electrodo y la pieza de trabajo puede ser dividido en tres áreas de generación de calor: el cátodo, el ánodo y el plasma producido por el arco.

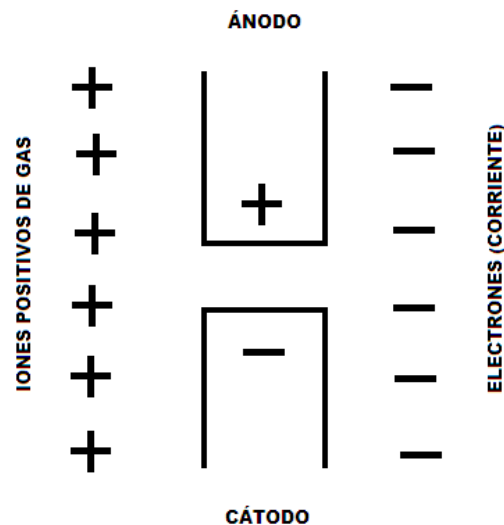


Figura 5.4- Arco eléctrico

Los electrones negativos son sometidos por el cátodo y fluyen con los iones negativos de plasma hacia el ánodo positivo. Los iones positivos fluyen en sentido contrario, sin embargo, y tal como sucede en un conductor sólido, el flujo principal de corriente se debe al paso de electrones.

El calor que se genera en el área del cátodo es producido principalmente por el choque de los iones en la superficie de mismo.

El calor producido en el área del ánodo es producido principalmente por los electrones que son acelerados por el voltaje del arco cuando pasan a través del plasma y ceden su energía en forma de calor al chocar contra el ánodo.

La columna del arco, conocida como plasma, es una mezcla de átomos de gases neutros e ionizados en un movimiento acelerado y en constante colisión.

La distribución del calor y la caída del voltaje en las tres zonas pueden ser modificadas por los siguientes aspectos:

- cambios en el gas de protección

- adición de sales de potasio en el recubrimiento de los electrodos, la cual reduce el voltaje del arco, ya que el potasio incrementa la ionización

-variación en la longitud del arco. Por ejemplo, al soldar aluminio con el proceso GTAW y argón como gas de protección, el ánodo genera más calor que el cátodo, mientras que en el arco sumergido, el cátodo suele generar más calor que el ánodo. Esto también es válido para electrodos de tipo E-XX10, en el proceso SMAW.

-Variación de la temperatura del arco de soldadura. Los valores medidos en las temperaturas oscilan entre unos 5300°C y 30000°C, dependiendo de la corriente de este y la naturaleza del plasma. En el proceso de SMAW, las siguientes temperaturas máximas que se obtienen son de aproximadamente 6250°C, mientras que en los arcos de gas inerte puro, la temperatura axial es cercana a los 30000°C la temperatura que puede obtenerse en los arcos está limitada por las pérdidas de calor (por conducción, difusión, radiación, y convección) más que por algún límite teórico. Los puntos de fusión de algunos metales y otras temperaturas de interés se muestran en la figura 5.5.



Figura 5.5 - Algunas temperaturas de interés para la soldadura

Protección del arco

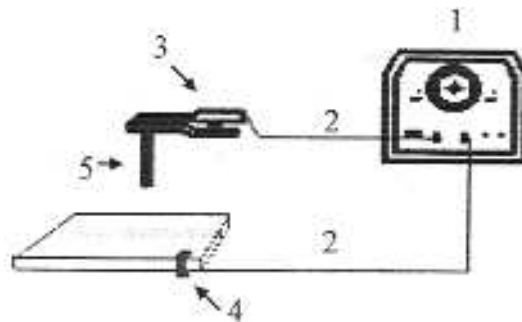
Cuando los metales se encuentran a altas temperaturas y en contacto con el aire, reaccionan químicamente con el oxígeno y el nitrógeno que se encuentra en la atmósfera, y forman óxidos y nitruros.

De suceder esto en las operaciones de soldadura, los óxidos y nitruros que se formarían al solidificar el metal, dañarían drásticamente la resistencia mecánica de la junta, por lo que es necesario cubrir el arco y al metal fundido con gases, vapores o escorias protectoras, a esto se le denomina la protección de arco misma que puede realizarse por el medio de varias técnicas, como el uso de recubrimientos generadores de vapores en los electrodos, adiciones externas de gases de protección o de fundentes granulares y el empleo de materiales, en el núcleo de electrodos tubulares, que generan los vapores protectores.

Además de proteger el arco y el metal fundido, los recubrimientos y fundentes de soldadura tienen otras funciones que son las siguientes: proporcionar elementos de aleación al metal de soldadura fundido, suministrar ingredientes que reaccionan, en el estado líquido, con sustancias que perjudican a la soldadura, y que al combinarse forman una escoria menos densa que el metal fundido, por lo que flotan hacia la superficie y al enfriarse forman la escoria. Esta protege a los cordones solidificados (aún calientes) del contacto con el aire, evitando reacciones y enfriamientos bruscos.

CIRCUITO BASICO DE LA SOLDADURA

El circuito básico de la soldadura por arco se ilustra en la siguiente figura:



- (1) Fuente de energía de corriente alterna
- (2) Cables
- (3) Porta electrodo
- (4) Grapas para conexión a la pieza de trabajo
- (5) Electrodo

Figura 5.6 - Circuito básico de la soldadura en una maquina de corriente alterna.

Polaridad

El término polaridad se emplea para indicar la conexión eléctrica del electrodo a las terminales de las fuentes de energía de corriente directa. Cuando el cable del electrodo se conecta a la Terminal positiva de la fuente, la polaridad se designa como corriente directa del electrodo positivo, o también, de manera arbitraria, polaridad invertida; cuando el cable del electrodo se conecta a la Terminal negativa de la máquina, la polaridad se designa como corriente directa del electrodo negativo, y originalmente como polaridad directa, por el hecho de que los electrones fluyen del polo negativo hacia el positivo.

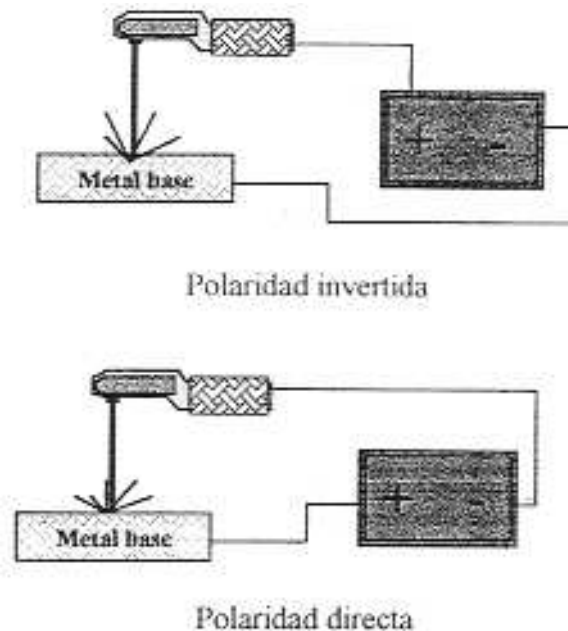


Figura 5.7- Polaridad

En la mayoría de los procesos de soldadura, la polaridad tiene el siguiente efecto sobre la penetración: la polaridad invertida está asociada con una mayor penetración que la polaridad directa. De manera sencilla y no completamente precisa (y para el caso del proceso de arco metálico protegido con electrodo recubierto, sin considerar el efecto del tipo de electrodo) el efecto de la polaridad sobre la penetración y la distribución del calor durante la soldadura se representa en la siguiente figura.

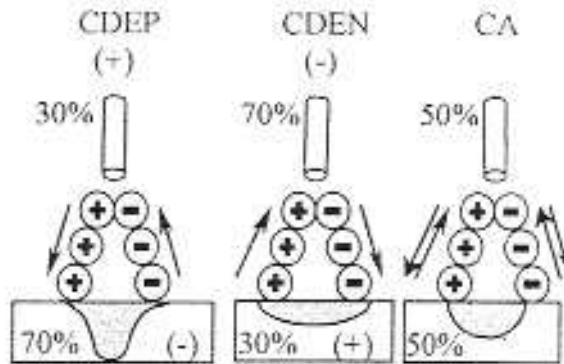


Figura 5.8 - Efecto de la polaridad sobre la penetración y la distribución de calor en la mayoría de los procesos de soldadura

En el caso del proceso de soldadura por el arco de tungsteno protegido con gas, el efecto de la polaridad sobre la penetración es opuesto a lo considerado anteriormente para los otros procesos. Este efecto se ilustra en la siguiente figura.

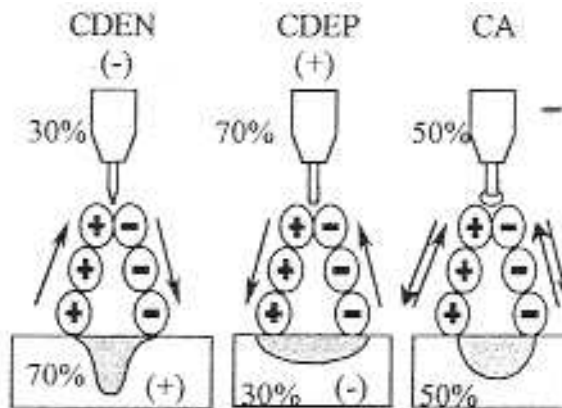


Figura 5.9 - Efecto de la polaridad sobre la penetración y distribución del calor en el proceso GTAW

Fuentes de energía para soldadura por arco

Se requiere de varios tipos de fuente de energía para satisfacer las exigencias eléctricas de los diversos procesos y procedimientos de soldadura. La elección correcta de las fuentes depende, en primer termino, de los requerimientos del proceso y del procedimiento de soldadura a emplear. Otros factores que se deben considerar incluyen aspectos tales como requerimientos futuros, mantenimiento, consideraciones económicas, facilidad de transporte el entorno, disponibilidad, seguridad, y la disponibilidad del personal entrenado.

El voltaje suministrado para fines industriales por las compañías eléctricas es demasiado alto para usarse directamente en la soldadura por arco, por lo que la primer función de las maquinas soldadoras es reducir el voltaje de entrada o de línea a un intervalo de voltaje de salida apropiado, y una corriente adecuada, que generalmente oscila a de menos de 10 a 1500 amperios o más.

Las fuentes de energía se clasifican por el tipo de corriente (alterna o directa) que suministran, y de acuerdo con su salida de voltaje, el cual puede ser variable o constante. También pueden clasificarse en base a la forma en que la energía se suministra a la fuente. Directamente de la línea de energía o a través de un motor eléctrico, o por medio de motores de gasolina o diesel.

Las maquinarias para soldar que suministran corriente alterna son conocidas como transformadores y constan básicamente de dos bobinas y un reactor móvil. La bobina o devanado de alta tensión es llamada primario y la de baja tensión secundaria. El transformador recibe la corriente alterna de alto voltaje y bajo amperaje de la línea de energía y la transforma en una corriente de bajo voltaje y alto amperaje. Las relaciones significativas entre las vueltas de los devanados y los voltajes y amperajes de entrada y salida están expresadas por la siguiente formula:

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{I_2}{I_1}$$

Donde:

- N_1 = Número de vueltas del devanado primario del transformador.
- N_2 = Número de vueltas del devanado secundario del transformador.
- E_1 = Voltaje de entrada.
- E_2 = Voltaje de salida
- I_1 = Corriente de salida (Carga)
- I_2 = Corriente de entrada

Las maquinarias de corriente directa producen esta a partir de la energía de la línea de corriente alterna, a través de un motor eléctrico que mueve un generador de corriente directa (generadores) o a través de un transformador provisto de un rectificador (rectificadores). La corriente directa también puede ser producida por generadores de corriente directa movido por un motor de combustión interna; los motores de combustión también pueden ser usados para producir corriente alterna si se emplea un alternador en vez de un generador.

También existen maquinas que suministran corriente alterna y corriente directa. Estas son básicamente arreglos del transformador y rectificador.

Las maquinarias para soldar, como se mencionó anteriormente, también se clasifican en maquinas de voltaje variable (también llamadas de corriente constante) y maquinas de voltaje constante (corriente variable). Una maquina de voltaje variable es aquella que suministra una corriente que varia solo de manera ligera con los cambios de longitud de arco (voltaje), y de una maquina de voltaje constante es aquella que entrega corriente de soldadura con variaciones mínimas de voltaje cuando la corriente de salida varia. Las siguientes figuras muestran las curvas características de cada uno de estos tipos de maquinas de soldar.

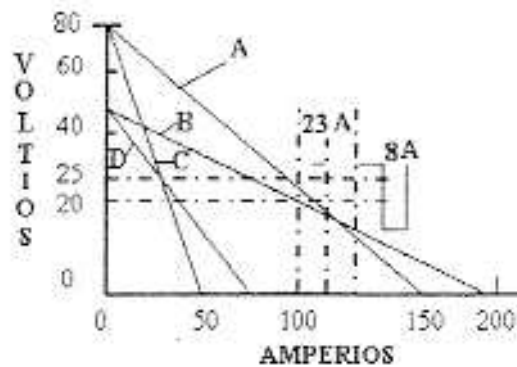


Figura 5.10 - Características típicas VA de una fuente de corriente constante con voltaje ajustable de circuito abierto

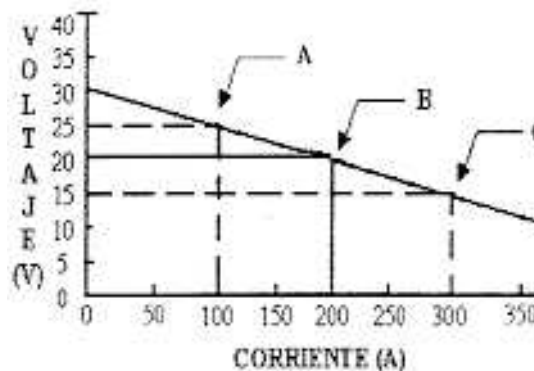


Figura 5.11- Relaciones de salida VA para un maquina de voltaje constante

Las dos figuras anteriores muestran las curvas voltio-amperio (VA) de salida de máquinas de corriente constante, respectivamente. Un juego de curvas características de voltaje de salida Vs corriente de salida es empleado para describir las características estáticas de operación de máquinas de soldar. Estas características, conjuntamente con las dinámicas, determinan la efectividad de su operación, y afectan su comportamiento.

Las maquinarias de voltaje variable son usadas en los procesos de soldadura por arco metálico protegido, arco de tungsteno protegido con gas, y para mayor parte de aplicaciones de arco sumergido. Las maquinarias de voltaje constante son empleadas para los procesos de arco metálico protegido con gas, arco metálico con electrodo tubular y algunas aplicaciones de arco sumergido, y su uso está asociado al empleo de metales de aportes de diámetros pequeños, generalmente hasta unos 3/32” .

Ciclo de trabajo

Las máquinas de soldadura por arco son clasificadas de acuerdo con su corriente de salida a un voltaje y a un ciclo de trabajo determinado. Esta clasificación generalmente es establecida por los fabricantes del equipo de acuerdo con las normas de la NEMA (National Electrical Manufacturer Association) y están dadas en términos de un porcentaje de ciclo de trabajo (duty cycle); el ciclo de trabajo de una máquina de soldar es el porcentaje del periodo de tiempo (10 minutos, por ejemplo) que pueda operar a una corriente de soldadura establecida. Así, una máquina clasificada de 300 Amperios a un ciclo de trabajo de un 60%, significa que la máquina puede operarse seguramente a una corriente de 300 Amperios durante 6 de cada 10 minutos. Si este ciclo de trabajo se reduce en la operación real, se podrá incrementar la corriente máxima permisible. Así, un ciclo de trabajo de un 30%, esta misma máquina de 300 Amperios podría operarse a 375 amperios.

Proceso de soldadura por arco metálico protegido con electrodo recubierto (Shielded Metal Arc Welding – SMAW)

Es un proceso de soldadura por el arco en el cual el arco produce entre un electrodo recubierto y el charco de la soldadura. La protección se obtiene a partir de la descomposición del recubrimiento, no se aplica presión y el metal de aporte procede principalmente del electrodo. También se le conoce con los nombres de “soldadura manual”, “soldadura de varilla” y la “soldadura eléctrica”. La siguiente figura ilustra de manera esquemática la operación de este proceso.

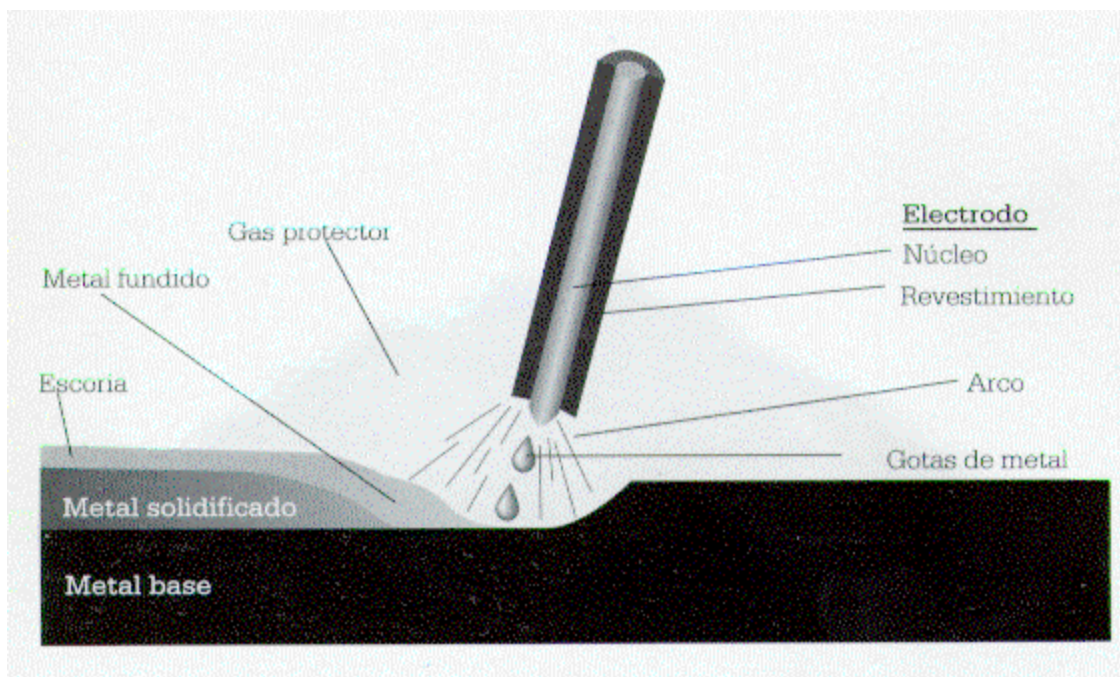


Figura Nº 5.12 Proceso de soldadura por arco metálico protegido

Funciones del núcleo metálico

Las principales funciones del núcleo o alma metálica del electrodo son:

- Conducir la corriente eléctrica para establecer el arco con el metal base.
- Suministrar la totalidad o la mayor parte del metal de aporte.

Funciones del revestimiento de fundente del electrodo

Las funciones mas importantes del revestimiento se listan a continuación:

- Suministrar la atmósfera protectora al arco y el charco de metal.
- Suministrar agentes desoxidables y limpiadores al metal de soldadura fundido.

- Formar una capa de escoria para proteger el metal fundido y evitar enfriamientos bruscos y oxidación del metal solidó caliente.
- Suministrar elementos de aleación al metal de soldadura.
- En algunos electrodos, suministrar parte del metal de aporta, en forma de polvo de hierro.
- Fijar característica de operación tales como tipo de corriente y la polaridad con que deben ser empleados los diferentes tipos de electrodo, así como la profundidad de la penetración, la posición de soldadura y otras características.
- Estabilizar el arco.

Equipo de soldadura

El equipo básico empelado en este proceso consiste en una fuente de energía, cables, porta electrodo y grapa para conexión a la limpieza de trabajo.

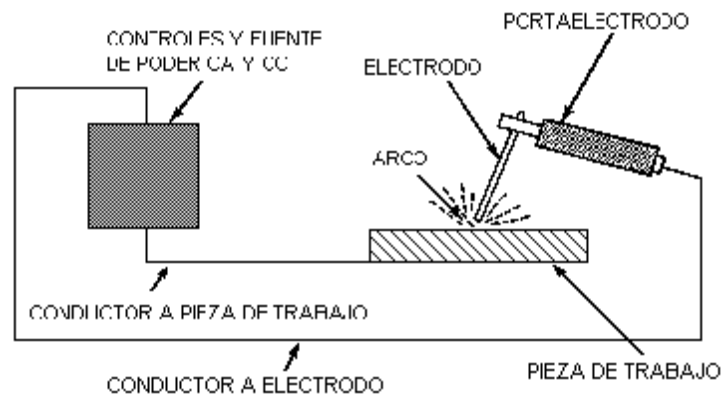


Figura 5.13 - Equipo para el Proceso de Soldadura por Arco Metálico Protegido.

Fuente de energía

El proceso SMAW requiere fuentes de energía o poder de voltaje variable (corriente constante) que suministren corrientes de 10 a 500 Amperios y voltaje de 17 a 45 Voltios, dependiendo del tipo y tamañas del electrodo a usarse.

Pueden emplearse equipos de corriente alterna (CA) o de corriente directa (CD), y pueden usarse polaridades invertida (electrodo positivo) y directa (electrodo negativo).

Porta electrodo

El porta electrodo sirve para mantener estable al electrodo, poder manipularlo y para transferir la corriente de soldadura del mismo.

Cables

Los cables de soldadura y conectores conectan la fuente de energía al porta electrodo y a la pieza de trabajo. Estos cables normalmente son hechos de cobre o aluminio. El cable consiste en cientos de alambres finos que son trenzados y aislados en forma natural dentro de un recubrimiento sintético.

Métodos de aplicación

El método de aplicación que se emplea en este proceso es manual, no se emplean los métodos semiautomáticos ni mecanizados y es susceptible a emplearse el método automático, mismo que se usa de manera limitada.

Aplicaciones, limitaciones y ventajas

El método es más ampliamente usado de los procesos de soldadura por arco debido a su versatilidad, portabilidad, equipo relativamente sencillo y barato.

Se emplea en talleres pequeños y grandes, para reparación de diversos componentes, así como la fabricación industrial, construcción y montaje de estructuras de acero y otras aplicaciones comerciales de unión de metales.

Se emplea para soldar aceros al carbono y de baja aleación, aceros inoxidables, aluminio y sus aleaciones, cobre y sus aleaciones, níquel y sus aleaciones, hierros colados y también para aplicar recubrimientos superficiales.

Sus principales ventajas, además de las ya mencionadas son las siguientes:

- Puede emplearse en cualquier posición (dependiendo del electrodo utilizado).
- Puede emplearse en campo y en taller.
- Es aplicable a un intervalo amplio de espesores (aproximadamente de 1.2mm en adelante).
- Los electrodos pueden doblarse de manera que pueden ser usados en áreas ciegas.
- Se pueden emplear cables largos para tener accesos a sitios ubicados a gran distancia de la fuente de energía.
- Es útil para soldar ensambles estructurales complejos.
- Es el proceso más popular para soldar tubos.
- Se pueden obtener uniones de alta calidad y alta resistencia.

Las principales limitaciones son las siguientes:

- La calidad de las uniones dependen gran medida de la habilidad del personal.
- La escoria debe ser removida completamente antes de aplicar el siguiente paso.
- Debido a que los electrodos tienen una longitud fija, las operaciones deben detenerse después de que se consume cada electrodo.
- Tiene una eficiencia de propósito relativamente baja.
- La porción del electrodo que se sujeta al material o porta electrodo no se aprovecha.
- No puede ser usado para soldar algunos metales no ferrosos.

- No pueden emplearse amperajes altos (como los que emplean en las aplicaciones automáticas y semiautomáticas), debido a la longitud larga (y su variación) entre el arco y el punto de contacto eléctrico en la porta electrodo. La corriente de soldadura esta limitada por calentamiento por resistencia del electrodo y por el hecho que la temperatura del electrodo no debe exceder la de la desintegración del recubrimiento: si esta temperatura es demasiado alta, los agentes químicos del recubrimiento reaccionan unos con otros o con el aire y se deterioran a su capacidad de protección

Variables específicas

Las variables particulares mas relevantes de este proceso están asociadas con las características eléctricas y las posiciones en que pueden usarse los diferentes tipos de electrodo; estos aspectos están definidos por la clasificación, misma que se describe y detalla en la tabla 5.2 y más adelante en esta sección.

Algunas de estas variables están definidas con el cuarto (o quinto) dígito de la clasificación, mismo que indica las características de la corriente a emplear y el tipo de recubrimiento del electrodo.

La tabla 5.2 indica de manera clara, para cada clasificación de electrodo, que clase de recubrimiento tiene, con que tipo de corriente y polaridad debe emplearse y la profundidad de la penetración con que esta asociado, entre otros aspectos.

Existe una serie de factores y variables adicionales relacionados con el tipo de recubrimiento y la clasificación de cada electrodo. Entre estos pueden señalarse las propiedades mecánicas (del deposito del electrodo y del metal base en que se van a emplear), la eficiencia de producción(por ejemplo si el electrodo esta diseñado para altas tasas deposito), el espesor y la forma del metal base a soldar y la longitud y el diámetro del electrodo; todos estos factores influyen en la calidad de las uniones soldadas y constituyen la base para realizar una selección adecuada de los electrodos, pero estos aspectos están mas estrechamente vinculadas con el punto de vista de ingeniería de soldadura, por lo que no se consideran mas en este texto.

Intensidad de la corriente de soldadura

Cada fabricante de electrodos establece cuales son los intervalos de amperaje en que estos deben usarse, pero existe una guía empírica, misma que no es muy precisa, para establecer la corriente de soldadura: emplearan amperio por cada milésima de pulgada de diámetro del electrodo.

De acuerdo con lo anterior, un electrodo 1/8" (0.125") de diámetro requiere una corriente de 125 Amperios. Pero como se menciono anteriormente, esto es solo una guía, ya que si se tratara de un electrodo E-6010 (de 1/8"), que tiene polvo de hierro en su revestimiento, la corriente a emplear seria de unos 100 a 170 Amperios, dependiendo de si se emplea corriente directa o corriente alterna.

Condiciones de almacenamiento y secado de los electrodos

Algunos electrodos, tales como el E6010 y el E6011 requieren, para funcionar adecuadamente, tener de un 3 a 7% de humedad en sus revestimientos. Por otra parte, los ingredientes de los revestimientos y de los compuestos que se emplean para aglomerarlos, tienen afinidad por la humedad del medio ambiente y se combinan con esta higroscópicamente.

En el momento de soldar, el hidrogeno proveniente de esta humedad causa efectos adversos en algunos aceros bajo ciertas condiciones. Para las aplicaciones en las que se resulta perjudicada el hidrogeno, se formularon específicamente grupos de electrodos llamados de “bajo hidrogeno”.

El ultimo designador (digito) de la clasificación de los electrodos de bajo hidrogeno es 5, 6 u 8 y sus revestimientos están hechos de componentes inorgánicos que contienen una humedad mínima. Estos electrodos están diseñados para producir depósitos de soldadura con muy bajos niveles de hidrogeno, y el contenido de humedad (en las condiciones que los suministra el fabricante o después de reacondicionados), dependiendo de su clasificación, debe ser 0.6% como máximo (0.15% para algunos).

Debido a las consideraciones anteriores, es necesario que cada tipo de electrodo sea almacenado, tratado y manejado en las condiciones especificas apropiadas. Cada fabricante establece las condiciones adecuadas de almacenamiento y secado de los electrodos recubiertos que suministra, y la Tabla No. A2 del apéndice de la Especificación AWS A5.1 indica estas condiciones típicas.

La tabla 5.4 de este texto reproduce la información básica contenida en la tabla A2 mencionada, pero es conveniente anotar que con respecto al almacenamiento y los periodos máximos de exposición de los electrodos al medio ambiente, pueden existir algunos requisitos adicionales muy rigurosos.

Entre este tipo de requisitos pueden citarse los estipulados con el Código de Soldadura Estructural para Acero ANSI/AWS D1.1, en su Sección “Fabricación” tales requisitos (párrafos 5.3.2.2 y 5.3.2.3 y Tabla No. 5.1) se refieren a los periodos aprobados y a los periodos alternativos establecidos por pruebas para la exposición de los electrodos a la atmósfera.

Consumibles, especificaciones y clasificaciones

Para los electrodos empleados en este proceso, las especificaciones AWS que aplican son las siguientes:

- AWS A5.1 para electrodos de acero al carbono
- AWS A5.3 para electrodos de aluminio y sus aleaciones
- AWS A5.4 para electrodos de acero inoxidable (al Cromo y al Cromo-Níquel)
- AWS A5.5 para electrodos de acero de baja aleaciones
- AWS A5.6 para electrodos de cobre y sus aleaciones
- AWS A5.11 para electrodos de Níquel y sus aplicaciones
- AWS A5.13 para electrodos sólidos para revestimientos superficiales
- AWS A5.15 para electrodos de hierro colado
- AWS A5.21 para electrodos compuestos para revestimientos superficiales.

El sistema de clasificación de los electrodos recubiertos sigue el modelo empleado en las otras especificaciones AWS para metales de aporte. Tal sistema se ilustra en la figura 5.14.

CLASIFICACIÓN*	POSICIONES
EXX1X	Plana, horizontal, vertical, sobre cabeza
EXX2X	Plana y para soldaduras de filete en posición horizontal
EXX4X	Plana, horizontal, sobre cabeza y vertical descendente

*En este sistema de clasificación, los dos o tres primeros dígitos indican la resistencia mínima a la tensión del metal de soldadura obtenido con el electrodo correspondiente, y el tercero (o cuarto) dígito, indica la posición de soldadura para la que cada tipo de electrodo esta diseñado.

CLASIFICACIÓN*	TIPO DE CORRIENTE USADA	PENETRACION	REVESTIMIENTO
EXXXO**	CDEP	PROFUNDA	CELULOSA, SODIO
EXXX1	CA, CDEP	PROFUNDA	CELULOSA, POTASIO
EXXX2***	CA, CDEN	INTERMEDIA	RUTILO, SODIO
EXXX3	CA, CDEP, CDEP	LIGERA	RUTILO, POTASIO
EXXX4	CA, CDEN, CDEP	LIGERA	RUTILO, POLVO DE HIERRO
EXXX5	CDEP	INTERMEDIA	BAJO HIDROGENO SODIO
EXXX6	CA, CDEP	INTERMEDIA	BAJO HIDROGENO POTASIO
EXXX7	CA, CDEN	INTERMEDIA	POLVO DE HIERRO, OXIDO DE HIERRO
EXXX8	CA, CDEP	INTERMEDIA	BAJO HIDROGENO POLVO DE HIERRO
EXXX9	CA, CDEP, CDEN	PROFUNDA	OXIDO DE HIERRO RUTILO Y POTASIO

** En este sistema de clasificación, el cuarto o quinto dígito indican las características de cada tipo de electrodo que se resumen en las columnas correspondientes.

** La excepción es el electrodo que se resumen en las columnas correspondientes.

*** El electrodo E6022 esta diseñada para soldaduras de paso sencillo, para soldar en posición plana y horizontal con CA o CDEN, tiene un recubrimiento con alto contenido de oxido de hierro

CA: Corriente Alterna

CDEN: Corriente Directa, Electrodo Negativo (Polaridad Directa)

CDEP: Corriente Directa, Electrodo Positivo (Polaridad Invertida)

Tabla 5.2 – Clasificación general y algunas características de los electrodos recubiertos de acero al carbono

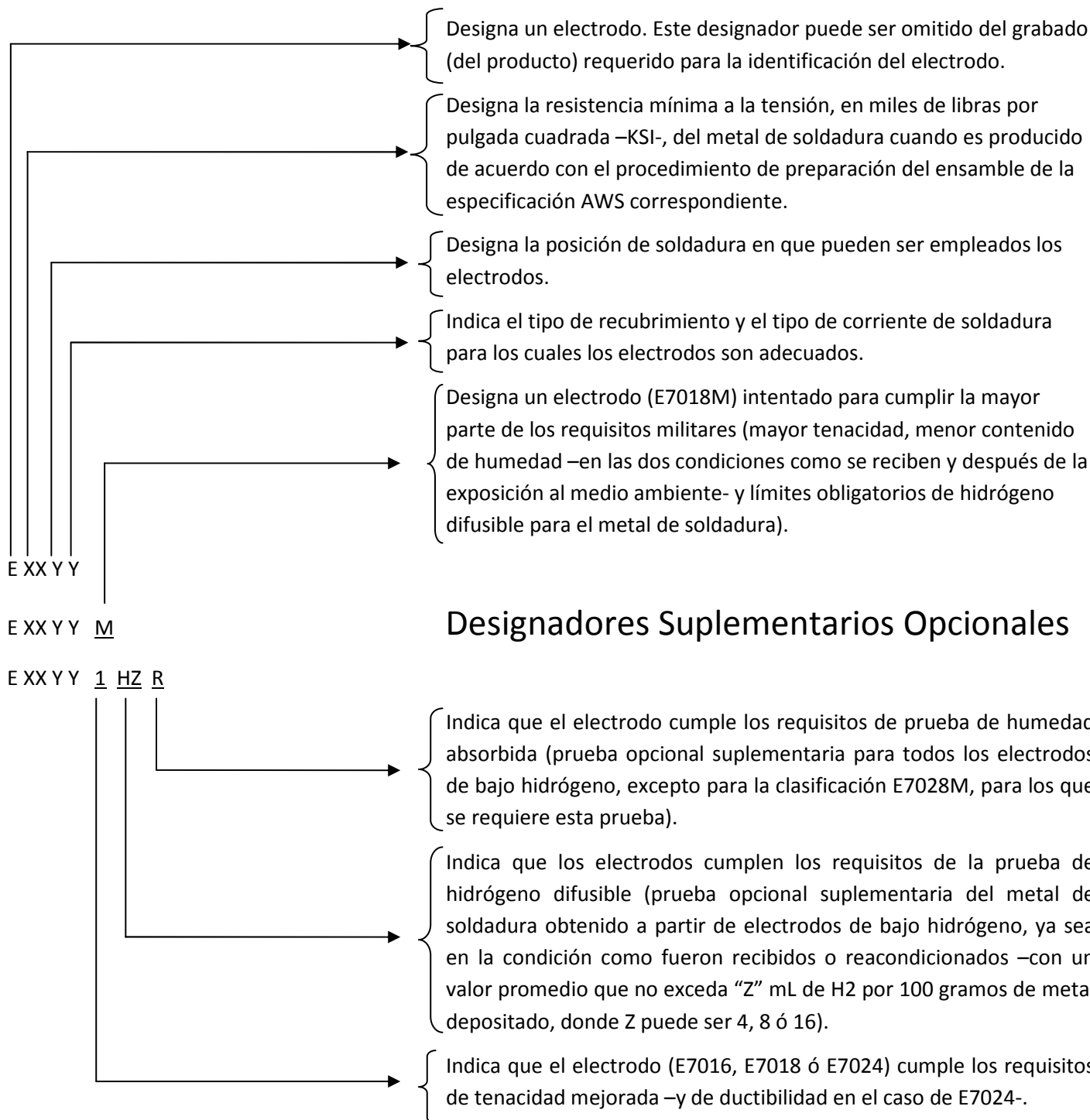


Figura 5.14 - Designadores Obligatorios y Opcionales Suplementarios y la Clasificación de los Electrodos Recubiertos de Acero al Carbono.

La tabla y la figura anteriores describen de manera detallada el sistema de clasificación que se emplea para los electrodos recubiertos de acero al carbono (especificación ANSI/AWS A5.1).

De acuerdo con tal sistema, la clasificación **E7018-1 H8 R** involucra la información siguiente:

E: Electrodo

70: Indica 70,000 libras/pulg² (PSI) de resistencia mínima a la tensión del metal de soldadura.

1: Significa que el electrodo puede usarse en posiciones planas, vertical, horizontal y sobre cabeza.

8: Revestimiento de bajo hidrogeno con potasio y polvo de hierro; electrodo para ser empleado con corriente directa electrodo positivo.

1: Indica que cumple con los requisitos de tenacidad (resistencia al impacto) mejorada (20 libras-pie a -50° F, ó 27 Joules a 47° c).

H8: Significa que le meta depositado con este electrodo contiene como máximo 8ml de H²/100 gramos de metal depositado (cuando es sometido a uno de los métodos de prueba establecidos en la norma ANSI/AWS A4.3).

R: Denota que el electrodo cumple con los requisitos de humedad absorbida.

La clasificación de los electrodos recubiertos de acero de baja aleación(especificación ANSI/AWS A 5.5) es muy parecida a la empleada para los electrodos de acero al carbono, pero adicionalmente contiene un sufijo o designador adicional que indica la composición química del metal de soldadura no diluido producido por el electrodo correspondiente, o si se trata de electrodos intentados para cumplir la mayoría de los requisitos militares o alguna otra aplicación específica.

La tabla 5.3 contiene, la manera resumida, Estos designadores.

De acuerdo con esta tabla, los designadores de la clasificación **E8018-B3L** indican lo siguiente:

80: indica que la resistencia mínima a la tensión del metal de soldadura es de 80,000 PSI.

B3L:B3 Se refiere a que la composición del metal no diluido tiene un contenido nominal de 2.25% de cromo y 1% de molibdeno; y **L** indica bajo contenido de carbono (máximo 0.05%).

La designación **E12018M** involucra la siguiente información:

120: Designa que la resistencia mínima a la tensión del metal de soldadura es de 120,000 PSI.

M: Se refiere a que el electrodo esta diseñado para cumplir la mayoría de los requisitos militares y que contiene níquel (de 1.75 a 2.50%), cromo (0.30 a 0.55%) y molibdeno (0.30 a 0.55%), también tiene vanadio como elemento adicional y un contenido relativamente elevado de manganeso.

Adicionalmente, es conveniente señalar que la designación **G** indica que el metal de aporte es una clasificación general, es decir, que no todos los requisitos particulares especificados para las otras especificaciones están estipulados para esta especificación (**G**). Las tablas de la especificación (ZWS A5.5) establecen algunos requisitos mínimos para la composición química, pero los requisitos adicionales en la composición pueden ser acordados entre el proveedor y el comprador y el comprador.

También existen algunos electrodos especialmente diseñados para soldar líneas de tubería, como el E7010-P1, electrodos para soldar aceros expuestos a corrosión debida a agentes atmosféricos, como el E8018-W2,

y electrodos para aplicaciones militares. La tabla 5.3 incluye la información correspondiente a estos electrodos.

SUFIJO	C	Mn	Si	Ni	Cr	Mo	V
A1	0,12	0,60 – 1,00	0,40 - 0,80	---	---	0,40 – 0,65	---
B1	0,12	0,90	0,60 – 0,80	---	0,40 – 0,65	0,40 – 0,65	---
B2L	0,05	0,90	0,60 – 1,00	---	1,00 – 1,50	0,40 – 0,65	---
B2	0,05 – 0,12	0,90	0,60 – 0,80	---	1,00 – 1,50	0,40 – 0,65	---
B3L	0,05	0,90	0,80 – 1,00	---	2,00 – 2,50	0,90 – 1,20	---
B3	0,05 – 0,12	0,90	0,60 – 1,00	---	2,00 – 2,50	0,90 – 1,20	---
B4L	0,05	0,90	1,00	---	1,75 – 2,25	0,40 – 0,65	---
B5	0,07 – 0,15	0,40 – 0,70	0,30 – 0,60	---	0,40 – 0,60	1,00 – 1,25	0,05
B6	0,05 – 0,10	1,0	0,90	0,40	4,00 – 6,00	0,45 – 0,65	---
B6L	0,05	1,0	0,90	0,40	4,00 – 6,00	0,45 – 0,65	---
B7	0,05 – 0,10	1,0	0,90	0,40	6,00 – 8,00	0,45 – 0,65	---
B7L	0,05	1,0	0,90	0,40	6,00 – 8,00	0,45 – 0,65	---
B8	0,05 – 0,10	1,0	0,90	0,40	8,00 – 10,50	0,85 – 1,20	---
B8L	0,05	1,0	0,90	0,40	8,00 – 10,50	0,85 – 1,20	---
B9	0,08 – 0,13	1,25	0,30	1,0	8,00 – 10,50	0,85 – 1,20	---
C1	0,12	1,25	0,60 – 0,80	2,00 – 2,75	---	---	---
C2	0,12	1,25	0,60 – 0,80	3,00 – 3,75	---	---	---
C3	0,12	0,40 – 1,25	0,80	0,80 – 1,10	0,15	0,35	0,05
C4	0,12	1,25	0,60	1,10 – 2,00	---	---	---
C5L	0,05	0,40 – 1,00	0,50	6,00 – 7,25	---	---	---
D1	0,12	1,00 – 1,75	0,90	---	---	0,25 – 0,45	---
D2	0,15	1,65 – 2,00	0,90	---	---	0,25 – 0,45	---
G	-----	1,00 mín.	0,80 mín.	0,50 mín.	0,30 mín.	0,20 mín.	0,20 mín.
M	0,10	0,60 – 2,25	0,60 – 0,80	1,25 – 2,50	0,15 – 1,50	0,25 – 0,55	0,05
M1	0,10	0,80 – 1,60	0,65	3,00 – 3,80	0,65	0,20 – 0,30	0,05
NM1	0,10	0,80 – 1,25	0,60	0,80 – 1,10	0,10	0,40 – 0,65	0,02
P1	0,20	1,20	0,60	1,00	0,30	0,50	0,10
W1	0,12	0,40 – 0,70	0,40 – 0,70	0,20 – 0,40	0,15 – 0,30	---	0,08
W2	0,12	0,50 – 1,30	0,35 – 0,80	0,40 – 0,80	0,45 – 0,70	---	Cu

NOTA: Los valores indican los límites máximos especificados.

Tablas 5.3- Requisitos de Composición Química para Metal de Soldadura no Diluido de Electrodo Recubierto de Acero de Baja Aleación.

Condiciones de Almacenamiento (a)			
Clasificación AWS	Expuestos al Aire Ambiente	En hornos Contenedores	Condiciones de Secado (b)
E6010, E6011	Temperatura ambiente	No recomendable	No recomendable
E6012, E6013, E6019, E6020, E6022, E6027, E6014, E6024, E7020	80 ± 20°F (30±10°C) Con una humedad relativa máxima del 50%	20°F (12°C) hasta 40°F (24°C) arriba de la temperatura ambiente	1 hora de temperaturas de 275 ± 25°F (135 ± 15°C)
E7015, E7016, E7018, E7028, E7018M, E7048	No recomendable	50°F (30°C) hasta 250°F (140°C) arriba de la temperatura ambiente	De 1 hasta 2 horas de temperaturas de 500° a 800°F (260° a 427°C)
<p>Notas:</p> <ul style="list-style-type: none"> a. - Después de removerlos del empaque del fabricante. b. – Debido a las diferencias inherentes en la composición de los revestimientos, debieran consultarse a los fabricantes para conocer las condiciones exactas de secado. c. Algunas de estas clasificaciones de electrodos pueden estar diseñados para cumplir los requisitos de baja absorción de humedad. Esta designación no implica que se recomiende el almacenamiento al aire libre. 			

Tabla 5.4 - Condiciones Típicas de Almacenamiento y Secado para Electrodo Recubiertos (de acuerdo con la tabla A2 de la especificación ANSI/AWS A5.1)

El sistema de clasificación para los electrodos recubiertos de acero inoxidable (considerados en la especificación ANSI/AWS A 5.4) también sigue un patrón similar al de las otras especificaciones AWS para metales aporte.

Las clasificaciones inician con la letra "E"(electrodo) seguida de tres dígitos que designan su composición química y, ocasionalmente, seguidos de otros números o dígitos para indicar una composición química específica. A estos siguen dos últimos dígitos que designan la clasificación de acuerdo con características de uso, tales como la posición de la soldadura y el tipo de corriente y la polaridad a emplear.

Así, la clasificación **E316-16** indica:

E: que se trata de un electrodo.

316: indica que el electrodo tiene la composición química especificada para el acero inoxidable 316.

16: indica que este electrodo puede usarse con CA o CDEP y en todas las posiciones (aunque los electrodos de 3/16 y los mayores no se recomienda soldar en todas las posiciones) los designadores que siguen a los tres dígitos de la composición química pueden ser:

L: que indica bajo (low) contenido de carbono (0.04% máximo).

H: indica que el contenido del carbono del metal de soldadura correspondiente esta restringido a la porción alta al vapor especificado para este elemento.

LR: se refiere a que los contenidos de elementos residuales están especificados a niveles máximos inferiores a los del grado estándar del acero inoxidable correspondiente.

Las clasificaciones también pueden incluir el símbolo químico de algún elemento, por ejemplo E308Mo, lo que indica que la posición de este metal de soldadura es el mismo que el depositado por electrodos E308, excepto por la adición del molibdeno y de una pequeña reducción en el límite del carbono.

La tabla 5.5 contiene la información relacionada con el tipo de corriente, polaridad y las posiciones de soldadura con que deben emplearse los electrodos de acero inoxidable.

Tipo de corriente y composición de soldadura		
Clasificación AWS	Corriente de soldadura	Posición de soldadura
EXXX(X)-15	CDEP	Todas
EXXX(X)-25	CDEP	Plana y horizontal
EXXX(X)-16	CDEP ó CA	Todas
EXXX(X)-17	CDEP ó CA	Todas
EXXX(X)-26	CDEP ó CA	Plana y horizontal

Nota: Los electrodos de 3/16" de diámetro y mayores no se recomiendan para todas las posiciones.

Tabla 5.5 - Posiciones y Tipos de Corriente y Polaridad para los Electrodos de Acero Inoxidable.

Proceso de Soldadura por Arco con Alambre Continuo Protegido con Gas (Gas Metal Arc Welding - GMAW)

Es un proceso de soldadura por arco en que este se establece entre un electrodo metálico continuo de aporte y el charco de soldadura de metal base. La protección se obtiene por completo de un gas suministrado externamente y no se aplica a presión.

Este proceso también es conocido como MIG (Metal Inert Gas), MAG (Metal Active Gas) –dependiendo si se entrega protección con gases inertes o activos-, micro-alambre o “micro-wire”, entre otras designaciones.

En GMAW se emplea un alambre continuo, sólido y desnudo, que tiene las funciones de servir como electrodo y como metal de aporte, y al no haber revestimiento como en el caso del proceso SMAW ni fundente adicionado externamente como el proceso SAW, no se forma una capa de escoria, si no una película vítrea ligera.

El metal depositado y los aleantes son suministrados completamente por el metal de aporte y al no haber agentes limpiadores ni fundentes, se requiere cuidados y limpieza adecuados para obtener soldaduras libres de poros y otras discontinuidades.

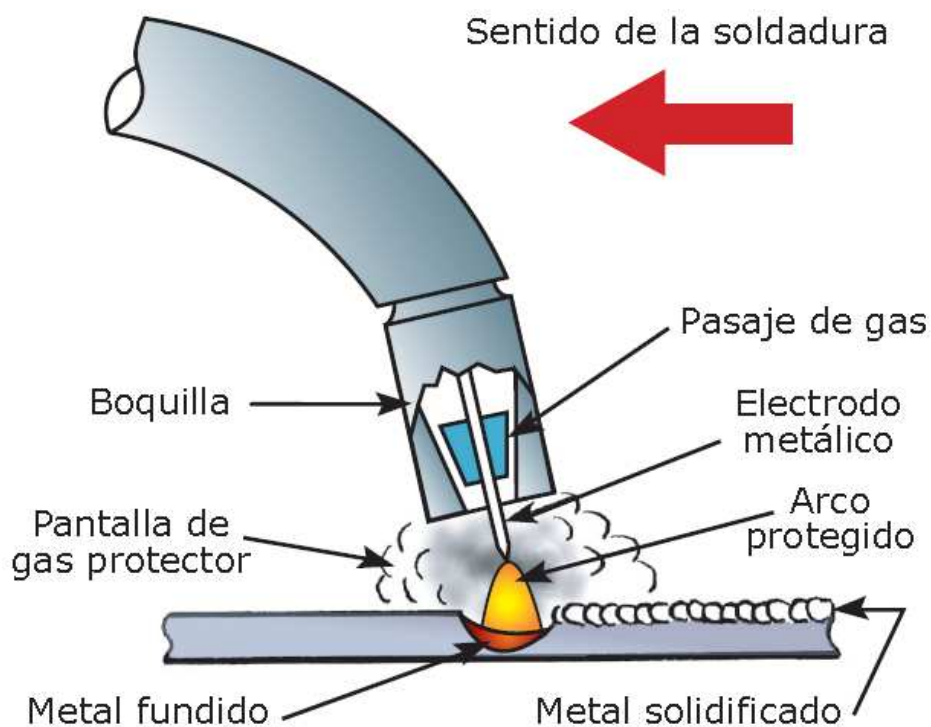


Figura 5.15-Proceso de Soldadura por Arco con Alambre Continuo Protegido por Gas (GMAW)

En este proceso pueden usarse los métodos de aplicación semiautomático, mecanizado y automático, y, en operaciones repetitivas como las empleadas en la industria automotriz, también se emplean métodos de control adaptativo y por medio de robot.

Equipo de soldadura

El equipo básico empleado en este proceso consiste en una fuente de energía de voltaje constante, una unidad de alimentación de alambre, suministro de gas de protección y antorcha o pistola. La figura 5.16 ilustra de manera esquemática el equipo típico que se emplea en el proceso GMAW.

Aplicaciones, ventajas y limitaciones

Este proceso es muy versátil y se usa en aplicaciones que requieren altos y bajos volúmenes de producción. Entre sus aplicaciones principales se encuentra la fabricación de recipientes a presión, tuberías industriales, líneas de tuberías de transmisión, instalaciones de energía nuclear, barcos, ferrocarriles, industria automotriz y aeroespacial y la de equipo pesado, incluyendo la construcción y fabricación de productos y bienes de acero al carbono, aceros inoxidable y algunas aleaciones no ferrosas.

Sus ventajas combinadas, comparadas con los procesos SMAW, FCAW, SAW y GTAW son las siguientes:

- Las operaciones de soldadura pueden hacerse en todas las posiciones (dependiendo del modo de transferencia metálica).
- No se requiere la remoción de escoria.
- La velocidad de depósito es relativamente elevada.
- Tiempos totales de terminación de soldadura de aproximadamente la mitad de aquellos obtenidos con electrodo recubierto (SMAW).
- En general, menor distorsión de las piezas de trabajo.
- Alta calidad de las uniones soldadas.
- Juntas con aberturas de raíz relativamente grandes pueden fácilmente ser unidas (con modo de transferencia metálica en corto circuito), lo que facilita realizar efectivamente cierta clase de reparaciones.
- Mejor aprovechamiento de metal aporte en un mayor factor de operación, lo que redundará en beneficio de los costos totales de soldadura.

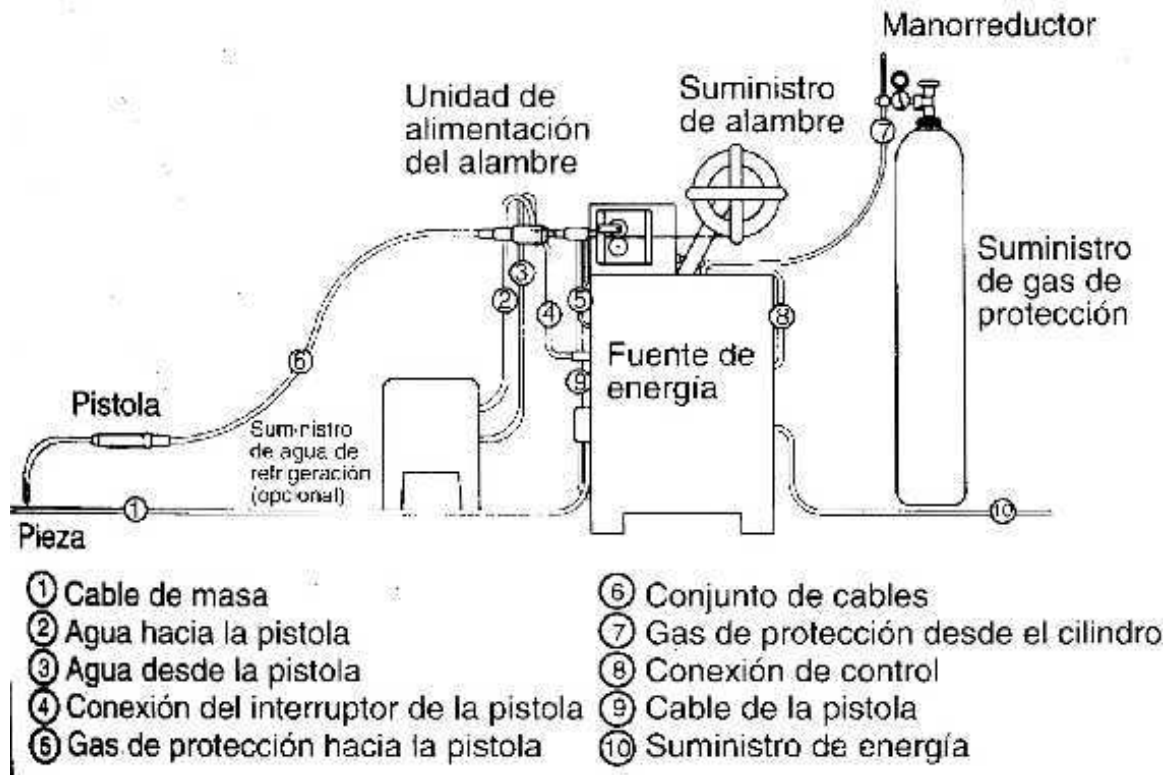


Figura 5.16 - Equipo para el Proceso de Soldadura por Arco Metálico con Alambre Continuo Protegido con Gas.

Variables específicas

Entre las variables particulares inherentes a este proceso, mismas que se discutirán brevemente, están las siguientes:

Gases de protección

La protección del arco y del charco de metal fundido se obtiene a partir de un gas o mezcla de gases adicionados externamente.

Los gases empleados constituyen una serie de variables de soldadura que afectan este proceso y tiene una gran influencia sobre las características de las uniones soldadas.

Cuando se sueldan metales no ferrosos se emplean gases de protección inerte como el helio, argon y mezclas de estos. Para metales ferrosos pueden emplearse gases activos tales como el dióxido de carbono, o mezclas de gases inertes con gases activos, tales como dióxido de carbono y oxígeno.

Las figuras 5.17 y 5.18 ilustran los patrones de penetración y el contorno el Cordón obtenidos con algunos gases de protección.

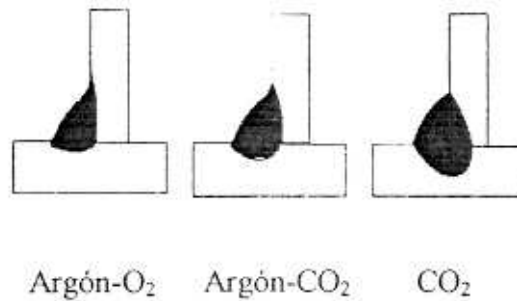


Figura 5.17 – Efecto de algunos gases y mezclas en el contorno y en la penetración del cordón.

Los factores que se deben considerar para determinar el tipo de gas a emplear son, entre otros, los siguientes:

- Tendencia al socavado
- Velocidad de soldadura
- Penetración, ancho y forma del cordón
- Tipo de metal a ser soldado
- Características del arco y tipo de transferencia metálica requerida.
- Costo del gas
- Y las propiedades mecánicas requeridas.

La tabla 5.6 muestra algunas aplicaciones, características y gases o mezcla de gases de protección empleados en soldadura por arco metálico protegido con gas.

TIPO DE GAS	MEZCLAS TÍPICAS	USOS PRINCIPALES
Argón	N.A.	Metales no ferrosos
Helio	N.A.	Aleaciones de aluminio, magnesio y cobre
Dióxido de Carbono	N.A.	Aceros al carbono y de baja aleación
Argón + Helio	20% - 80% He	Aleaciones de aluminio, magnesio y níquel
Argón + Oxígeno	1-2% O ₂	Acero inoxidable
	3-5% O ₂	Acero al carbono y de baja aleación
Argón + Dióxido de Carbono	20-50% CO ₂	Acero al carbono y de baja aleación
Helio + Argón + Dióxido de Carbono	90 He-7-1/2Ar-2-1/2 CO ₂	Acero inoxidable (corto circuito)
	60-70He-25-35Ar-5 CO ₂	Acero de baja aleación
Nitrógeno	N.A.	Aleaciones de cobre

Tabla 5.6 usos de diferentes gases de protección para el proceso de soldadura por arco metálico protegido con gas

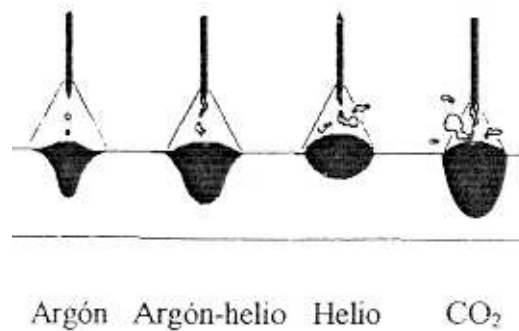


Figura 5.18 - Patrones de penetración y contorno de cordón con varios gases de protección

Modos de transferencia metálica

En soldadura por arco metálico protegido con gas pueden observarse varios tipos de arco y modalidades de este proceso, los cuales están determinados por el tipo de transferencia metálica, esto es, la forma en que el metal fundido se transfiere del electrodo a la pieza de trabajo. Hay cuatro modos básicos de transferencia metálica: corto circuito, globular, roció y arco pulsado. Además, recientemente la Lincoln Electric desarrolló una fuente de energía para corto circuito que produce transferencia por tensión superficial.

La física de la transferencia metálica aun no está comprendida, pero se cree que hay varias fuerzas que regulan tal transferencia. Dos de estas fuerzas son la gravedad y el efecto apriete (pinch effect). Este último es el angostamiento momentáneo de la gota líquida en el extremo del metal de aporte que conduce la corriente, y ocurre como resultado de los efectos electromagnéticos de esta. Se estima que el efecto es clave en la transferencia por roció y un factor involucrado por transferencia por corto circuito, mientras que en la transferencia globular, predomina el efecto de la fuerza de gravedad.

El tipo de transferencia metálica está determinado por la intensidad de la corriente de soldadura –misma que es directamente proporcional con la velocidad de alimentación de alambre (en relación con el diámetro de este)-, el gas de protección y el voltaje, principalmente.

Transferencia en corto circuito

Esta es caracterizado como un modo de “baja energía”, ya que se emplea los niveles de corriente más bajos asociados con GMAW. El metal es transferido del electrodo a la pieza de trabajo solo durante el lapso en que el electrodo está en contacto (en corto circuito) con el charco de soldadura y no hay transferencia metálica a través del arco.

El electrodo entra en contacto con el charco de soldadura a una velocidad estable en un intervalo de 20 a 200 veces por segundo, dependiendo del nivel de corriente y de la fuente de energía. La secuencia de eventos, la transferencia metálica y las variaciones de corriente y voltaje se muestran en la figura 5.19.

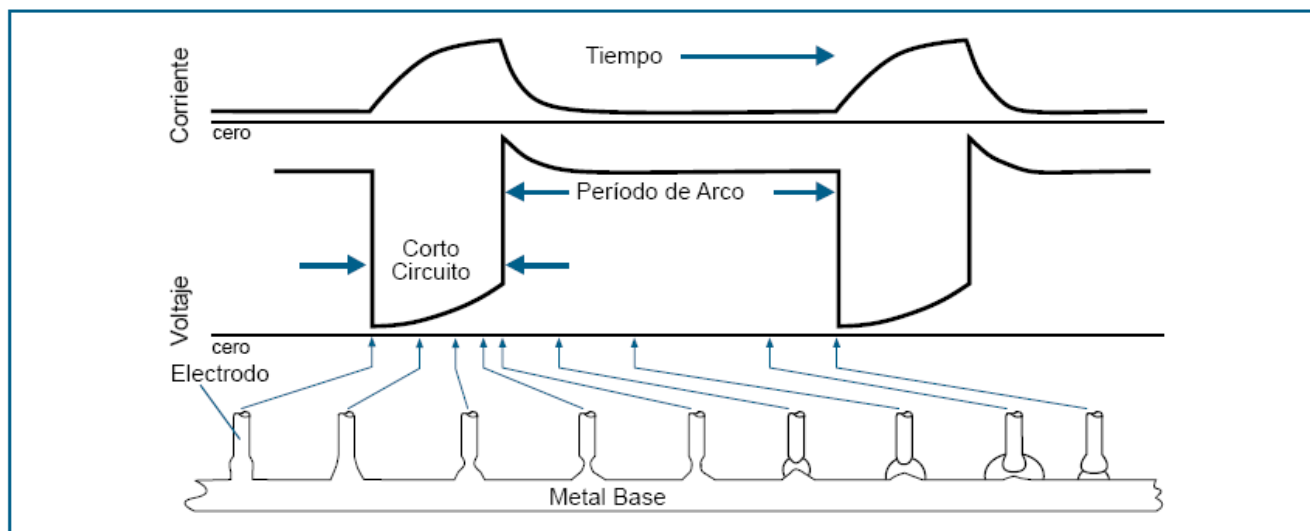


Figura 5.19 - Ciclo Típico de Tiempo Contra Corriente-Voltaje en la Transferencia por Corto Circuito

Como puede apreciarse en tal figura, cuando el alambre toca el metal de soldadura fundido, la corriente aumenta y debiera continuar aumentando si no se formara un arco. La velocidad de incremento de la corriente debe ser suficientemente alta para mantener fundida la punta del electrodo hasta que el metal de aporte se transfiere, pero esto no debería ocurrir tan rápido como para producir un chisporroteo debido a la desintegración de la gota trasferida del metal de aporte. La velocidad de aumento de corriente es controlada por ajustes de la inductancia en la fuente de energía.

El valor de la inductancia requerido depende de la resistencia eléctrica del circuito de soldadura y el intervalo de la temperatura de fusión del electrodo. El voltaje de circuito abierto e la fuente debe ser suficientemente bajo de manera que el arco no pueda continuar bajo las condiciones de soldadura existentes. Una porción de energía para el mantenimiento del arco es proporcionada por la reserva inductiva de energía durante el periodo de corto circuito.

Ya que la transferencia metálica ocurre solo durante el corto circuito, el gas de protección tiene muy poco efecto en este tipo de transferencia, puede ocurrir algo de chisporroteo, que normalmente es causado por la evolución del gas o por las fuerzas electromagnéticas en la punta fundida del electrodo.

La siguiente tabla muestra los intervalos típicos de corriente empleados para electrodos de acero al carbono.

CORRIENTE PARA SOLDADURA, AMPÉRIOS					
DIÁMETRO DEL ELECTRODO		POSICIONES PLANA Y HORIZONTAL		POSICIONES VERTICAL Y SOBRECABEZA	
PULGADAS	mm	MÍNIMO	MÁXIMO	MÍNIMO	MÁXIMO
0,030	0,08	50	150	50	125
0,035	0,9	75	175	75	150
0,045	1,2	100	225	100	175

Tabla 5.7-Intervalos típicos de corriente para soldadura de acero con GMAW en transferencia en corto circuito.

Ventajas, características y aplicaciones de transferencias en corto circuito

- El empleo de los intervalos más bajos de corriente asociados a este proceso.
- Pequeños diámetros de electrodo (0.030", 0.035",0.045")
- Polaridad invertida (electrodo positivo)
- Aportes térmicos bajos, lo que produce muy poca distorsión del metal base.
- Se produce un charco de soldadura pequeño de solidificación rápida.
- Adecuado para unir secciones delgadas (generalmente de 0.6 mm a espesores no mayores a 6.4mm (1/4 pulgada)
- Apropiado para el llenado de aberturas de raíz grandes.
- Puede soldarse en todas las posiciones.
- Alto riesgo potencial de ocurrencia de pequeñas faltas de fusión que pueden resultar indetectables con radiografía o ultrasonido.
- penetración poco profunda.

Trasferencia globular

La transferencia globular ocurre con intensidades de corriente y voltaje relativamente bajas, pero más altas que los empleados para obtener transferencia en corto circuito. Tiene lugar con todos los tipos de gases de protección, Pero si emplea CO₂, generalmente ocurre a niveles de corriente y voltaje en la parte superior del intervalo de operación.

En este modo de transferencia, el metal se traslada a través de arco en formas de gotas e metal fundido que tiene un tamaño mayor al diámetro del electrodo.

Esta caracterizado por un arco errático, menos estable que el asociado con la transferencia en corto circuito y altas cantidades de chisporroteo.

El arco que se produce con CO₂ generalmente es de naturaleza inestable y esta caracterizado por un sonido "crujiente", la superficie de los cordones es más rugosa que la de los obtenidos con transferencia en rocío.

Cuando se emplea CO₂, la mayor parte de la energía del arco se dirige hacia debajo de la superficie del metal de soldadura fundido, lo que produce perfil del cordón de penetración muy profunda con acción de lavado en los extremos del cordón (menor de las obtenidas con el modo de transferencias en rocío).

Si se emplean mezclas de gas ricas en helio, se produce un cordón de soldadura más ancho y con la profundidad de penetración similar a la que se obtiene con argón.

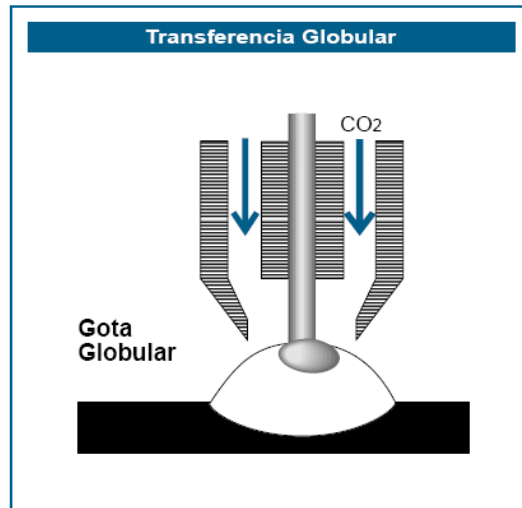


Figura 5.20 - Transferencia Globular.

Ventajas, características y aplicaciones del modo de transferencia globular

- Alta penetración
- Chisporroteo excesivo
- Por lo general no es adecuado para aplicaciones de soldadura fuera de posición. Prácticamente está limitada a posición plana y filetes horizontales
- Para soldar metales base de espesores de 1.2 mm en adelante
- Requiere del empleo de corriente directa y polaridad invertida.

Transferencia por rocío

La transferencia por rocío (spray) esta asociada a niveles del voltaje y amperajes más altos del intervalo de operación de proceso GMAW.

Para que ocurra es necesario que la corriente mínima de soldadura sea igual o superior a la llamada corriente de transición. La tabla 5.8 muestra los valores típicos de corriente de transición para varios metales de aporte y gases de protección.

TIPO ELECTRODO	DIÁMETRO DEL ELECTRODO		GAS DE PROTECCIÓN	CORRIENTE MÍNIMA PARA ARCO EN SPRAY
	PULGADAS	MILÍMETROS		AMP
ACERO DULCE	0,030	0,76	98% Ar-2%O	150
ACERO DULCE	0,035	0,89	98% Ar-2%O	165
ACERO DULCE	0,045	1,1	98% Ar-2%O	220
ACERO DULCE	0,052	1,3	98% Ar-2%O	240
ACERO DULCE	0,062	1,6	98% Ar-2%O	275
ACERO INOXIDABLE	0,035	0,89	99% Ar-1%O	170
ACERO INOXIDABLE	0,045	1,1	99% Ar-1%O	225
ACERO INOXIDABLE	0,062	1,6	99% Ar-1%O	285
ALUMINIO	0,030	0,76	ARGÓN	95
ALUMINIO	0,045	1,19	ARGÓN	135
ALUMINIO	0,062	1,6	ARGÓN	180

Tabla 5.8 - Corriente de Transición para el Modo de Transferencia en SPRAY

Como puede apreciarse en esta tabla, la corriente de transición depende del diámetro del alambre y del gas de protección, sin embargo, para obtener transferencia en roció al soldar aceros al carbono y de baja aleación, es necesario que la mezcla de gas e protección contenga un porcentaje mínimo de argón (que oscila aproximadamente el 80 al 86%, según diversos autores).

El ciclo de transferencia por roció empieza cuando el extremo del electrodo se adelgaza en un punto, se forman pequeñas gotas y son impelidas electrónicamente de la punta adelgazada del electrodo. El metal se transfiere a través del arco en forma de pequeñas gotas cuyo tamaño es menor o igual al diámetro del electrodo. Las gotas son dirigidas al axialmente en línea recta al electrodo al charco de metal de soldadura y el arco es muy estable, lo que resulta en muy poco chisporroteo y un cordón de soldadura de superficie relativamente lisa.

Debido que a que la energía del arco (plasma) se extiende en forma de cono desde el alambre-electrodo, se produce una acción de lavado en los extremos del cordón, y a la vez una penetración relativamente profunda, menor que la que se obtiene con transferencia globular de alta energía, pero mayor que la obtenida que con SMAW.

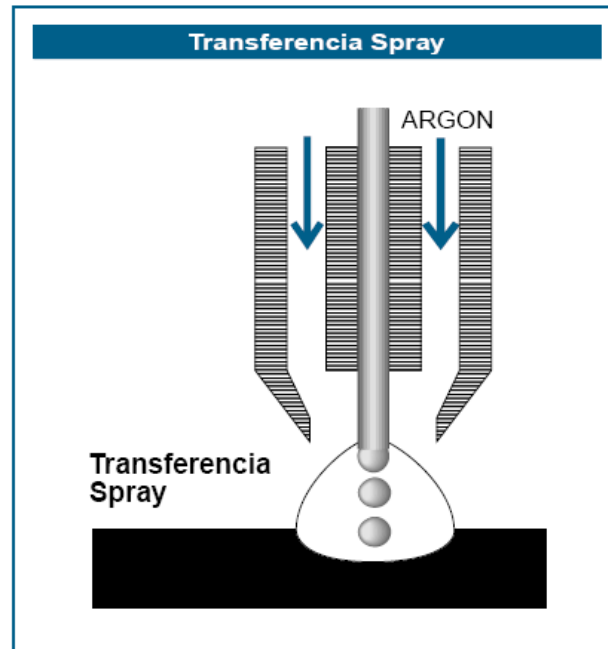


Figura 5.21-Transferencia por SPRAY

Ventajas, características y aplicaciones de modo de transferencia en roció

- Adecuado para soldar secciones de espesores relativamente gruesos, por lo general, de 3.2 o 4.8 mm (1/8 o 3/16") en adelante.
- El arco estable produce a menor cantidad de chisporroteo que los otros modos de transferencia.
- Adecuado para soldar en posiciones plana y en filetes horizontales, aunque también es útil para soldar fuera de posición, pero debe tenerse en cuenta que los altos niveles de corriente y voltajes usados pueden producir un charco de soldadura relativamente abundante que resulta fácil de controlar.
- Requiere del empleo de corriente directa y la polaridad invertida (electrodo positivo).

Transferencia por arco con corriente pulsada

La transferencia por corriente pulsada es una variante del proceso GMAW útil para soldar en todas las posiciones empleado a un nivel de energía más alto que el usado en la transferencia por corto circuito.

En esta variante se requiere una fuente de energía especial, misma que suministra dos niveles de corriente: un nivel estable de fondo de una magnitud demasiado baja para producir cualquier tipo de transferencia, y una corriente de pico pulsada súper-impuesta, a intervalos regulares, a la corriente de fondo.

La combinación de estas dos corrientes produce un arco estable (correspondiente al amperaje de fondo), y una transferencia controlable del metal de soldadura en el modo roció, correspondiente a la corriente pulsada de pico.

Este modo de transferencia combina características y ventajas de las transferencias en roció y corto circuito, pero requiere de buenas técnicas de operación para evitar faltas de fusión en espesores gruesos, pero este no es un factor tan crítico como en el modo de transferencia por corto circuito.

Consumibles, especificaciones y clasificaciones

Las especificaciones aplicables para los electrodos empleados en este proceso son las siguientes:

- AWS A5.9 para electrodos de acero inoxidable.
- AWS A5.1.0 para electrodos de aluminio y sus aleaciones
- AWS A5.13 para electrodos sólidos para recubrimientos especiales
- AWS A5.14 para electrodos de níquel y sus aleaciones
- AWS A5.16 para electrodos de titanio y sus aleaciones
- AWS A5.18 para electrodos de acero al carbono
- AWS A5.24 para electrodos de circonio y sus aleaciones
- AWS A5.28 para electrodos de acero de baja aleación.

La clasificación de estos electrodos está relacionada con las aplicaciones específicas previstas. El sistema para identificar la clasificación de los electrodos en estas especificaciones AWS para metales de aporte sigue un modelo estándar que puede ser ejemplificado con el sistema de clasificación para los electrodos de acero al carbono (AWS A5.18) que se ilustra a continuación:

ER XX S – Y N

Donde:

ER: Indica que se usa como un electrodo (E) o una varilla desnuda (R, Rod).

XX: Indica la resistencia mínima a la tensión, en incrementos de 1,000 libras por pulgada cuadrada (6.9 MPa), del metal de soldadura depositado por el electrodo cuando es probado de acuerdo con esta especificación.

S: Indica que se trata de un metal de aporte sólido.

Y: Se requiere a la descripción y al uso intentado de los electrodos, e indica aspectos tales como el uso principal previsto (para soldaduras de un solo paso o de pasos múltiples, si el acero a soldar es calmado, semicalmado o efervescente, así como el grado de herrumbre o contaminación superficial que puede tolerarse), los desoxidantes que contiene el electrodo y si la clasificación correspondiente requiere o no pruebas de impacto.

N: Esta se emplea únicamente cuando se aplica la **Nota b** de la tabla 1 de especificación, e indica que el metal de soldadura está intentando para aplicaciones en reactores nucleares.

Así, en la clasificación **ER70S-3:**

ER: Significa que se trata de un electrodo o una varillas desnuda.

70: Indica la resistencia mínima a la tensión de 70,000 libras por pulgada cuadrada.

S: Indica que se trata de un metal de aporte sólido.

3: Significa que estos electrodos están intentados para soldaduras de pasos sencillos y múltiples.

También existe una clasificación “G”, misma que denota que el metal de aporte corresponde una clasificación “general”, no incluida en otras clasificaciones y para la cual únicamente ciertos requisitos de propiedades están especificados.

Adicionalmente, las clasificaciones pueden incluir el designador opcional suplementario H16, H8 o H4, que se refiere a los requisitos de hidrógeno difusible en ml/100 gramos de metal depositado.

La especificación AWS A5.18 incluye clasificaciones para electrodos compuestos, para pasos múltiples y para paso sencillo. Una clasificación típica de estos es la E70C-3X, Donde “E” indica electrodo, la “C” indica que el electrodo es compuesto, el “3” se refiere a las características de uso, la posición de la “X” puede ser ocupada como una “C” o una “M” que establecen, respectivamente, si el electrodo es clasificado con CO₂.

Si se trata de clasificaciones cubiertas por la especificación AWS A-5.28 para electrodos de acero de baja aleación, la clasificación incluye un sufijo que se requiere a la composición química del electrodo. Por ejemplo, en la clasificación ER80S-B2 el sufijo B2, indica que se trata de un electrodo con un contenido nominal de 1.25% de Cr y 0.5% de Mo.

Para el caso de los electrodos de aceros inoxidable, la designación de las clasificaciones esta compuesta por los designadores “ER”, para los alambres sólidos que pueden ser usados como electrodos o varillas desnudas (o puede ser “EC” para alambres trenzados, tubulares o compuestos, o “EQ” para electrodos en forma de tira), seguido un numero de tres dígitos que designa la composición química del metal de aporte. Por ejemplo ER308.

En algunos casos la clasificación puede incluir símbolos de elementos químicos y las letras L, H, LR, que denotan, respectivamente: contenido de carbono en la parte baja del intervalo especificado para el grado estándar del metal de aporte corresponde, contenido de carbono restringido a la parte superior del intervalo especificado (también para el grado estándar para el metal de aporte), y contenido bajo elementos residuales.

Proceso de Soldadura por Arco con Electrodo Tubular con Núcleo de Fundente (Flux Cored Arc Welding - FCAW)

Es un proceso de soldadura por arco, el cual se establece entre un electrodo de metal de aporte continuo y el charco de soldadura formando en la pieza de trabajo.

La protección se obtiene a través de la composición de un fundente contenido en el núcleo del electrodo tubular, y puede o no ser requerida una protección adicional con un gas o una mezcla de gases que se suministra externamente.

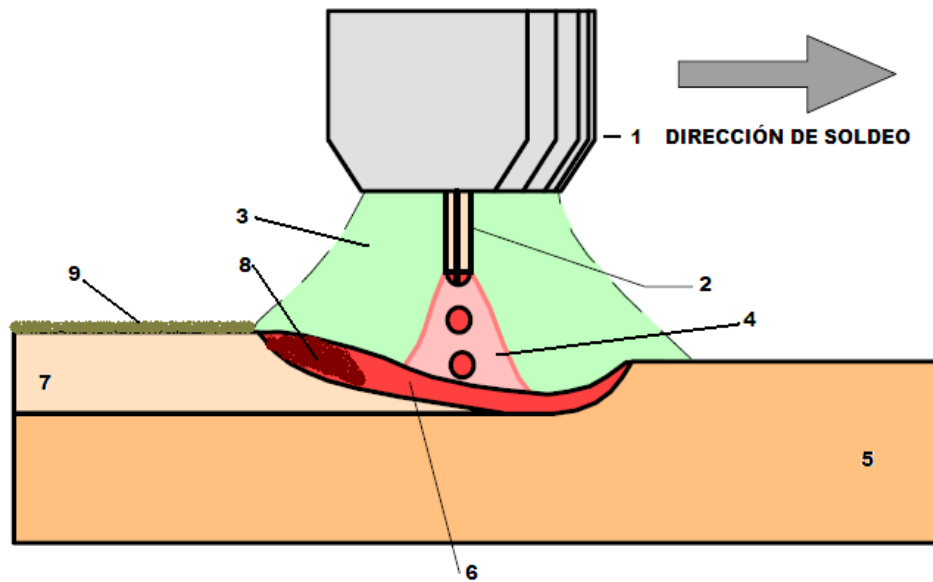
Este proceso, en especial cuando se emplea con gas de protección; es similar al GMAW, y para ambos puede usarse el mismo equipo básico con cambios menores (en el alimentador de alambre o en los rodillos de este, y en la antorcha o en la punta de contacto eléctrico de la misma).

Debido a que algunos electrodos tubulares requieren el uso de gas de protección adicionado externamente y otros no, algunos autores y “designaciones comerciales” diferencian las dos modalidades, y llaman “autoprotegidas” a las aplicaciones que no requieren gas de protección adicional y protegidas por gas a las que si lo requieren.

A las primeras, también se les designa con los términos “innershield” o “selfshield”, mientras que a las segundas se les identifica como “outershield” o “dualshield”, pero estas son designaciones originadas por los fabricantes de los consumibles.

Las especificaciones aplicables y la información de los fabricantes de los electrodos tubulares establecen de manera concreta cuales de estos se deben emplear con gas de protección adicional y cuales sin este y que tipo de gas es el recomendable. Más adelante en este texto, en las secciones “variables específicas del proceso” y “consumibles, especificaciones y clasificaciones”, se proporciona y analiza la información correspondiente.

El proceso de soldadura por arco con electrodo tubular continuo con núcleo de fundente se muestra en la siguiente ilustración.



- 1 BOQUILLA (OPCIONAL)
- 2 ELECTRODO TUBULAR CONTINUO
- 3 GAS (OPCIONAL)
- 4 ARCO ELÉCTRICO
- 5 METAL BASE
- 6 METAL DE SOLDADURA FUNDIDO
- 7 METAL DE SOLDADURA SOLIDIFICADO
- 8 ESCORIA FUNDIDA
- 9 ESCORIA

Figura 5.22 - Proceso de Soldadura por Arco con Electrodo Tubular con Núcleo de Fundente (FCAW)

El método de aplicación con que se emplea este proceso es principalmente el semiautomático, aunque también suele emplearse el mecanizado y el automático.

Equipo de Soldadura

El equipo básico empleado para este proceso consiste en una fuente de energía de voltaje constante en una fuente de energía de voltaje constante, pistola de soldadura, cables y alimentador de alambre, y en algunos casos, medios para el mismo suministro de gas de protección, mismo que es opcional y en algunos casos resulta necesario, dependiendo del metal de aporte empleado. La figura 5.23 ilustra de manera esquemática el equipo típico que se emplea en este proceso.

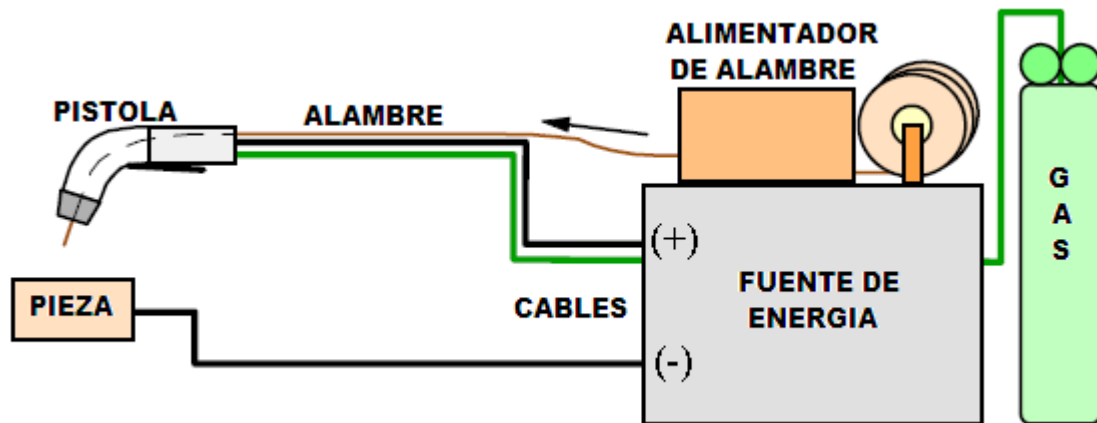


Figura 5.23 - Equipo para Proceso de Soldadura por Arco con Electrodo Tubular con Núcleo de Fundente (FCAW)

Aplicaciones, ventajas y limitaciones

Este proceso es de amplia aplicación en fabricación y mantenimiento en talleres y en montaje y construcción en campo, así como la reparación. Se emplea para construir recipientes a presión, barcos, estructuras y líneas de tubería; para propósitos generales de fabricación, unir metales base diferente, aplicar recubrimientos duros e inoxidables y para soldadura de puntos por arco.

Se emplea para soldar aceros suaves o dulces de grados recipiente a presión o estructural, aceros de baja aleación y aceros de alta resistencia templados y revenidos. También se usa para unir aceros de alta resistencia y baja aleación y aceros inoxidables forjados y fundidos, hierros colados y aleaciones de acero resistentes a la abrasión.

Dentro de ciertas limitaciones, este proceso puede emplearse en aquellas aplicaciones típicas de SMAW, GMAW y SAW, y con respecto de estos tiene ventajas y desventajas, mismas que se describen a continuación:

- Con electrodos de diámetro pequeños se puede soldar en todas las posiciones, y con electrodos de 3/32" en adelante la soldadura esta limitada a posiciones plana y horizontal.
- Alta calidad de los depósitos de soldadura.
- Produce soldaduras uniformes y "tersas", lo que resulta en una apariencia excelente de los cordones.
- Muy buen entorno de las soldaduras de filete que se depositan en posiciones plana y horizontal.
- Útil para soldar un amplio rango de espesores, particularmente adecuado para espesores gruesos e intermedio.
- Fácilmente mecanizable
- Factor de operación alto
- Alta relación de depósito
- Alta densidad de corriente
- Eficiencia relativamente alta del metal depositado
- Permite diseños económicos de junta
- El arco es visible, por lo que es fácil de controlar.

- Requiere menos limpieza previa que GMAW
- Produce menos distorsión que SAW
- Pueden obtenerse relaciones de depósito y velocidades de soldadura hasta unas cuatro veces mayores que las obtenidas con SMAW
- Mayor penetración que la obtenida con SMAW
- Los electrodos autoprottegidos eliminan la necesidad de manejo de fundentes o equipo de suministro de gas, y presentan una mayor tolerancia a las corrientes de vientos inherentes a la construcción en campo.
- Para proteger de la absorción de humedad a los electrodos tubulares se requieren menos cuidados que los que deben tenerse con los electrodos recubiertos y fundentes para arco sumergido. Cuando los electrodos tubulares no se están empleados deben almacenarse en su empaque original.
- Tiene una mayor tolerancia a contaminantes que pueden causar agrietamiento.
- Produce soldaduras resistentes al agrietamiento bajo los cordones.

Las siguientes son algunas de las limitaciones principales:

- Actualmente está limitado a la unión de metales ferrosos y a la aplicación de recubrimientos.
- Producen una capa de escoria que debe ser removida.
- El electrodo tubular es más caro que los electrodos sólidos, con excepción de algunos aceros de alta aleación.
- El equipo es más caro que el requerido para el proceso SMAW, sin embargo, la productividad incrementada que puede obtenerse por lo general compensa esta desventaja.
- El alimentador de alambre y la fuente deben estar cerca del punto de soldadura.
- Este proceso, comparado con SAW y GMAW, genera una mayor cantidad de humo.
- En FCAW protegido con gas la protección externa puede ser afectada adversamente por la brisa del viento.
- El equipo es más complejo que aquel usado en SMAW, por lo que requiere más mantenimiento.

Variables específicas

Las variables particulares de este proceso están relacionadas con el gas de protección y algunas características eléctricas, tales como la corriente, polaridad, voltaje y la extensión del electrodo.

Gas de protección

La variable principal en cuanto al gas de protección tiene que ver con el hecho de si este se emplea o no.

Los gases de protección más empleados son el dióxido de carbono y mezclas de argón y dióxido de carbono, aunque también se han empleado mezclas de argón y oxígeno (1 o 2% de oxígeno) para aplicaciones tales como la soldadura de aceros inoxidable en los que el dióxido de carbono puede causar problemas de corrosión, o bien para promover la transferencia por rocío. El dióxido de carbono tiene las ventajas de tener más bajo costo, permitir mayor penetración y promover la transferencia globular.

La selección del gas de protección adecuado para una aplicación específica debe de estar basada en los siguientes factores:

- Tipo de metal a soldarse
- características del arco y el tipo de transferencia metálicas requeridos.
- disponibilidad y costo
- propiedades mecánicas requeridas.
- penetración y forma del cordón

Las gases y mezclas de gases con que se clasifican (y con los que se recomienda usar) los electrodos de acero al carbono de las diferentes clasificaciones se indican en la tabla 5.9 (tomada de la especificación AWS A5.20-90), misma que también establece las posiciones y la aplicación de cada electrodo. los electrodos de acero de baja aleación generalmente se clasifican con dióxido de carbono(consúltese la tabla 9 de la Especificación AWS A5.29), y los de acero inoxidable se clasifican con dióxido de carbono y mezcla de argón y dióxido de carbono (véase tabla 2 de la Especificación AWS A 5.22) y pueden emplearse con estos gases o con otros.

Características eléctricas

La mayoría de los electrodos tubulares se emplean con corriente directa electrodo positivo (polaridad invertida), pero algunos, principalmente los que se sueldan sin gas de protección de gas adicional se aplican con corriente directa electrodo negativo. el tipo de corriente y polaridad que se deben soldarse estos electrodos esta indicado en la tabla 5.9 y en las tablas de las especificaciones AWS citadas en el párrafo anterior.

El modo de transferencia metálica, mismo que puede ser en rocío, corto circuito y globular, no es una variable que afecte gran de mente la calidad de las soldaduras, como ocurre en el proceso GMAW.

La intensidad de la corriente de soldadura (establecida por los fabricante de los electrodos) es directamente proporcional a la velocidad de alimentación de alambre, pero esta corriente varia (como sucede en todos los procesos que emplean metales de aporte en forma de alambre continuo) al variar la extensión del electrodo.

En sistemas de soldadura de voltaje constante como los que se emplean en FCAW, El voltaje se establece en ellos controles del equipo. El voltaje adecuado para cada aplicación depende del tipo y diámetro del electrodo, el gas de protección, el tipo de junta y el espesor del metal base. Si las otras características (amperaje, extensión de electrodo, velocidad de desplazamiento, etc.) se mantiene constante y se aumenta el voltaje, el cordón se hace mas plano y nacho y aumenta y ligeramente la penetración.

La extensión del electrodo también llamada "stickout", es la distancia entre la punta de contacto eléctrico y la pieza de trabajo.

La longitud del electrodo que se extiende mas allá de la punta de contacto se calienta por efecto de la resistencia eléctrica, y a mayor longitud corresponde un mayor calentamiento mismo que afecta la velocidad de deposición del electrodo, la penetración, la calidad de la soldadura y la estabilidad del arco. Al incrementar la extensión del electrodo se reduce la corriente.

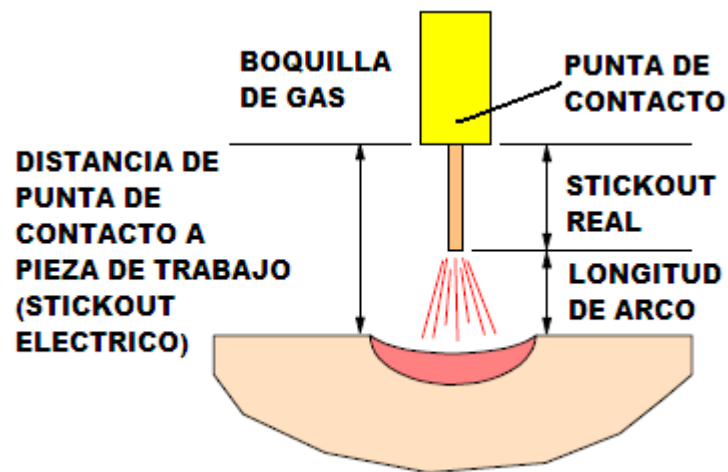


Figura 5.24 - Extensión del Electrodo

CLASIFICACIÓN AWS	POSICIÓN DE SOLDADURA	PROTECCIÓN EXTERNA	POLARIDAD	APLICACIÓN
E70T-1	PLANA Y HORIZONTAL	CO ₂	CCEP	M
E70T-1M	PLANA Y HORIZONTAL	75-80% Ar / Balance CO ₂	CCEP	M
E71T-1	P, H, VA, SC	CO ₂	CCEP	M
E71T-1M	P, H, VA, SC	75-80% Ar / Balance CO ₂	CCEP	M
E70T-2	PLANA Y HORIZONTAL	CO ₂	CCEP	S
E70T-2M	PLANA Y HORIZONTAL	75-80% Ar / Balance CO ₂	CCEP	S
E71T-2	P, H, VA, SC	CO ₂	CCEP	S
E71T-2M	P, H, VA, SC	75-80% Ar / Balance CO ₂	CCEP	S
E70T-3	PLANA Y HORIZONTAL	Ninguna	CCEP	S
E70T-4	PLANA Y HORIZONTAL	Ninguna	CCEP	M
E70T-5	PLANA Y HORIZONTAL	CO ₂	CCEP	M
E70T-5M	PLANA Y HORIZONTAL	75-80% Ar / Balance CO ₂	CCEP	M
E71T-5	P, H, VA, SC	CO ₂	CCEP ó CCEN	M
E71T-5M	P, H, VA, SC	75-80% Ar / Balance CO ₂	CCEP ó CCEN	M
E70T-6	PLANA Y HORIZONTAL	Ninguna	CCEN	M
E70T-7	PLANA Y HORIZONTAL	Ninguna	CCEN	M
E71T-7	P, H, VA, SC	Ninguna	CCEN	M
E70T-8	PLANA Y HORIZONTAL	Ninguna	CCEN	M
E71T-8	P, H, VA, SC	Ninguna	CCEN	M
E70T-9	PLANA Y HORIZONTAL	CO ₂	CCEP	M
E70T-9M	PLANA Y HORIZONTAL	75-80% Ar / Balance CO ₂	CCEP	M
E71T-9	P, H, VA, SC	CO ₂	CCEP	M
E71T-9M	P, H, VA, SC	75-80% Ar / Balance CO ₂	CCEP	M
E70T-10	PLANA Y HORIZONTAL	Ninguna	CCEN	S
E70T-11	PLANA Y HORIZONTAL	Ninguna	CCEN	M
E71T-11	P, H, VA, SC	Ninguna	CCEN	M
E70T-12	PLANA Y HORIZONTAL	CO ₂	CCEP	M
E70T-12M	PLANA Y HORIZONTAL	75-80% Ar / Balance CO ₂	CCEP	M
E71T-12	P, H, VA, SC	CO ₂	CCEP	M
E71T-12M	P, H, VA, SC	75-80% Ar / Balance CO ₂	CCEP	M
E61T-13	P, H, VD, SC	Ninguna	CCEN	S
E71T-13	P, H, VD, SC	Ninguna	CCEN	S
E71T-14	P, H, VD, SC	Ninguna	CCEN	S
EX0T-G	PLANA Y HORIZONTAL	NO ESPECIFICADO	NO ESPECIFICADO	M
EX1T-G	P, H, VA, VD, SC	NO ESPECIFICADO	NO ESPECIFICADO	M
EX0T-GS	PLANA Y HORIZONTAL	NO ESPECIFICADO	NO ESPECIFICADO	S
EX1T-GS	P, H, VA, VD, SC	NO ESPECIFICADO	NO ESPECIFICADO	S

Tabla 5.9- Posiciones de soldadura, protección, polaridad y requisitos de aplicación de los electrodos tubulares.

DONDE:

P	=	POSICIÓN PLANA
H	=	POSICIÓN HORIZONTAL
VA	=	VERTICAL ASCENDENTE
VD	=	VERTICAL DESCENDENTE
SC	=	SOBRE CABEZA
M	=	PASES MÚLTIPLES
S	=	PASE ÚNICO
CCEP	=	CORRIENTE CONTÍNUA ELECTRODO POSITIVO
CCEN	=	CORRIENTE CONTÍNUA ELECTRODO NEGATIVO

Consumibles, especificaciones y clasificaciones

Las especificaciones aplicables para los electrodos tubulares son las siguientes:

- AWS A5.15 para electrodos de hierro colado
- AWS A5.20 para electrodos de acero de carbono
- AWS A5.22 para electrodos de acero inoxidable
- AWS A5.29 para electrodos de acero de baja aleación.

Los sistemas de clasificación para estos electrodos siguen el modelo empleado en las otras especificaciones AWS para metales de aporte.

Clasificación de electrodos de acero al carbón

La figura 5.25 describe el sistema de clasificación empleado para los electrodos de acero al carbono cubierto por la especificación ANSI/AWS A5.20

A manera de ejemplo, considérese la clasificación **E70T-4**

E Designa un electrodo

7 indica 70,000 libras/pulg.² (PSI) de resistencia mínima a la tensión del metal de soldadura

0 establece que el electrodo solo se puede usar en posiciones plana y horizontal

T indica que el electrodo es tubular

4 indica que se trata de un electrodo "autoprotegido" (sin gas de protección adicional) y útil para soldaduras de paso sencillo.

Clasificación de los electrodos de acero de baja aleación

Las clasificaciones de los electrodos de acero de baja aleación (cubiertos por la especificación ANSI/AWS A5.29) son muy similares a la de los electrodos de acero al carbono, pero incluyen sufijo que designa la composición química del metal de soldadura depositado. Esta composición está en la tabla 1 de la especificación.

Adicionalmente, el designador de la resistencia mínima a la tensión puede ser 7, 8, 9, 10, 11, 12, e indica el valor de esta resistencia multiplicado por 10,000 PSI.

La clasificación **E81T1-Ni2** establece la siguiente información:

8 indica que el metal de soldadura depositado debe tener 80.000 PSI de resistencia mínima a la tensión

1 establece que el electrodo puede usarse en todas las posiciones

T indica que se trata de un electrodo tubular

1 describe las características de uso y capacidades de desempeño del electrodo, en este caso son: paso múltiple y sencillo, protección con CO₂ y corriente directa electrodo positivo (este designador puede ser 1, 4, 5 y 8; para las características respectivas consúltese la tabla 9 y el apéndice de la especificación)

Ni2 establece un contenido nominal de 2% de níquel (véase tabla 1 de la especificación)

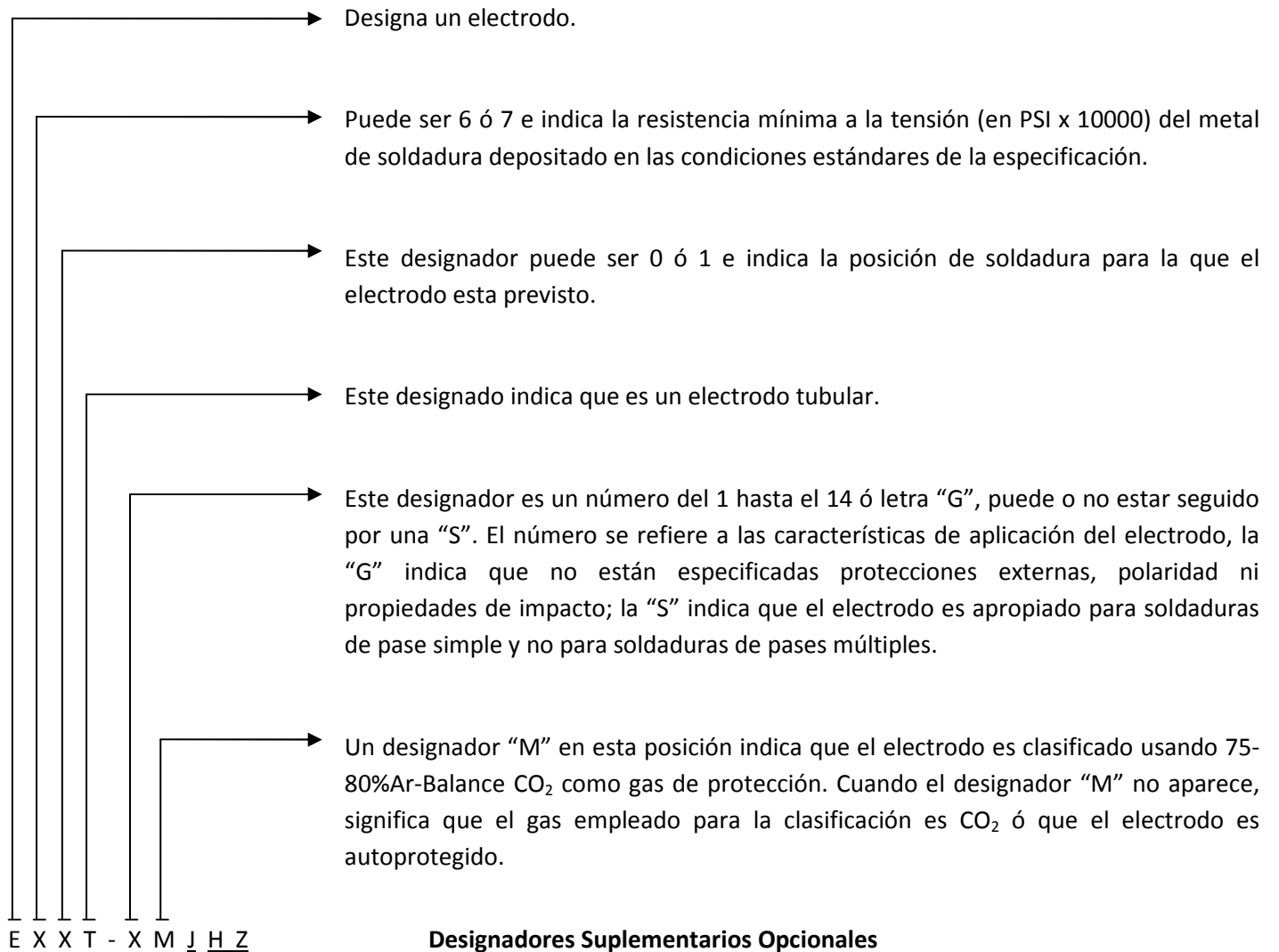
Clasificación de los electrodos de acero inoxidable

El sistema de clasificación de los electrodos de acero inoxidable cubiertos por la especificación ANSI/AWS A5.22 sigue el patrón estándar de la AWS. Las diferencias básicas con respecto de los electrodos de acero al carbono se ilustra al considerar la clasificación **E308T-1**.

308 designa la composición química del metal de soldadura (véase la tabla 1 de la especificación)

1 indica el medio de protección externa empleada con propósitos de clasificación, en este caso CO₂ este designador puede ser 1, 3, 4, O G. véase la tabla 2 de la especificación para obtener información más detallada.

Designadores Obligatorios de la Clasificación



Designa que el electrodo cumple los requerimientos de la prueba de hidrogeno difusible (una prueba opcional suplementaria del metal de soldadura con un valor promedio que no exceda de "Z" ml de H₂ por 100g de metal depositado, donde "Z" puede tener el valor 4 ó 8 ó 16).

Indica que el electrodo cumple con los requisitos de tenacidad mejorada, al cumplir los requerimientos de 20 lbf-pie a -40°F (27 Joules a -40°C). La ausencia de la "J" indica los requerimientos normales de impacto dados en la "Tabla 1" (de la especificación).

Figura 5.25 - Sistema de clasificación de electrodos tubulares de acero al carbono para el proceso FCAW

Proceso de soldadura por arco de Tungsteno protegido con gas (Gas Tungsten arc Welding – GTAW)

Es un proceso de soldadura por arco, el cual es establecido entre un electrodo de tungsteno no consumible y el charco de soldadura. En este proceso se emplea gas de protección, no se aplica presión y puede usarse con o sin la adición de metal de aporte.

Algunos nombres que se utilizan para designar a este proceso son “Argon-arc welding” y “soldadura de argón”, entre otros, pero tales nombres no están estandarizados (en las normas de países americanos) ni son adecuados, ya que en ciertas aplicaciones se emplean mezclas de gases no inertes.

El electrodo de tungsteno está alojado en la antorcha, a través de la cual también se alimenta el gas para proteger de la contaminación de la atmósfera al charco de soldadura fundida, al arco, el electrodo y el metal de soldadura solidificado pero aun caliente. El calor generado por el arco que se establece entre la punta del electrodo y la pieza de trabajo, funde el metal base y una vez que se produce el charco, la antorcha se mueve a lo largo de la junta, y si se emplea metal de aporte, normalmente se adiciona por el extremo frontal (hacia donde se desplaza la antorcha) del charco para llenar la junta.

Este proceso, mismo que se ilustra en la figura 4.26, produce un arco y un charco de metal fundido claramente visible para el soldador, no genera escorias que pudiera quedar atrapada en el metal de soldadura, pero presenta el riesgo de provocar inclusiones de tungsteno; ya que no hay transferencia de metal de aporte a través del arco, no se produce chisporroteo, y debido a que el electrodo no es consumible, pueden efectuarse soldaduras sin adicionar metal de aporte,

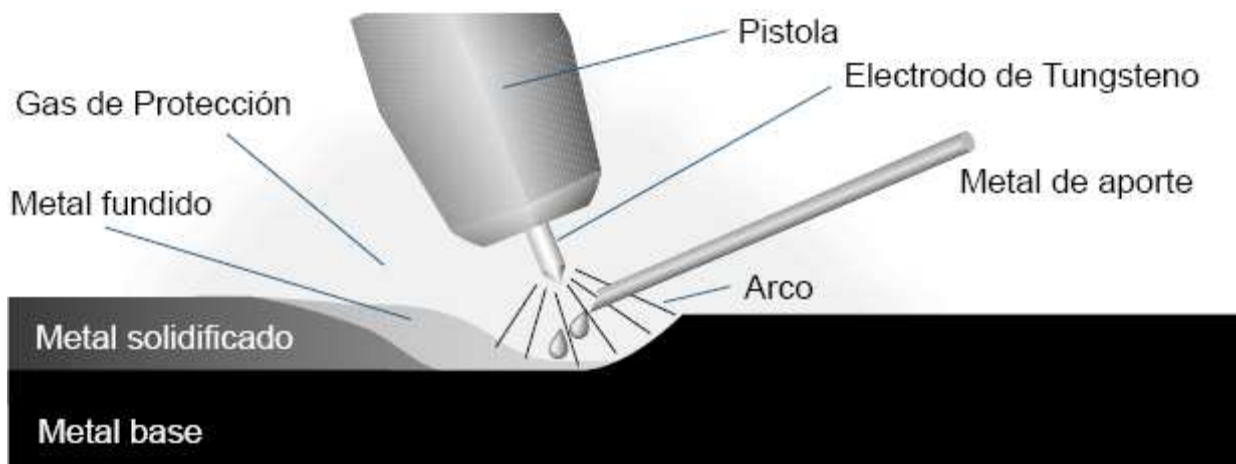


Figura 5.26- Proceso de soldadura por arco de tungsteno protegido con gas (GTAW)

Métodos de aplicación

Este proceso se aplica manualmente la mayor parte de las veces, aunque también se emplean los métodos mecanizados y automáticos, y es posible aplicarlo de manera semiautomática, pero este método se usa raramente.

Equipo de soldadura

El equipo básico empleado en este proceso consiste en una fuente de energía de corriente constante, alterna (CA) o directa (CD), una antorcha con electrodo de tungsteno, suministro de gas de protección (el cual incluye regulador de presión y medidor de flujo) y material de aporte cuando es requerido.

Algunos equipos incluyen un pedal para el control de la corriente y para iniciar la corriente de alta frecuencia (cuando esta se emplea), sistemas de circulación y enfriamiento con gas o agua para la antorcha y unidades de corriente de alta frecuencia, mismas que se emplean para suministrar una corriente cuyo propósito es ayudar a iniciar el arco y mantener un arco piloto. Este arco piloto no interviene en la soldadura en sí, pero es necesario para iniciar el arco sin que el electrodo toque la pieza de trabajo.

Los métodos de aplicación mecanizados y automático involucran el empleo de alimentadores de alambre, y éste puede alimentarse, al charco de soldadura fundida, precalentado (caliente) por medio de resistencia eléctrica, hasta una temperatura cercana a su punto de fusión, o bien a temperatura ambiente (en frío).

También se usan fuentes de corriente directa pulsada, con las cuales, para un nivel de corriente promedio dado, puede obtenerse una penetración mayor que la que se obtiene con corriente fija. La corriente directa pulsada involucra la variación repetitiva de un amperaje de arco de un valor bajo (de fondo) a un valor alto (de pico).

La figura 5.27 ilustra de manera esquemática el equipo típico del proceso de soldadura por arco de tungsteno protegido con gas.

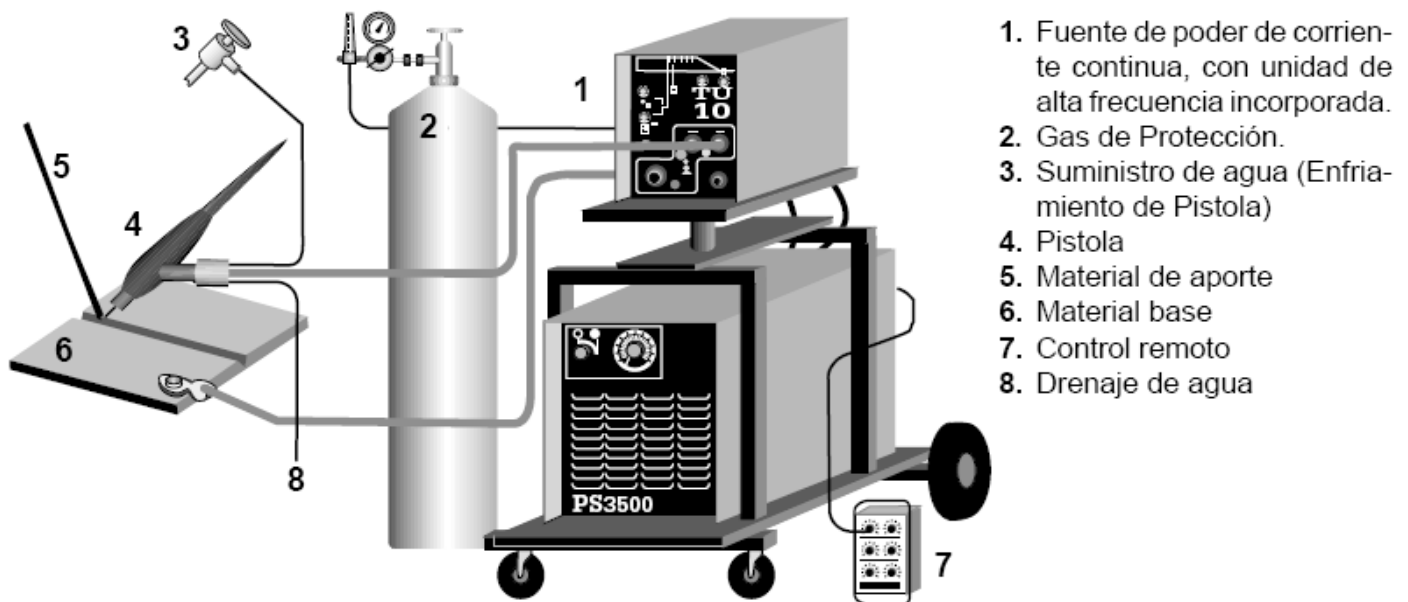


Figura 5.27- Equipo empleado en el proceso GTAW

Aplicaciones, ventajas y limitaciones

Este proceso es muy versátil y se emplea para soldar metales ferrosos y una gran variedad de metales no ferrosos, como las aleaciones de cobre, níquel, Aluminio y magnesio; asimismo, es el proceso de soldadura mas ampliamente usado para la unión de metales refractarios (tungsteno, molibdeno, tantalio, niobio y cromo) y reactivos (aleaciones de titanio, circonio y hafnio), mismos que pueden oxidarse rápidamente a temperaturas elevadas (aun ya solidificados) si no se protegen adecuadamente, y pierden ductilidad y tenacidad si absorben impurezas tales como oxígeno, hidrogeno y carbono.

Se emplea de manera extensa en producción y construcción en industrias tales como las plantas de energía nuclear, la naval, la de recipientes a presión, calderas y cambiadores de calor, así como en líneas de tubería y en la industria aeroespacial, y también para operaciones de mantenimiento y reparación. Puede ser usado para soldar en todas las posiciones, todo tipo de geometría de junta y para depositar capas superficiales en placa, lamina y tubería. Es particularmente apropiado para soldar secciones delgadas, de unas 0.010" (0.25 mm) a menos de 3/8" (10mm), y tuberías de diámetro de 1 a 6 "(25.4 a 152.4 mm), aunque también puede usarse para soldar secciones de espesor mayor a 3/8", pero en este caso, los costos resultan muy elevados.

Las principales ventajas que ofrecen este proceso se enumeran a continuación:

- Puede usarse para soldar casi todos metales y aleaciones de uso común en la industria.
- Produce soldaduras de muy alta calidad, generalmente libres de defectos.
- No produce las salpicaduras por chisporroteo asociadas con los procesos de soldadura por arco.
- No produce escoria.
- Pueden usarse con o sin metal de aporte, según sea requerido por las aplicaciones particulares.
- Permite un excelente control de la penetración del paso de raíz.
- Puede producir soldaduras autógenas (sin adición de metal de aporte) baratas a alta velocidad.
- Pueden utilizarse fuentes de energía relativamente baratas.
- Permite un control preciso de las variables de soldadura.
- Puede emplearse para soldar en todas las posiciones.
- El arco y el charco de soldadura son claramente visibles.
- Con el empleo de fuentes de corriente pulsante se reduce el calor aportado.
- Debido a que el metal de aporte no pasa a través del arco, puede ejercerse control independiente sobre las adiciones de metal de aporte y los niveles de corriente de soldadura.

Las principales limitaciones del proceso de soldadura por arco de tungsteno son las siguientes:

- Las relaciones de depósito son menores con respecto de aquellas que se obtiene con procesos de soldadura por arco que usan electrodos consumibles.
- La velocidad de soldadura es relativamente lenta.
- La destreza y coordinación que debe tener el soldador son mayores que las que las requeridas por los procesos SMAW (con el método de aplicación manual) y GMAW.
- Los costos asociados con la soldadura de metal base de espesores mayores a 3/8" (10mm) son mayores que aquellos obtenidos con los procesos por arco que emplean electrodos consumibles.
- Es difícil lograr una protección adecuada de la zona de soldadura en ambientes donde hay corriente de aire, ya que estas pueden desviar la corriente del gas de protección.
- Pueden ocurrir inclusiones de tungsteno en el metal de soldadura si el electrodo entra en contacto con el charco de soldadura, si la punta del electrodo es muy aguda o si se suelda con amperajes relativamente elevados.
- El electrodo se puede contaminar fácilmente.
- El metal de soldadura puede contaminarse si el metal de aporte no se mantiene adecuadamente cubierto con la corriente de gas de protección.
- Deben extremarse las medidas para evitar el empleo de metales base y de aporte contaminados.

Variables específicas

Las variables específicas asociadas con este proceso son principalmente el gas de protección y las características eléctricas, mismas que se describen brevemente en esta sección. En la tabla 5.28 se presenta un resumen de las variables típicas empleadas en diferentes aplicaciones.

Gases de protección

Los gases de protección inertes mas comúnmente empleados son el argón y el helio y mezclas de estos. También, en aplicaciones especiales, suelen emplearse mezclas de argón e hidrogeno.

No existen reglas para seleccionar el gas de protección para alguna aplicación determinada, ya que el argón o el helio, o una mezcla de estos puede usarse con éxito para la mayoría de las aplicaciones, con la posible excepción de la soldadura manual de materiales muy delgados, en las cuales debe emplearse argón.

En general, el argón se emplea en la mayoría de las aplicaciones, excepto donde se requiere la mayor penetración de calor que proporciona el helio, por ejemplo, cuando se sueldan espesores gruesos de metales con alta conductividad térmica, tales como el aluminio y el cobre. El argón se emplea mas que el helio debido a que, con respecto de este, ofrece las siguientes ventajas:

- Acción uniforme y suave del arco.
- Penetración reducida, lo que resulta favorable para espesores delgados.
- Acción limpiadora cuando se suelda metales como el aluminio y el magnesio.

- Menor voltaje del arco (para los mismos amperajes y longitudes de arco), lo que resulta benéfico al soldar metales delgados.
- Mayor disponibilidad y menor costo.
- Mayor resistencia a corriente de aire.
- Requiere menos flujo para dar una protección adecuada.
- Resulta más apropiado para soldar metales diferentes.
- Mayor control del charco de soldadura en posiciones vertical y sobre cabeza.
- Permite un inicio de arco mas fácil

Las ventajas principales del helio sobre argón como gas de protección son las siguientes:

- Produce zonas afectadas térmicamente más pequeñas.
- Para valores de amperaje y longitud de arco dado, con el helio se transfiere calor.
- Para valores de amperaje y longitud de arco dados, se producen mayores voltajes de arco, lo cual resulta conveniente para soldar espesores gruesos y metales con conductividad térmica alta.
- Adecuado para soldar a velocidades altas.
- Produce mayor penetración.
- Proporciona una mayor cobertura en posiciones vertical y sobre cabeza.
- Como gas de respaldo, tiende a aplanar el paso de raíz.

Las mezclas de argón y helio son útiles cuando es deseable un efecto intermedio entre las características que proporciona cada uno de estos gases, por ejemplo, cuando se requiere el mayor control asociado con el argón la penetración mas profunda que proporciona el helio. Estas mezclas se emplean ampliamente con métodos de aplicación automática. Las mezclas comunes de estos gases en volumen, son aquellas con 75% helio y 25% argón, y 80% helio y 20% argón, aunque hay disponible una amplia variedad de este tipo de mezclas.

Las mezclas de argón e hidrogeno se usan con frecuencia en casos especiales, por ejemplo, al soldar tubería (tubing) de acero inoxidable de calibre delgado con métodos de aplicación mecanizada, donde el hidrogeno no puede causar problemas de porosidad o agrietamiento inducido por hidrogeno. También se emplea en situaciones en las que la porosidad es un problema; en algunos casos, se usan mezclas de argón e hidrogeno cuando ningún otro gas puede evitar la porosidad.

Las mezclas de argón e hidrogeno son útiles para soldar aleaciones de base níquel, aceros inoxidables y aleaciones níquel-cobre, y no deberían usarse en la soldadura de aceros simples al carbono o aceros de baja aleación.

Tipo de aleación	Espesor	Polaridad y tipo de corriente	Electrodo de tungsteno	Gas de protección
Aluminio	todos	CA	Puro o al circonio	Argón o argón y helio
	Arriba de 1/8 pulgada	CDEN	Al torio	Argón o argón y helio
	Debajo de 1/8 pulgada	CDEP	Al torio o al circonio	Argón
Cobre	todos	CDEN	Al torio	Helio
	Debajo de 1/8 pulgada	CA	Puro o al circonio	Argón
Magnesio	todos	CA	Puro o al circonio	Argón
	Debajo de 1/8 pulgada	CDEP	Al torio o al circonio	Argón
Níquel	todos	CDEN	Al torio	Argón
Aceros al carbono y de baja aleación	todos	CDEN	Al torio	Argón o argón y helio
	Debajo de 1/8 pulgada	CA	Puro o al circonio	Argón
Aceros inoxidable	todos	CDEN	Al torio	Argón o argón y helio
	Debajo de 1/8 pulgada	CA	Puro o al circonio	Argón
Titanio	todos	CDEN	Al torio	Argón

Tabla 5.10 - Tipo de corriente y polaridad, electrodos de tungsteno y gas de protección recomendados para soldar diferentes metales.

Estas mezclas permiten incrementar las velocidades de soldadura, ya que el hidrogeno aumenta el voltaje del arco y a la vez, el calor de soldadura; también ayudan a controlar el perfil de los cordones. Se usan mezclas hasta de 35% de hidrogeno, pero mezclas típicas para soldadura mecanizada contiene 15% de este gas, y para soldadura manual, algunas veces se emplea una mezcla con 5% hidrogeno a fin de obtener soldaduras más limpias.

El flujo de gas de protección requerido depende de el tamaño de la copa o boquilla, el tamaño del charco de soldadura y del movimiento del aire. Por lo general, la velocidad del flujo aumenta en relación directa con el área de la selección transversal de la boquilla, teniendo en cuenta la obstrucción causada por el collar de la antorcha. El diámetro de la boquilla se selecciona en base del tamaño del charco de soldadura y la reactividad del material a soldarse. La velocidad mínima de flujo requerida para una aplicación dada, esta determinada por la necesidad de una corriente fuerte, capaz de compensar los efectos de las corrientes de aire y del calentamiento producido por el arco.

Con las antorchas de uso común, las velocidades de flujo típicas para argón varían de 15-35 pie³/h (7-16 L/min), y para helio, de 31-50 pie³/h (14-24 L/min). Las velocidades excesivas de flujo causan turbulencia en la corriente de gas, lo cual puede provocar contaminación atmosférica en el cordón de soldadura.

La razón por la que es necesaria una mayor velocidad de flujo de gas cuando se emplea helio que cuando se usa argón, reside en que el principal factor de la efectividad del gas de protección es la densidad del mismo: El argón es aproximadamente 1.3 veces mas pesado que el aire y unas 10 veces mas pesado que el helio; el argón, después de salir de la boquilla de la antorcha forma un manto sobre el área de soldadura, mientras que el helio, debido a que es más ligero, tiende a elevarse sobre la boquilla. Como regla práctica se recomienda que la velocidad del flujo de helio sea doble o el triple que la del argón.

Otras variables asociadas con los gases de protección son el gas de respaldo (backing gas) y el de arrastre (training gas): en algunas aplicaciones, como las juntas circunferenciales de tubería, se emplea gas de respaldo para proteger contra la oxidación el lado de abajo (opuesto al lado por donde se suelda) de la soldadura y las superficies del metal base adyacentes a ésta. Adicionalmente, el gas de respaldo ayuda a obtener perfiles uniformes y las alturas deseadas de refuerzo del cordón de raíz, así como a eliminar el socavado y, en algunos materiales, ayuda a reducir la porosidad y el agrietamiento en la raíz. Cuando se emplea gas de respaldo, es necesario purgar (pre-purga) el aire (del lado opuesto al que se suelda) de la región a soldarse, continuar el flujo de gas de respaldo durante la operación de soldadura y después de esta (post-purga), hasta que la junta está razonablemente fría.

El argón y el helio se pueden emplear como gases de respaldo en prácticamente todos los materiales, y el nitrógeno resulta satisfactorio al soldar aceros inoxidables austeníticos, así como el cobre y sus aleaciones.

El gas de arrastre se emplea cuando se sueldan metales reactivos, tales como el titanio y el circonio, que a temperaturas muy por de bajo de las de fusión, aún reaccionan con el aire. El gas de arrastre asegura que el área calentada durante la soldadura permanezca cubierta con gas inerte hasta que se haya enfriado a temperaturas a las cuales ya no reaccione con la atmósfera. En algunos casos, es necesario emplear cámaras de atmósfera. Controlada al soldar metales reactivos.

Características eléctricas

Las principales características eléctricas de este proceso son de tipo de corriente de soldadura, el amperaje y el voltaje.

En la mayoría de las aplicaciones, este proceso opera con corriente directa y electrodo negativo-CCEN- (polaridad directa), aunque suele usarse corriente alterna para soldar aleaciones de magnesio y aluminio; el empleo de la corriente directa con electrodo positivo-CCEP- (polaridad invertida) por lo general está limitado a la soldadura de espesores muy delgados.

La CCEN se emplea más ampliamente en este proceso debido a que al usarse un electrodo de tungsteno (termoiónico), aproximadamente el 70% del calor es generado en el ánodo (metal base) y 30% en el cátodo (electrodo), por lo que se obtiene una penetración más profunda que con corriente directa con electrodo positivo. Adicionalmente, con CCEN, la punta del electrodo es enfriada por la “evaporación” de electrones, mientras que con CCEP, la punta del electrodo es calentada por el bombardeo de electrones y por la resistencia al paso de la corriente eléctrica. Debido a esta razón, para reducir el calentamiento provocado por la resistencia eléctrica e incrementar la conducción térmica dentro del collar del electrodo, con CCEP se requiere un electrodo de mayor diámetro para una corriente de soldadura dada, que con CCEN. La capacidad de transportar corriente de un electrodo conectado al polo positivo es aproximadamente un décimo que la de un electrodo conectado al polo negativo.

La corriente alterna se usaron aluminio y magnesio debido a que cuando ésta opera en su periodo de polaridad invertida, se produce una acción de limpieza catódica en la superficie de la pieza, misma que remueve el óxido refractario superficial que dificulta las operaciones de soldadura.

La intensidad de la corriente, para una aplicación específica, se establece en base de factores tales como el espesor y tipo del metal base a soldarse, el diámetro y tipo de electrodo, el tipo de corriente y polaridad y el tamaño de copa de gas a usarse. Al incrementarse el amperaje aumentan la penetración y el voltaje (para una longitud de arco dada)

El voltaje del arco es el voltaje medido entre el electrodo y la pieza de trabajo, y está influido por la corriente del arco, el tipo de gas de protección, la forma de la punta del electrodo y la distancia entre este y la pieza de trabajo. La longitud del arco tiene una fuerte influencia sobre el ancho del charco de soldadura: a mayor longitud corresponde una mayor anchura del charco, por lo que, con excepción de aplicaciones que involucran espesores delgados, debieran emplearse longitudes de arco tan cortas como sea posible, pero teniendo cuidado de que el electrodo no entre en corto circuito con el charco de soldadura o con el metal de aporte. Esto último no es aplicable a la técnica conocida como arco “enterrado” (buried arc) empleada en soldadura mecanizada, en la cual el arco se puede sumergirse en el metal base para producir soldaduras angostas de poca penetración a altas velocidades. Esta técnica involucra el uso de CCEN, helio como gas de protección y amperajes relativamente elevados.

Otra variable importante es la forma de la punta del electrodo, ya que ésta tiene influencia sobre el cordón. En general, mientras más agudos es el ángulo incluido de afilado del electrodo, mayor es la penetración y menor ancho del cordón.

La geometría de la punta del electrodo debiera ser considerada al establecer el procedimiento de soldadura, y ser mantenida de manera consistente durante las operaciones de producción, ya que si cambia ésta, también cambiarán la forma y el tamaño de los cordones. Para soldar con corriente alterna y electrodos de tungsteno puro o aleado con circonio, se recomienda un extremo en forma de balín, mientras que para soldar con corriente directa, debieran emplearse electrodos de tungsteno al torio, al lantano o al cerio, afiliados en forma de cono truncado.

Otras variables a considerar son la velocidad de soldadura y la oscilación del arco: a menor velocidad, aumenta el ancho cordón y también (aunque moderadamente) la penetración. El ancho de los cordones también aumenta al oscilar el arco.

Combustibles, especificaciones y clasificaciones

Las especificaciones asociadas con este proceso se refieren tanto a los electrodos de tungsteno como a los metales de aporte a emplear.

Los electrodos de tungsteno son no combustibles, ya que sólo funcionan como una de las terminales eléctricas del arco que suministra el calor requerido. El tungsteno tiene un punto de fusión de 3410°C (6170°F), y al aproximarse a esta temperatura, se vuelve termoiónico, esto es, una fuente rápida de electrones.

Durante la soldadura, los electrodos se calientan debido al efecto de su resistencia eléctrica, pero a causa del enfriamiento de la “ebullición” de los electrones en la punta, ésta no se funde, de hecho, está más fría que la parte del electrodo entre la punta y el collar de la antorcha.

El intervalo de diámetros con que se fabrican los electrodos de tungsteno varía de 0.010” (0,25mm) a 1/4 “ (6.4mm) y su longitud normalmente de 3” a 6” (76 a 152 mm) los requisitos y clasificaciones para este tipo de electrodos están establecidos en la forma **ANSI/AWS A5.12**, “especificación para electrodos de tungsteno y aleaciones de tungsteno para soldadura y corte por arco”. La tabla 5.11 resume la información más relevante relacionada tal clasificación.

Clasificación AWS	Elemento de aleación	color
EWP	Tungsteno puro	verde
EWCe-2	Cerio(2% nominal)	naranja
EWTh-1	Torio (1% nominal)	amarillo
EWTh-2	Torio (2% nominal)	rojo
EWLa-1	Lantano (1% nominal)	negro
EWZr-1	Zirconio (1% nominal)	café
EWG	No especificado	gris

Figura 5.11 - Clasificación y color de identificación de los electrodos de tungsteno

Los metales de aporte empleados con este proceso están contenidos en las siguientes especificaciones:

- AWS A5.7 para electrodos y varillas de cobre y sus aleaciones
- AWS 5.9 para electrodos y varillas de acero inoxidable
- AWS A5.10 para electrodos y varillas de aluminio y aleaciones de aluminio
- AWS A5.13 para electrodos y varillas sólidos para recubrimientos de soldaduras superficiales
- AWS A5.14 para electrodos y varillas de níquel y sus aleaciones
- AWS A5.18 para electrodos y varillas de acero al carbono
- AWS A5.19 para electrodos y varillas de aleaciones de magnesio
- AWS A5.21 para electrodos y varillas compuestos para recubrimientos de soldadura superficies
- AWS A5.22 para electrodos tubulares (para el proceso FCAW) y varillas tubulares de acero inoxidable (para emplear con el proceso GTAW)
- AWS A5.24 para electrodos y varillas de circonio y aleaciones de circonio
- AWS A5.28 para electrodos (sólidos y compuestos) y varillas sólidas de acero de baja aleación.
- AWS A5.30, especificación para insertos consumibles

La clasificación AWS de los metales de aporte para el proceso GTAW en cada una de las especificaciones anteriores sigue el modelo estándar empleado en las siguientes especificaciones emitidas por la Sociedad Americana de Soldadura. En las paginas 99 y 199 se describe el sistema de clasificación de los metales de aporte para soldad aceros al carbono con este proceso y con GMAW (especificación AWS A 5.1.8.).

La designación de las varillas tubulares (AWS A5.22) no incluye la letra "E", sino solamente la "R", que es seguida por los dígitos que designan la composición química del metal del deposito de soldadura (normalmente seguido por la "L", que hace referencia a un bajo contenido de carbono), la letra "T" que indica que se trata de una varilla tubular, el numero 1 que establece que tal varilla se puede usar en todas las posiciones de soldadura y el numero 5 o letra G. el 5 indica que el gas de protección extremo a usarse es 100% argón, mientras que la G se refiere a un metal de aporte de una clasificación general para la cual no se especifican ni el medio de protección externa ni la polaridad con que deben emplearse. Una clasificación típica de estos metales de aporte es R308LT1-5.

El patrón de clasificación de este tipo de varillas, así como el medio de protección externo y la polaridad establecidas para realizar las pruebas de clasificación (que debe realizar el fabricante del metal de aporte) o recomendadas para soldar, se indica en la siguiente tabla.

Clasificación AWS	Protección externa	Polaridad
RXXXXT1-5	100% Argón	CCEN
RXXXXT1-G	No especificado	No especificada

Tabla 5.12 - Polaridad y medio de protección externa para varillas tubulares

El sistema de clasificación para metales de aporte diferentes de las aleaciones ferrosas también sigue el mismo patrón, Por ejemplo, las varillas y electrodos de aluminio (especificación AWS A5.10) se clasifican en base de su composición química y una prueba de características de uso. Una clasificación típica de esta especificación es ER4145, en donde 4145 indica la nomenclatura de designación de la aleación de la Asociación de Aluminio.

Las varillas (para emplearse con los procesos GTAW y OFW) y los electrodos sólidos (para emplearse en los procesos GMAW y SMAW) para aplicar depósitos superficiales, cubiertos por la especificación AWS A5.13, se clasifican en base de composición química, precedida por las letras E,R o ER, según su aplicación como electrodos o varillas de aporte. Clasificaciones típicas incluidas en esta especificación son RFe-5-A y RNiCr-A, en las cuales, los símbolos químicos indican los principales elementos de la clasificación, y la letra A (B, C o D) establece una identificación adicional cuando tales clasificaciones corresponden a un grupo básico. También puede haber subdivisiones adicionales indicadas con los números 1,2, etc., como en el caso de la designación ERcAl-A2.

Las varillas (a usarse en los procesos GTAW y OFW) y electrodos (para el proceso SMAW) compuestos, incluidos en la especificación AWS A5.21, también para aplicar recubrimientos de soldadura, se clasifican de una manera casi idéntica a los metales de aporte considerados en el párrafo anterior, con excepción de los electrodos y varillas completas de carburo de tungsteno, los cuales están clasificados en base de la composición química del tubo de acero al carbono y de los gránulos de carburo de tungsteno del núcleo, así como del porcentaje y distribución de tamaño de los gránulos de éstos. Así, la clasificación RWC-5/8 indica que se trata de una varilla de carburo de tungsteno, con un tamaño de malla de los gránulos de 5 a 8.

PROCESO DE SOLDADURA POR ARCO PLASMA (PLASMA ARC WELDING –PAW)

Es un proceso de soldadura por arco en el cual se emplea un arco constreñido entre un electrodo no consumible y el charco de soldadura (arco transferido) o entre el electrodo y una boquilla de constricción (arco no transferido). La protección se obtiene del gas caliente ionizado que suministra la antorcha, y normalmente es complementado por una fuente auxiliar de gas o mezcla de gases inertes. No se aplica presión y puede emplearse con o sin adiciones de metal de aporte.

En muchos sentidos, este proceso es similar al de soldadura por arco de tungsteno protegido con gas (GTAW). Una de las semejanzas consiste en el empleo de un electrodo de tungsteno, pero con la diferencia de que el electrodo está alojado completamente dentro de la antorcha, en la cual se crea una cámara de gas alrededor del electrodo. El arco calienta al gas (argón) que se alimenta dentro de la antorcha hasta temperaturas a las cuales el gas se ioniza y puede conducir la electricidad. A este gas ionizado se le denomina plasma y sale de la boquilla de la antorcha a temperaturas aproximadas a 16.700°C (20.000°F).

Debido a que el electrodo no sobresale de la boquilla, el arco se inicia, no por contacto del electrodo con la pieza de trabajo (con el proceso GTAW), sino por medio de un arco piloto de baja corriente entre el electrodo y la boquilla constrictora. La energía del arco piloto normalmente es suministrada por una fuente separada dentro de la consola de control o por la fuente misma de energía de soldadura; el arco piloto por lo general es iniciado a través de una corriente alterna de alta frecuencia o por pulsos de corriente directa de alto voltaje superpuestos a la corriente de soldadura.

El término arco constreñido (constricted arc) se refiere a una columna de arco plasma que es formada por el orificio de constricción o estrechamiento que tiene la boquilla de la antorcha de arco plasma. Los propósitos del empleo de arcos constreñido son: mayor contenido de energía, estabilidad del arco mejorada, mayor concentración del calor y mayor estabilidad en la dirección del chorro de plasma (ya que es afectada en menor grado por los campos magnéticos). Estos factores hacen que el proceso de arco plasma tenga ventajas, con respecto de los procesos que operan con arco abierto (GTAW, SMAW, GMAW y FCAW), tales como velocidades de soldadura más altas y mayor penetración.

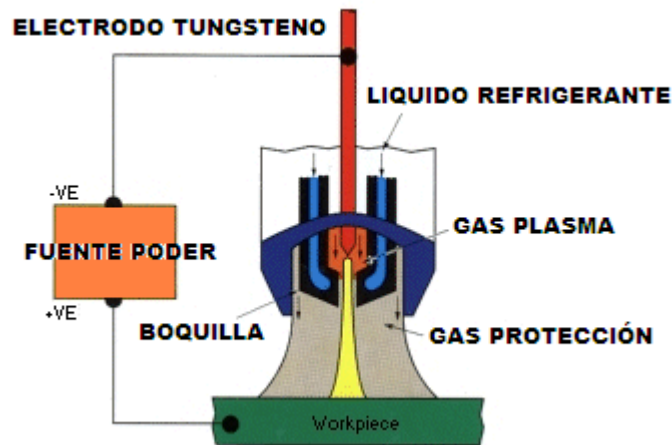


Figura 5.28 –Soldadura por Arco Plasma

Los dos modos de arco con que opera este proceso son arco transferido y arco no transferido. En el primer modo, el arco se transfiere a la pieza de trabajo y esta forma parte del circuito eléctrico, de modo que el calor se obtiene de la parte de la pieza de trabajo que actúa como ánodo y el chorro de plasma. En el modo arco no transferido, el arco se establece y mantiene entre el electrodo y el orificio de constricción de la boquilla, y el plasma del arco es forzado a pasar a través del orificio por el gas plasma; en este modo, la pieza de trabajo no es parte del circuito eléctrico y el calor de soldadura se obtiene únicamente del chorro de plasma. El modo arco transferido se emplea generalmente para soldar, mientras que el arco no transferido se usa para operaciones de corte, aunque también se emplea en aplicaciones en las cuales son concentraciones de energía.

Existen dos técnicas o modos de operar asociados con este proceso “en fusión” (melt-in) y “ojo de cerradura” (keyhole) el primero produce soldaduras similares a aquellas obtenidas con el proceso GTAW convencional y normalmente se usa para soldar desde espesores muy delgados, de 0.025 a 1.6 mm (0.001 a 0.62”), hasta espesores de alrededor de 1/4” (con corrientes de soldadura de 50 a 400 amperios). En el modo ojo de cerradura, el calor concentrado penetra parcial o totalmente la pieza de trabajo, formando un orificio al lado de avance del charco de soldadura, y según avanza la fuente de calor, el material fundido llena el lado posterior del orificio para formar el cordón. La operación con este modo es posible en la mayoría de los metales base de espesores de 2,5 a 10mm (3/32” a 3/8”) y, en algunas aleaciones de aluminio y titanio, pueden soldarse espesores de hasta 19mm (3/4”), con un solo paso.

Métodos de aplicación

El método de aplicación más empleado para soldar con este proceso es el manual, principalmente cuando se sueldan metales base de espesor muy delgado (0,025 a 1,6mm) con el modo en fusión y con corrientes de 0,1 a 50 amperios, o con corriente relativamente alta (usualmente menor a 100 amperios) para soldar juntas a tope o traslape de espesores de 0.8 a 3.2mm (1/32 a 1/8"). Cuando se requiere soldar manualmente con corrientes mayores de 50 amperios, el proceso GTAW resulta, en términos económicos y de habilidad la requerida del soldador, una mejor elección que el PAW.

El método mecanizado se emplea para soldar con los modos "en fusión" y "ojo de cerradura"; el primero de estos modos con frecuencia se usa en procedimientos de soldadura que involucran corrientes de unos 50 a 400 amperios.

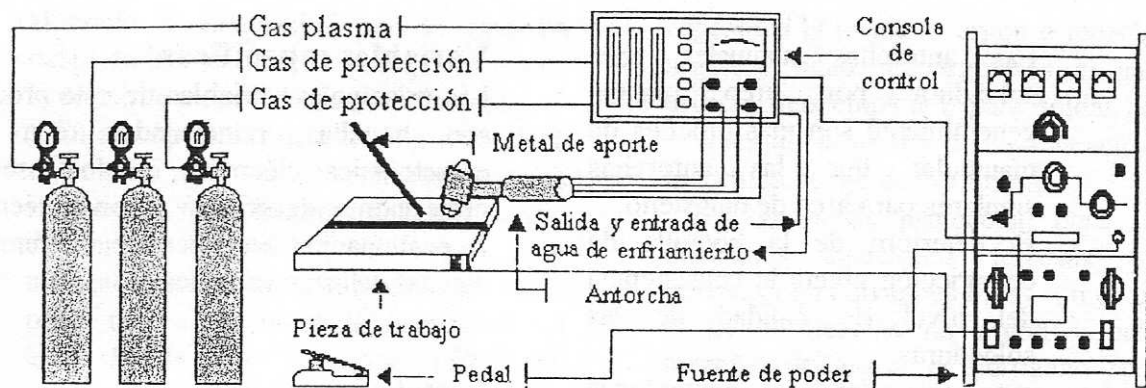


Figura 5.29-equipo para soldadura por arco de plasma

Equipo

Los principales componentes del equipo necesario para soldar manualmente con arco plasma son: fuente de energía de corriente directa, consola de control, unidad de control remoto de corriente, antorcha sistema de enfriamiento, suministros de gas plasma (orificio) y de protección y accesorios tales como los cables de conexión, interruptores, reguladores de gas inerte y medidores de flujo de gas. El equipo típico para soldadura mecanizada consta de la fuente de energía, unidad de control, generador de energía de alta frecuencia, suministros de gas de plasma y gas de protección, antorcha mecanizada y pedestal para la antorcha o un carro de desplazamiento, y puede incluir un dispositivo de control de voltaje de arco y sistema de alimentación de alambre. La figura 5.29 muestra el equipo típico de soldadura aplicada manualmente con este proceso.

Las fuentes de energía requeridas para soldar con este proceso son de corriente directa y de voltaje variable (corriente constante), y pueden ser de corriente estable o de corriente pulsada, similares, en ambos casos, a aquellas empleada en el proceso GTAW. También, para soldar aluminio con el modo ojo de cerradura, se emplean fuentes de corriente alterna de onda cuadrada con la polaridad variable.

Aplicaciones ventajas y limitaciones

El proceso de soldadura por arco plasma puede considerarse como una extensión de GTAW, y todos los metales que se sueldan con este último también pueden soldarse con PAW, pero con las ventajas asociadas con la mayor densidad de energías propias del arco de plasma, misma que resulta particularmente útil al soldar metales base de espesores muy pequeños con corrientes bajas.

Se emplea ampliamente en las industrias de fabricación en general, en la nuclear y la aeroespacial, así como para soldar alabes de turbina y componentes de geometría intrincada que involucran las soldaduras pequeñas, tales como mallas de alambre, equipo médico, electrónico, y de instrumentación.

El modo "en fusión" (melt-in) con alta y baja corriente tiene las siguientes ventajas y limitaciones con respecto al proceso GTAW.

Ventajas:

1. La Concentración de energía es mayor, por lo que las velocidades de soldaduras son más altas en algunas aplicaciones y se requiere de corrientes menores para producir una soldadura dada, lo que reduce la contracción y distorsión hasta de un 50%.
2. El arco es más estable
3. La penetración puede controlarse por medio de las variables de soldadura.
4. Produce cordones más angostos en términos de la relación profundidad/ancho), lo que resulta en menor distorsión.
5. Las variaciones moderadas en la separación entre antorcha y pieza de trabajo tienen poco efecto en la forma del cordón y en la concentración de calor en la parte a soldar, lo que impide que el electrodo o la antorcha toquen el charco de soldadura o el metal de aporte, elimina las posibilidades de contaminación con tungsteno y permite ahorros de tiempo de afilado del electrodo, además de que facilita la aplicación de la soldadura en todas las posiciones.

Limitaciones:

1. Ya que el arco constreñido es muy angosto, hay muy poca tolerancia para la mala alineación de las juntas.
2. Las antorchas manuales para soldadura por arco plasma generalmente son más difíciles de manipular que las antorchas similares para arco de tungsteno.
3. El deterioro de la boquilla de construcción afecta la consistencia del nivel de calidad de las soldaduras.

Las principales ventajas y limitaciones del arco plasma en el modo de ojo de cerradura, con respecto del arco de tungsteno protegido con gas se listan a continuación.

Ventajas:

1. La mayor penetración obtenida en la junta permite reducir el número de pasos requerido para una junta dada.
2. La zona de fusión simétrica de la soldadura reduce la tendencia a la distorsión transversal.
3. El gas plasma que fluye a través del ojo de cerradura abierto ayuda a evitar la porosidad.
4. En juntas a tope, en muchos casos permite el empleo de ranuras cuadradas, lo que ayuda a reducir tiempos de soldadura y costos de preparación de juntas.

Limitaciones:

1. El método de aplicación manual requiere mayor habilidad del soldador, especialmente al soldar espesores gruesos.

2. Los procedimientos de soldadura involucran un número mayor de variables, dentro de un intervalo de operación estrecho.
3. Aunque puede aplicarse en todas las posiciones, normalmente está restringido, con excepción de las aleaciones de aluminio, a la posición plana.
4. El deterioro de la antorcha afecta la conciencia del nivel de calidad de las soldaduras.

Variables específicas

Las principales variables de este proceso son aquellas relacionadas con las características eléctricas, con los gases de protección y de orificio y con la técnica. A continuación se describen brevemente algunas de estas variables.

Características eléctricas

Las principales variables asociadas con las características son los tipos de corrientes. Y la polaridad, la intensidad de la corriente, la longitud del arco y a los electrodos de tungsteno.

Para la mayoría de las aplicaciones de arco plasma se emplea corriente directa electrodo negativo (CDEN), con arco transferido y con electrodos de tungsteno puro o aleado con torio. La intensidad de corriente para soldar con CDEN oscila de 0.1 a unos 500 amperios. La corriente directa del electrodo positivo, debido a que provoca el calentamiento excesivo del electrodo, solo se utiliza de manera restringida para soldar aleaciones de aluminio con amperaje bajo, por lo general menor a 100 amperios.

La corriente pulsada frecuentemente se usa para soldar metales ferrosos, incluidos los aceros inoxidable, así como aleaciones de níquel y de titanio.

También se pueden soldar aleaciones de aluminio y magnesio con corriente alterna de onda sinusoidal con estabilización continua de alta frecuencia pero el intervalo de corriente está limitado entre unos 10 y 100 amperios, ya que las altas intensidades de corriente deterioran al electrodo de manera drástica durante el ciclo de la polaridad invertida. La corriente alterna de onda cuadrada de medios ciclos no balanceados de polaridad directa e invertida (arco plasma de polaridad variable), la cual no requiere de la estabilización con alta frecuencia, es muy eficiente para soldar aleaciones de aluminio y magnesio, por lo que ha desplazado con muchas ventajas el uso de la corriente alterna de onda sinusoidal.

En arco plasma, debido a la naturaleza columnar del arco constreñido, las variaciones en la longitud del arco, dentro de límites razonables, no tiene gran influencia sobre la entrada de calor en la pieza de trabajo ni en la intensidad del arco. En la soldadura con GTAW no sucede esto, ya que el arco tiene forma cónica y pequeñas variaciones en la longitud del arco provocan grandes cambios en la transferencia de calor por unidad de área en la pieza de trabajo. El chorro de plasma colimado de forma esencialmente cilíndrica permite, con respecto a GTAW, una mayor distancia de la antorcha a la pieza de trabajo, lo que representa una ventaja desde el punto de vista de la habilidad del soldador para manipular la antorcha.

Gases

Los gases a usar dependen del metal a soldarse y su espesor, así como de la técnica (en fusión u ojo de cerradura) a emplear. Para muchas aplicaciones, en particular cuando se emplean altas intensidades de corriente, el gas de protección es el mismo que el de orificio.

El gas de orificio, con respecto del electrodo, debe de ser inerte a fin de evitar se deterioro, y para la protección, los gases normalmente son inertes, aunque pueden usarse gases activos si éstos no afectan las propiedades de la soldadura.

Para la soldadura de arco plasma con bajas corrientes se prefiere el argón como gas e orificio, ya que su bajo potencial de ionización de arco confiable. Para soldar con corrientes altas, como gases de orificio por lo general se emplean, dependiendo del metal a soldar, de su espesor y la técnica, argón o mezclas de argón y helio. El argón es el gas de orificio más empleado para soldar aceros simples al carbono y de baja aleación con la técnica de ojo de cerradura.

Los gases de protección para soldar diferentes aleaciones ferrosas y no ferrosas con corrientes bajas son el argón, el helio, mezclas de argón y helio y mezclas de argón e hidrogeno (por lo general de 1 a 5% de hidrogeno), y para los aceros simples al carbono de baja aleación e inoxidable, así como metales reactivos tales como el titanio, tantalio y el circonio se prefiere el uso de argón. Debido a que el gas de protección no entra en contacto con el electrodo de tungsteno, algunas veces se emplea dióxido de carbono o mezclas de argón y dióxido de carbono como gas de protección.

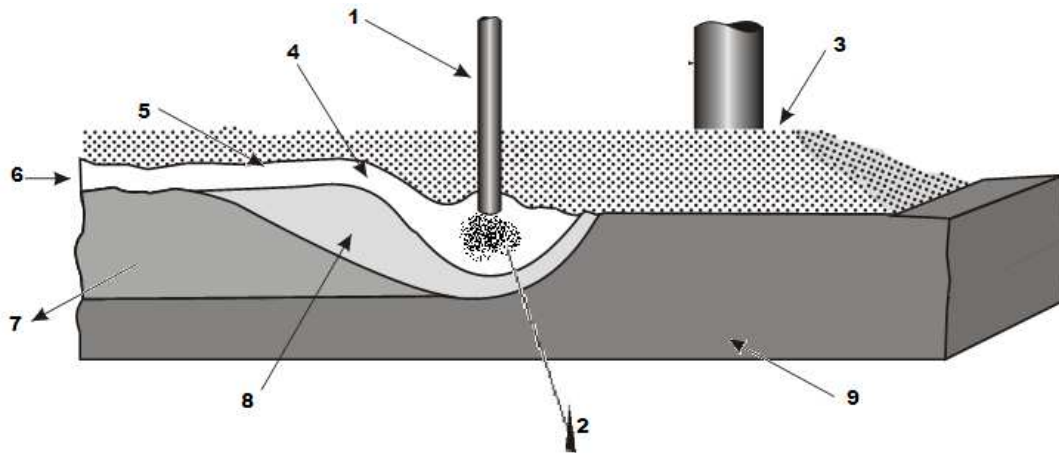
Cuando se sueldan metales reactivos, entre las variables asociadas con los gases, también deben tenerse en cuenta el gas de respaldo (backing gas) y el de arrastre o seguimiento (training gas); en términos generales, las consideraciones hechas al respecto para la soldadura con GTAW también son aplicables para el proceso de arco plasma.

Consumibles, especificaciones y clasificaciones

Los electrodos de tungsteno y los metales de aporte, con excepción de las varillas sólidas y compuestas para recubrimientos de soldadura (AWS A 5.13 y A5.21), varillas tubulares de acero inoxidable (AWS A5.22) e insertos consumibles (AWS A5.30) que se emplean en arco plasma, son los mismos que los que se utilizan en GTAW, por lo que el lector puede remitirse a tal sección para consultar las especificaciones y clasificaciones aplicables.

PROCESO DE SOLDADURA POR ARCO SUMERGIDO (SUBMERGED ARC WELDING-SAW)

Proceso en el que se emplea uno o más arcos entre el o los electrodos metálicos desnudos y el arco de soldadura. El arco y el metal fundido se protegen por medio de una capa de fundente granular sobre las piezas de trabajo; no se aplica presión y se emplea metal de aporte de alambre (electrodo) y algunas veces de fuentes adicionales, tales como varilla o metal granulado. En la siguiente figura se muestra de manera esquemática este proceso.



- | | |
|--------------------------|---------------------------------|
| 1- ELECTRODO | 6- ESCORIA SOLIDA |
| 2- ARCO | 7- METAL DE SOLDADURA SOLIDO |
| 3- FUNDENTE | 8- CHARCO DE METAL DE SOLDADURA |
| 4- ESCORIA FUNDIDA | 9- METAL BASE |
| 5- ESCORIA SOLIDIFICANDO | |

Figura 5.30- Proceso de Soldadura por Arco Sumergido (SAW)

Al iniciarse la operación de soldadura, el extremo de alambre (electrodo) toca la pieza de trabajo, el fundente granular procedente de la tolva cubre el área a soldar y se inicia el arco. El electrodo se alimenta a velocidad controlada por medio de un alimentador de alambre y el fundente también sigue adicionándose durante toda la operación, de manera que el alambre, el arco y el charco de soldadura siempre permanecen cubiertos por el fundente, por lo que el arco no es visible y la soldadura se realiza sin la radiación intensa característica de los procesos de arco abierto, y genera muy poco humo.

Aunque el fundente líquido puede conducir algo de corriente entre el alambre y el metal base y generar calor debido a la resistencia eléctrica, la principal fuente de calor la suministra el arco, el cual progresivamente funde una parte del fundente, el extremo del alambre y los bordes adyacentes del metal base debajo de la capa de escoria líquida. El metal fundido cercano al arco está en un estado de alta turbulencia y las burbujas de gas que pudieran generarse son arrastradas rápidamente hacia la superficie del charco de soldadura.

El fundente o escoria líquida flota sobre el metal fundido y protege de la atmósfera a la zona de soldadura, disuelve las impurezas del metal base y del electrodo y las hace flotar sobre la superficie. El fundente también puede adicionar o remover algunos elementos de aleación. Cuando el metal de soldadura y el fundente líquidos solidifican, se forman el cordón, y una capa de escoria protectora, respectivamente.

El desplazamiento se realiza manual o mecánicamente a lo largo de la junta o bien, las piezas de trabajo se pueden desplazar por debajo de un alimentador estacionario de alambre.

Además de la proteger al arco y al charco de soldadura, la escoria evita que el cordón solidificado- pero aún caliente- se oxide y enfríe bruscamente, suministra agentes limpiadores, estabiliza al arco e influye en la forma de los cordones. Otras funciones del fundente, dependiendo de su tipo son: proporcionar agentes desoxidantes y elementos de aleación y ayuda a controlar el tamaño del grano y la composición química, así como algunas propiedades de los depositos de soldadura, tales como resistencia a la tensión y al impacto.

Por su parte, las funciones del electrodo son las de suministrar el metal de aporte necesario, conducir la energía eléctrica y en cierta medida, proporcionar elementos de aleación y agentes limpiadores y desoxidantes.

La soldadura con arco sumergido puede realizarse con muchas variantes para cubrir las necesidades impuestos por los requisitos de calidad o producción: se presta a una gran variedad de combinaciones de fundentes y electrodos para proporcionar las propiedades mecánicas y composición química requeridas, y puede aplicarse con fuentes de corriente alterna y directa, con voltaje constante y con voltaje variable, con un solo electrodo o con varios, y éstos, pueden estar conectados a una misma fuente de energía o cada uno a una fuente independiente.

Además de la aplicación típica que incluye una fuente de poder y un solo electrodo, existen los siguientes arreglos:- sistemas de alambres múltiples (multiple wire systems), los cuales combinan dos o más alambres que se alimentan al mismo charco. Un alambre debe transportar corriente y el otro o los otros pueden transportarla o no (cold filler), y pueden estar conectados a una o mas fuentes, mismas que pueden ser de corriente alterna o corriente directa, o una combinación de ambas.

-Electrodos gemelos (twin electrodes o twin arc). Es una configuración en la cual dos electrodos conectados a una fuente única se alimentan al mismo charco de soldadura con un solo alimentador de alambre. Este arreglo normalmente se emplea con corriente directa electrodo positivo.

-arco sumergido con arcos tándem (tandem arc SAW). Esta configuración consiste en un electrodo guía y uno o más electrodos de seguimiento alimentados a un mismo charco de soldadura mediante fuentes y alimentadores independientes.

Existen dos arreglos básicos: en uno el electrodo guía se conecta una fuente de corriente directa electrodo positivo y los otros a fuentes de corriente alterna, mientras que en el segundo, todos los electrodos operan con corriente alterna.

Adicionalmente, existen otras variantes tales como la soldadura de ranuras angostas que se aplica para soldar metales base de espesores gruesos –de 51mm (2”) y mayores-, adiciones de alambre que si transporta corriente (hot wire addition) y adiciones de polvo metálico (metal powder addition).

Métodos de aplicación

La soldadura por arco sumergido puede aplicarse con los métodos semiautomático mecanizado y automático.

En el método de aplicación semiautomática la soldadura se hace mediante una pistola, que el soldador sostiene con la mano, que suministra el fundente y el electrodo. El primero se adiciona por gravedad desde una tolva montada en la pistola o se alimenta a presión a través de una manguera, y el electrodo es provisto mediante un alimentador de alambre. Este método no se aplica a gran escala y esta limitado a velocidades moderadas, por lo general de 20 a 115 cm. /minuto (9 a 45 pulgadas/minuto) y a electrodos de diámetros relativamente pequeños. Los diámetros de

electrodo empleados en soldadura semiautomática son de 1.6, 1.98 y 2.4 mm (1/6", 5/64" y 3/32") e involucran corrientes de soldadura unos 200 a 600 amperios.

El método mecanizado es el que más se usa, aunque también tiene una gran aplicación el automático. La soldadura mecanizada y la automática normalmente se realizan con electrodos de 3.2 a 4.76mm (1/8" a 3/16") de diámetro, aunque se suelen usar diámetros hasta de 6.35mm (1/4") con corrientes máximas de 1600 amperios y para algunas aplicaciones, velocidades hasta de 508cm/minuto(200 pulg./min).

Equipo

El equipo típico de soldadura requerido para este proceso consta de una o mas fuentes de energía, sistemas de control del proceso, de alimentación de alambre y de suministro de fundente, y los equipos automáticos y mecanizados y aun algunos semiautomáticos, incluyen un dispositivo para el desplazamiento. El equipo opcional está compuesto por sistemas para la recuperación de fundente y para la manipulación y el posicionamiento.

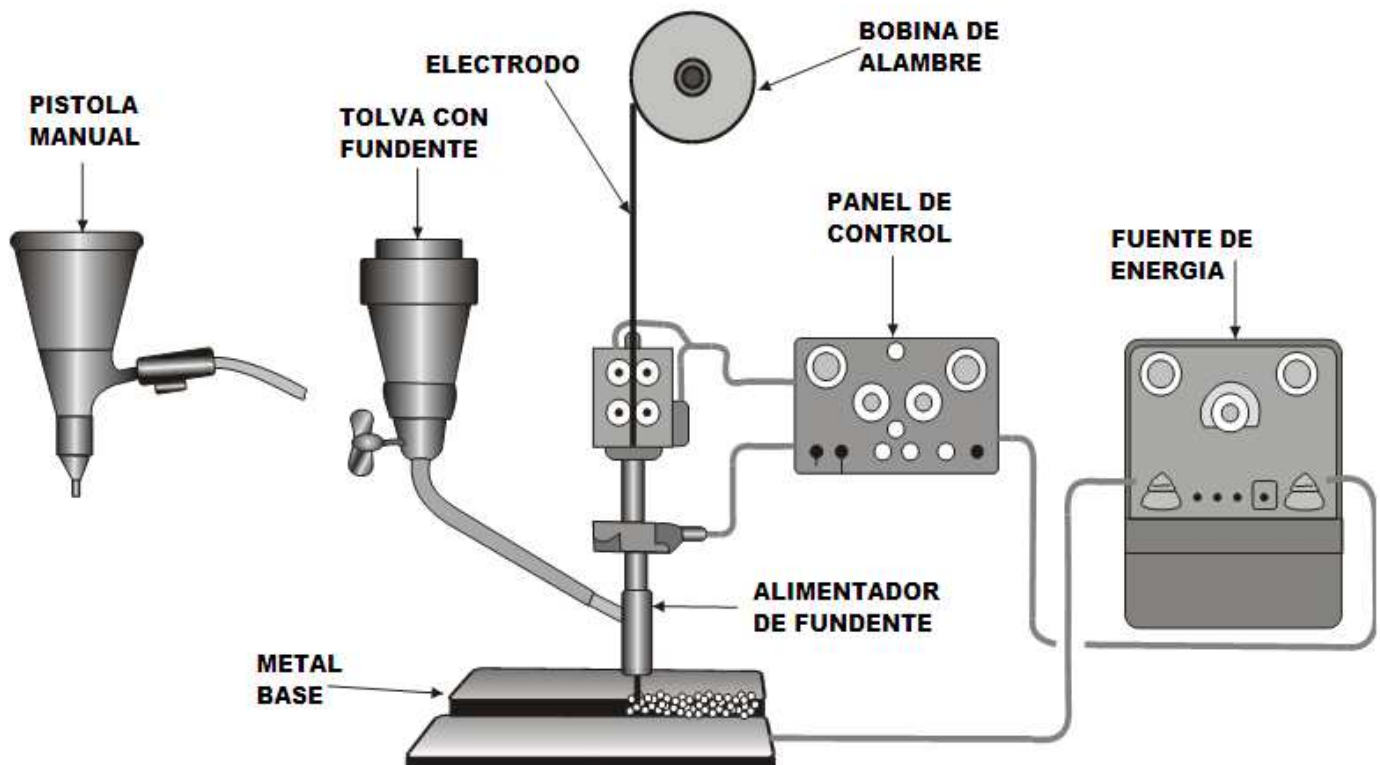


Figura 5.31- Equipo de Soldadura para el Proceso de SAW

Para soldar con arco sumergido son adecuados varios tipos de fuente de energía, pero para la aplicación dada, la fuente debe seleccionarse considerando algunos factores, ya que esta juega un papel importante desde el punto de vista operacional. Se pueden usar motores rectificadores o moto-generadores que suministran corriente directa de voltaje constante o de corriente constante, y también se utilizan maquinas de corriente alterna.

Las fuentes de voltaje constante se emplean con el método de aplicación semiautomático, mismo que involucra electrodos de diámetros de 2.4 mm (3/32") y menores, aunque también se emplean para soldadura mecanizada y automáticas con alambres de diámetros mayores y con corrientes de 300 a 1000 amperios.

Debido a que la soldadura con corriente directa provoca soplos de arcos severos cuando se emplean amperajes altos, su uso está limitado a intensidades de 1000 amperios. Este tipo de fuentes es adecuado para soldar aceros de espesor delgado a altas velocidades.

Las fuentes de corriente constante son adecuadas para soldar con corrientes hasta 1500 amperios y se pueden usar satisfactoriamente para las mismas aplicaciones que las fuentes de voltaje constante, con excepción de la unión de aceros de espesores delgados a altas velocidades. A diferencia de las fuentes de voltaje constante, las de corriente constante no son autoreguladas, por lo que se usan con un control que ajusta la velocidad de alimentación de alambre para compensar los cambios en el voltaje del arco y mantener constante su longitud.

Las fuentes de corriente alterna que más se emplean son los transformadores de corrientes constantes, mismos que también requieren de controles de velocidad variable de alimentación de alambre. También se utilizan fuentes de corriente alterna de voltaje constante de onda cuadrada con controles de velocidad constante de alimentación de alambre.

Aplicaciones, ventajas y limitaciones

El arco sumergido se emplea en una gran variedad de aplicaciones industriales, entre las que se puede mencionar la fabricación de recipientes a presión, carros de ferrocarril, tuberías y miembros estructurales que requieren soldaduras de gran longitud, también se emplea ampliamente para hacer depósitos de recubrimientos duros e inoxidables.

Los espesores típicos que se sueldan normalmente oscilan de 1.5 a 5.1mm y los metales base a los que se aplica son: aceros simple al carbono, aceros de alta resistencia, y baja aleación en condición de laminación, o tratamientos térmicos de normalizado.

Las principales ventajas y limitaciones asociadas con este proceso se indican a continuación.

Ventajas:

- Alta penetración en las juntas cuando se suelda con corriente directa y el electrodo positivo.
- Debido a la alta penetración, pueden soldarse a tope y con ranura cuadrada, placas de acero de espesores hasta de 13 mm (1/2") con un solo paso y con electrodo sencillo, y hasta de 19 mm (3/4") soldando por los dos lados, con un paso por lado y con electrodo sencillo, lo que reduce grandemente los trabajos, tiempos y costos relacionados con la preparación de soldadura.
- Aunque se emplean intensidades de corrientes elevadas, debido a que también las velocidades involucradas son altas y parte del calor se emplea para fundir el fundente, el calor aportado y la distorsión resultan relativamente moderados.
- Requiere poco entrenamiento y habilidad manual por parte del soldador y del operador.
- Permite obtener cordones de muy buena apariencia y de perfiles y tamaños uniformes.

Limitaciones:

- Prácticamente esta limitado a la posición plana y para filetes en posición horizontal.
- El equipo es relativamente costoso.
- El uso de fundentes activos y aleados requieren que los procedimientos de soldadura sean rigurosamente controlados, ya que variaciones pequeñas en el voltaje, el amperaje o la velocidad, pueden provocar cambios grandes en la composición química y en las propiedades mecánicas del metal depositado.
- En soldaduras de pasos múltiples es necesario remover la escoria a fin de evitar inclusiones.

Variables principales

Entre las principales variables específicas de este proceso están las relacionadas con los metales de aporte, las características eléctricas y la técnica. En la categoría de los metales de aporte, son relevantes los diferentes tipos de fundente y las clasificaciones de las parejas formadas por electrodos y fundentes. En los siguientes párrafos se discuten algunas de estas variables.

Tipos y clasificación de los fundentes

Los fundentes que se emplean en arco sumergido son mezclas fusibles de minerales granulados y otros compuestos químicos de composición complejas y variadas. La composición de estos, su tamaño y distribución de grano, su punto de fusión y la viscosidad y la actividad química de las escorias que forman influyen grandemente en la forma de los depósitos de soldadura y el perfil y acabado de los cordones.

Existen varios tipos de fundentes y estos se clasifican en base de diferentes características. A continuación se indican las formas de clasificación y los tipos incluidos en cada una de estas.

En base de los *métodos de fabricación*, los fundentes pueden ser de los tipos fundido, aglomerado y los mezclados mecánicamente.

Fundentes fundidos

Estos se formulan principalmente con dióxido de silicio, óxido de aluminio, óxidos de magnesio y calcio y sales de haluro. Su proceso de fabricación consta de las siguientes etapas: mezclado en seco de las materias primas, fusión y ajuste de composición química, vaciando y enfriamiento, trituración, tamizado y envasado. Por lo general los fundentes fundidos también corresponden, desde el punto de vista de su actividad química, al tipo neutro.

Las ventajas de los fundentes fundidos son: homogeneidad química, remoción fácil de las partículas finas sin afectar su composición, fáciles de recuperar y reciclar y, ya que normalmente no son giroscópicos, su almacenamiento y manejo es sencillo e involucran poco riesgo de agrietamiento asociado con absorción de hidrogeno. Su principal desventaja es su limitado intervalo de composición química, y se deriva de la dificultad de adicionarles desoxidantes y ferri-aleaciones durante su proceso de fabricación.

Fundentes aglomerados

Estos fundentes, a los que también se les denomina “banderizados” o “aglutinados” (bonded fluxes), pueden contener óxidos de metales alcalinotérreos, de manganeso, de titanio y zirconio, ferri*aleaciones y materiales desoxidantes, además de sílice, ilumina, óxidos de calcio y magnesio y sales de haluros. Su proceso de fabricación consiste en la trituration y mezclado en seco de las materias primas, aglutinado con sustancias tales como silicatos de sodio y de potasio o mezcla de ambos, mezclado en húmedo y peletización, secado, tamizado y empaque. Los fundentes activos y los aleados generalmente son fabricados mediante este proceso.

Las ventajas más notables de los fundentes aglomerados son: facilitar para adicionarles agentes desoxidantes y elementos de aleación, tienen una menor densidad que los fundidos, pueden usarse capas más gruesas durante la soldadura y se les puede identificar por su color. Sus principales desventajas son su tendencia a absorber humedad y por lo tanto, al riesgo de agrietamiento (de las partes soldadas) debido al hidrogeno, sus escorias pueden generar gases y provocar porosidad, y su composición puede cambiar por la segregación y remoción de partículas finas.

Fundentes mezclados mecánicamente

Estos se producen mediante la mezcla mecánica, en las proporciones adecuadas para obtener los resultados deseados de dos o más fundentes fundidos o aglomerados. Su ventaja radica en la posibilidad de poder mezclar varios fundentes a fin de posibilitar operaciones de soldaduras patentadas o altamente críticas, pero presentan las siguientes desventajas: segregación de los fundentes mezclados, almacenamiento, alimentación y recuperación, así como inconsistencia en las proporciones involucradas en las mezclas.

Los fundentes también se clasifican en términos de los cambios de *composición química que pueden producirse en el metal de soldadura*. Cualquier fundente produce metales de soldadura de una composición química diferente a la del electrodo empleado (independientemente de los cambios debidos a la dilución producida por el metal base). Tales cambios se deben a las reacciones químicas que entre fundente, electrodo y metal base al ser fundidos por el arco eléctrico, y dependen de la naturaleza del fundente, en particular de los elementos metálicos contenidos en su composición.

Las variaciones en los parámetros de los procedimientos de soldadura, como el amperaje, la velocidad y principalmente el voltaje, ocasionan cambios en las proporciones de electrodo y fundente que interactúan, y a su vez, cambios del metal de soldadura. En base de estos cambios, los fundentes se clasifican en neutros, activos y aleados.

Fundentes neutros

Son aquellos que no producen cambios significativos en el análisis químico del metal de soldadura como resultado de cambios en las variables, en especial del voltaje del arco.

Deben tenerse en cuenta las siguientes consideraciones acerca de este tipo de fundentes:

- Su principal aplicación es la producción de soldaduras de pasos múltiples, en particular en placas de espesores mayores de 25.4 mm (1")

- Ya que no contienen desoxidantes o contienen muy pocos, la acción desoxidante depende solamente del electrodo, por lo que en las soldaduras de un solo paso con desoxidación insuficiente o en metales base oxidados, hay riesgo de porosidad y agrietamiento longitudinal
- Ningún fundente es neutro por completo, por lo que también provocan cambios en la composición química. Estos cambios se originan por la descomposición del fundente, durante la cual se libera oxígeno que se combina con el carbono del electrodo, o liberan manganeso y silicio procedentes de los óxidos presentes. Tales cambios son más o menos consistentes y las variaciones relativamente altas del voltaje no los afectan en gran medida.

Fundentes activos

Contienen pequeñas cantidades de silicio, manganeso o ambos, mismos que actúan como desoxidantes, y como tales, ayudan a evitar la porosidad y el agrietamiento debido a contaminantes en el metal base. Deben usarse teniendo en cuenta las siguientes consideraciones:

- Su uso principal es la aplicación de soldaduras de un solo paso (por lado), particularmente en metales base oxidados
- Incrementos de voltaje provocan que el metal de soldadura absorba manganeso y silicio, por lo que en soldaduras de pasos múltiples el metal depositado tendrá mayor resistencia, pero puede disminuir su tenacidad, pero por lo que el voltaje debe controlarse rigurosamente.

Fundentes aleados

Son aquellos a los que se adicionan elementos de aleación. Normalmente se emplean con electrodos de acero simple al carbono para producir metal de soldadura aleado. Su principal aplicación es la soldadura de aceros de baja aleación y el depósito de recubrimientos duros.

La proporción de elementos de aleación que se incorporan al metal de soldadura depende del voltaje empleado, por lo que éste debe ser estrechamente controlado a fin de que la composición química de los depósitos de soldadura resultantes cumpla con las especificaciones aplicables.

Desde el punto de vista de su *carácter químico*, los fundentes también se clasifican en ácidos, básicos y neutros. La basicidad o la acidez de un fundente está relacionada con la proporción de los óxidos de carácter básico y los de carácter ácido que predominan en su formulación. Los compuestos de carácter básico son los de Ca, Mg, K, Na, Mn, Fe, mientras que los de carácter ácidos son Si, Al, Ti y Zr. Un indicador de carácter del fundente es su índice de basicidad (IB), el cual puede determinarse por medio de algunas formulas, como se muestra a continuación:

$$IB = \frac{CaO + CaFe_2 + MgO + K_2O + Na_2O + 12(MnO + FeO)}{SiO_2 + 12(Al_2O_3 + TiO_2 + ZrO_2)}$$

En términos generales, si el índice de basicidad tiene un valor menor a 1, el fundente es ácido, si tiene un valor mayor a 1 es básico, y si es aproximadamente igual a la unidad, se le considera neutro.

Los fundentes básicos permiten un buen control de la composición química y las propiedades del metal de soldadura, de manera que su uso es cada vez mayor en aplicaciones críticas y especiales.

Manejo, almacenamiento y secado de los fundentes

Los fundentes fundidos por lo general no son higroscópicos, por lo que la humedad que pueden contener esta en forma de humedad del medio ambiente y retenerla como agua de combinación, así como humedad superficial; asimismo, también existe relación entre la basicidad de los fundentes aglomerados y su tendencia a absorber agua de combinación: son más higroscópicos los fundentes con índices de basicidad más altos.

Debido a lo anterior, en las aplicaciones con requisitos de bajo hidrógeno, es necesario extremar las precauciones que permitan asegurar que los fundentes no adsorberán humedad. En general, los cuidados que se recomiendan para los electrodos de bajo hidrógeno empleados en el proceso SMAW son aplicables para los fundentes aglomerados. En todo caso, se deben seguir las recomendaciones que los fabricantes establecen para el manejo, almacenamiento y recondicionamiento de los fundentes que suministran.

Otras variables

En relación con los metales de aporte, merecen atención especial los aspectos que se refieren a la clasificación de las combinaciones fundente/electrodo, pero estos se discutirán en la siguiente sección.

Con respecto a las características eléctricas, además del tipo de corriente y polaridad, que ya fueron tratadas en la sección "Equipo", el amperaje, el voltaje, la velocidad y el diámetro del electrodo tienen una gran influencia sobre la forma, geometría y penetración de los cordones. Es oportuno recordar que al aumentar la velocidad de alimentación de alambre también aumenta el amperaje, por lo que los fabricantes de electrodos generalmente establecen los intervalos de operación de cada diámetro de electrodo en términos de velocidad de alimentación y de amperaje, y los equipos de soldadura pueden tener ajustes para controlar uno u otro de tales parámetros, o ambos.

Las principales variables asociadas con la técnica son: la proyección del electrodo desde la punta de contacto eléctrico a la pieza de trabajo (stickout), el número de electrodos, y cuando se usan electrodos múltiples, la separación entre ellos y su orientación angular.

Consumibles, especificaciones y clasificaciones

Las normas AWS que establecen los requisitos que deben cumplir los consumibles que se emplean para SAW se indican a continuación:

- ANSI/AWS A5.17 para electrodos y fundentes de acero al carbono
- ANSI/AWS A5.23 para electrodos y fundentes de acero de baja aleación.

Estas especificaciones establecen la clasificación de los fundentes y electrodos en términos de:

- Las propiedades mecánicas del metal de soldadura obtenido con la combinación de un fundente y electrodos particulares.
- La condición de tratamiento térmico (como se soldó o con un tratamiento térmico de alivio de esfuerzos posterior a la soldadura) en la que tales propiedades se obtienen.

-La composición química de los electrodos sólidos o, para los electrodos compuestos, la del metal de soldadura que producen con un fundente específico.

Como puede apreciarse, para clasificar los metales de soldadura por arco sumergido, es necesario hacer referencia al fundente y al electrodo empleados para obtener dichos metales, y el sistema AWS para designarlos difiere un tanto del que típicamente empleo otros metales de aporte. La figura 5.32 muestra el sistema de clasificación aplicable a los aceros al carbono.

En este sistema, la designación está compuesta por dos grupos de caracteres y cada grupo está separado por un guión. Los caracteres del primer grupo se aplican al fundente y se refieren a las propiedades mecánicas de metal del metal de soldadura, y los del segundo grupo indican el tipo y la composición nominal del electrodo. Los requisitos de composición química para los electrodos sólidos están especificados en la tabla 1 de la norma AWS A5.17, y para el metal de soldadura de los electrodos compuestos, en la tabla 2.

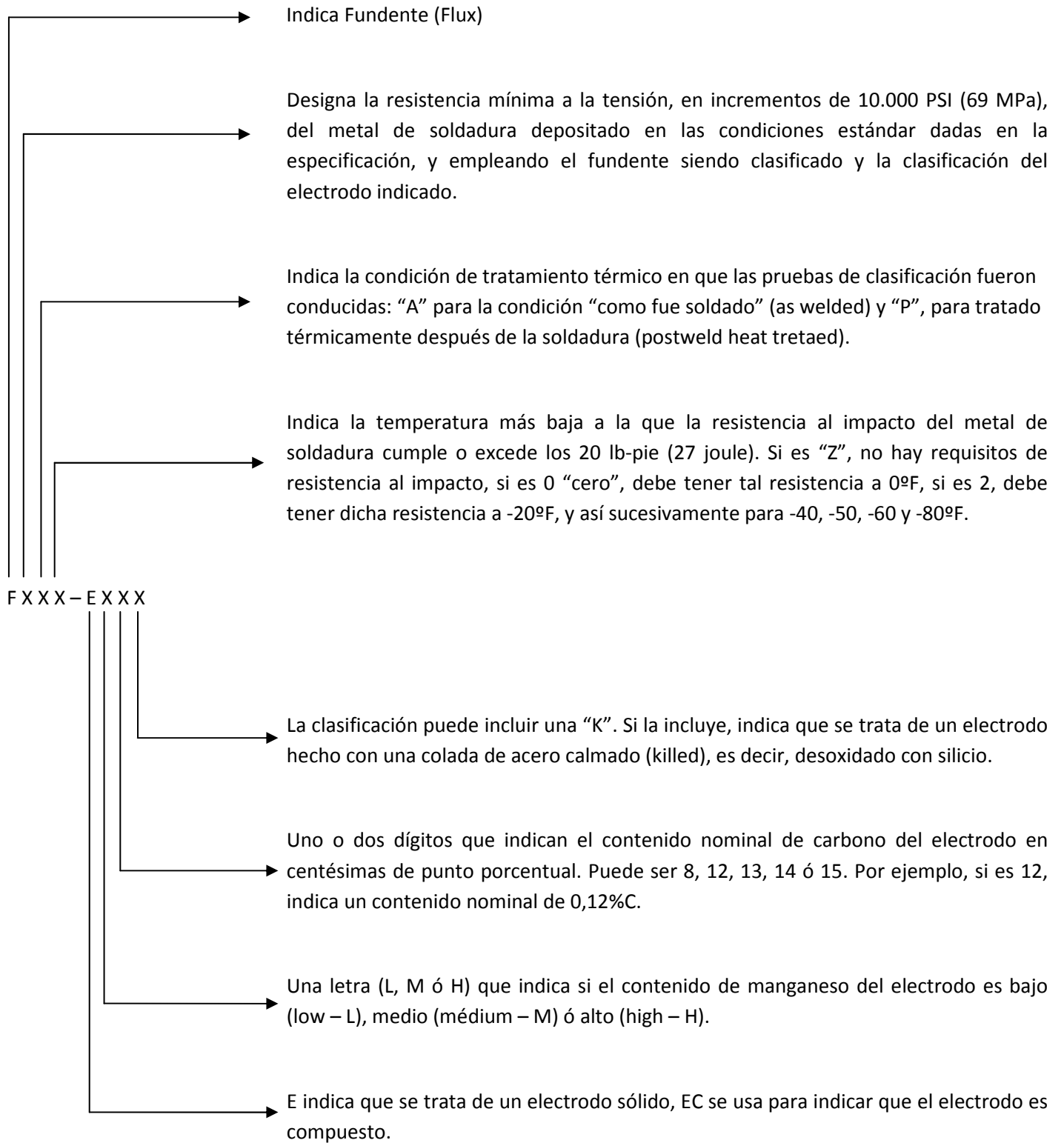


Figura 5.32- Sistema de clasificación AWS para fundentes y electrodos de acero al carbono para soldadura con arco sumergido

Una clasificación típica de una pareja electrodo fundente de acero al carbono para arco sumergido es **F7AZ-EM13K**, misma que, de acuerdo con el sistema descrito en la figura anterior, indica lo siguiente:

F designa un fundente

7 indica que el metal de soldadura producido con el fundente y el electrodo indicados tiene una resistencia mínima a la tensión de 70,000 lb. /pulg. ²

A establece que dicho metal de soldadura tiene la resistencia a la tensión indicada sin ser sometido a tratamiento térmico, es decir, "como fue soldado" (as welded)

E indica que se trata de un electrodo sólido

M, que el electrodo tiene un contenido medio manganeso

13, que el contenido nominal de carbono es de 0,13%

K establece que el electrodo fue fabricado con una colada de acero calmado.

En la clasificación **F7P4-EC1**, los caracteres no mostrados en el ejemplo anterior indican lo siguiente:

P, que el metal de soldadura tiene la resistencia mínima a tensión indicada después de ser sometido a un tratamiento térmico posterior a la soldadura (postweld heat treatment) de alivio de esfuerzos (de acuerdo a las condiciones de temperatura y tiempo establecidas en el párrafo 8.4 de la especificación).

4 establece que el metal de soldadura tiene una resistencia al impacto mínima de 20 lb.-pie a -40°F (-40°C)

EC, que el metal de soldadura referido se obtuvo con un electrodo compuesto

1 complementa la clasificación del electrodo sólido.

Los metales de soldadura de acero de baja aleación pueden depositarse mediante el empleo de electrodo sólido de baja aleación, fundentes aleados o electrodos compuestos que en su núcleo contienen los elementos de aleación requeridos. Los electrodos aleados, sólidos y compuestos, normalmente se aplican con fundentes neutros, mientras que los fundentes alados se emplean conjuntamente con electrodos de acero al carbono.

Los fundentes y electrodos de acero de baja aleación para soldadura con arco sumergido, cubiertos por la especificación AWS 5.23, se clasifican de una manera similar a la descrita para fundentes y electrodos de acero al carbono, pero estas clasificaciones incluyen sufijos que indican elementos de aleación principales que forman la parte de composición química del metal de soldadura depositado.

La composición química de los metales de soldadura depositados por las diferentes combinaciones de fundentes y electrodos, sólidos y compuestos, esta establecida en la tabla 2 de la especificación, misma que, en su tabla 1 compila la composición química de los electrodos sólidos. Es conveniente tener en cuenta que cada clasificación incluida en tal especificación se forma con los caracteres que designan al fundente, los que establecen la clasificación del electrodo (incluidos en la tabla 1) y los sufijos (tabla 2) que se refieren a la composición de l metal de soldadura obtenido.

A manera de ejemplo, considérese la designación completa de la clasificación **F7PO-EM12K-B3**. Los primeros cuatro caracteres asociados con el fundente se requieren a las propiedades del metal de soldadura obtenido con la combinación del fundente específico empleado para tener dicho metal, conjuntamente con el electrodo sólido EM12K (de acero al carbono, incluido en la tabla1) y el sufijo B3, que indica que de tal metal de soldadura cumple con los requisitos de composición química especificados en la tabla 2.

La clasificación **F8A2-ECM2-M2** ilustra el caso en el que el metal de soldadura se obtiene con un electrodo aleado. El segundo grupo de caracteres (MCM2) indica que para obtener dicho metal se empleo el electrodo compuesto M2, y el sufijo M2 establece que el metal tiene una composición que cumple con los requisitos de composición química establecidos en la tabla 2.

Adicionalmente, estas especificaciones pueden incluir la letra “N” , que indica que el electrodo correspondiente esta previsto para aplicaciones nucleares y que debe cumplir con los requisitos correspondientes. También puede incluir un designador suplementario que se refiere al hidrogeno difusible (H4, H8, H16). Con el propósito de ilustrar el uso del sufijo “N” y el designador mencionados, considérese la clasificación del ejemplo anterior incluyendo ambos elementos. Esta clasificación quedaría completamente definida de la siguiente manera: **F8A2-ECM2N-M2NH4**. Es oportuno anotar que la “N” debe aparecer en las designaciones correspondientes al electrodo y al metal de soldadura, y que “H4” indica que este metal cumple con el requisito de hidrogeno difusible (4ml/100 g metal depositado, como promedio máximo) establecido en la tabla 8 de la especificación.

Cuando se requiere soldar metales de base diferentes a los aceros de carbono y de baja aleación, la práctica común consiste en emplear un fundente neutro y el electrodo – incluido en otra especificación AWS- capaz de dar las propiedades mecánicas y composición química que resulten para soldar el metal base en cuestión. Por ejemplo, para soldar un acero inoxidable austenítico tipo 304, se suele emplear un fundente neutro y un alambre electrodo ER-308, clasificación incluida en la especificación AWS A5.9.

Aunque para aplicaciones como la descrita anteriormente se prefiere el uso de fundentes neutros, ya sea fundidos o aglomerados, algunas veces también se emplean fundentes con algún contenido de elementos de aleación para compensar las perdidas por oxidación que provoca el arco. Los fundentes para soldar aceros inoxidables y aleaciones de níquel tiene formulaciones especiales patentadas por sus fabricantes, y debieran consultarse las recomendaciones de estos para el empleo correcto de su producto.

Para la aplicación de recubrimientos duros, la práctica común también es el uso de fundentes neutros y los electrodos apropiados, mismos que están incluidos en las especificaciones AWS aplicables.

Capítulo 06

DISCONTINUIDADES DE SOLDADURA Y METAL BASE

Contenidos:

DESCRIPCIÓN

Introducción

Discontinuidades de las juntas soldadas

Discontinuidades relacionadas con requisitos dimensionales

Discontinuidades en la estructura y propiedad de juntas soldadas

Discontinuidades de metales base

PÁGINA

Introducción

Los metales base y las juntas soldadas generalmente presentan imperfecciones que varían en naturaleza, tamaño, frecuencia, localización y distribución. Tales imperfecciones pueden representar un riesgo en la integridad y la seguridad de equipo o estructura que las contiene.

Cada norma sobre bienes soldados establece los criterios de aceptación para las diferentes imperfecciones que pueden presentarse en las uniones soldadas, y una de las funciones principales del inspector de soldadura consiste en determinar si el trabajo que esta inspeccionando cumple con tales criterios de aceptación.

Normalmente a estas imperfecciones se les llama discontinuidades y casi siempre están presentes en las uniones soldadas, y los criterios de aceptación de las normas sobre cada aplicación establecen el tipo, tamaño, número y distribución que pueden ser tolerados.

Por otra parte, es frecuente que la gente use de manera indistinta los términos “discontinuidad” y “defecto” al referirse a tales imperfecciones, al referirse a tales imperfecciones, pero un defecto siempre es una discontinuidad, y una discontinuidad no siempre es un defecto.

A fin de clarificar esta diferencia, es conveniente establecer el significado de ambos términos: *discontinuidad* es una interrupción de la estructura típica de un material, tal como una falta de homogeneidad en sus características mecánicas metalúrgicas o físicas; y un *defecto* es una o varias discontinuidades por su naturaleza, tamaño o defecto acumulado no es permitida por el criterio de aceptación del estándar aplicable.

Algunas discontinuidades pueden ser aceptables y los defectos siempre son rechazables. Los defectos ponen en riesgo la utilidad y seguridad del producto que los contiene, y una tarea clave del inspector. Es identificar, rechazar y reportar los defectos existentes, así como verificar, por medio de los métodos de reinspección apropiados, que las reparaciones necesarias se llevan a cabo efectivamente, de manera que el producto reparado cumpla con los criterios de aceptación especificados; también debe elaborar los reportes de reinspección.

Existen imperfecciones, tales como la distorsión, que aunque no corresponden con exactitud a la definición de discontinuidad, por conveniencia son referidas como tales a fin de incluirlas en clasificaciones útiles para su descripción.

Desde un punto de vista general, las discontinuidades de la soldadura y metal base pueden clasificarse en los cuatro grupos siguientes:

- discontinuidades de las juntas soldadas (metal de soldadura y zona afectada térmicamente)
- imperfecciones y discontinuidades relacionadas con requisitos sobre dimensiones.
- discontinuidades relacionadas con las propiedades y estructura de las juntas soldadas.
- discontinuidades de los metales base.

A continuación se describe cada uno de los grupos mencionados y las discontinuidades típicas de cada clasificación, se explican cuales son las posibles causas que las originan y se mencionan las precauciones básicas para evitarlas o minimizarlas.

Discontinuidades de las juntas soldadas

Estas ocurren como parte inherente de las operaciones de soldadura y normalmente se describen en términos de la interrupción de la integridad física del metal de soldadura o a la zona afectada térmicamente, y no en el sentido de los cambios de la estructura metalográfica con lo que pudieran estar asociados.

Porosidad (porosity)

Cavidad o cavidades formadas por gas atrapado durante la solidificación del metal de soldadura o en un depósito aplicado por rociado térmico. Los poros generalmente tienen forma más o menos esférica pero también pueden ser alargados. Si la porosidad no es excesiva o el tamaño de los poros no es relativamente grande, su presencia no es crítica y pueden ser aceptados por los criterios aplicables, debido a que no tiene bordes agudos que pudieran causar concentraciones de esfuerzo.

La presencia de porosidad excesiva es evidencia de falta de control en los parámetros de soldadura, de un diseño de junta inadecuado, una mala preparación de las juntas e incompatibilidad entre el metal de aporte y los metales base, así como los metales de aporte o fundentes contaminados. Las causas principales de la porosidad son la suciedad, la herrumbre y la humedad en la superficie del metal base, contaminación en los electrodos y los gases de protección o en equipo de soldadura (por ejemplo en los rodillos del alimentador de alambre o en los dispositivos de sujeción de bobinas de electrodo).

La porosidad puede evitarse mediante el uso de materiales limpios y equipo de soldadura en buen estado, evitando soplos de arco y velocidades, corrientes y longitudes de arco (voltajes) inadecuados.

Porosidad distribuida uniformemente (uniformly scattered porosity)

Porosidad esparcida de manera uniforme en el metal de soldadura; también se le llama porosidad distribuida al azar.

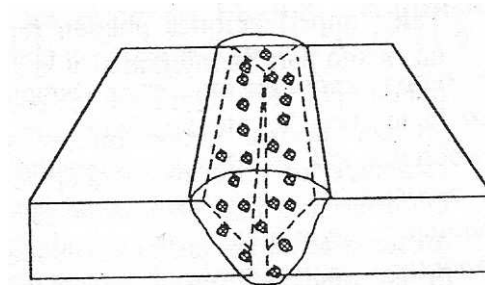


Figura 6.1- porosidad distribuida uniformemente

Causas probables: técnicas de soldadura inadecuadas, preparación incorrecta de las juntas o errores en el manejo de los materiales.

Prevención: manejo adecuado de los materiales, técnicas correctas de soldadura y de preparación de juntas. Si la soldadura se enfría con suficiente lentitud para permitir que los gases alcancen la superficie antes de la solidificación, se minimizará la porosidad.

Porosidad agrupada (cluster porosity)

Grupos localizados de poros separados por longitudes considerables de un metal de soldadura sano.

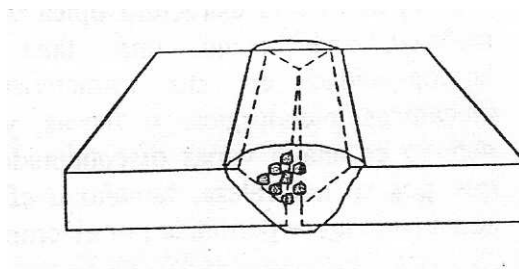


Figura 6.2- porosidad agrupada

Causas probables: Iniciación o terminación inadecuada del paso e soldadura, soplo de arco (arc blow).

Prevención: el soplo de arco se puede evitar o disminuir al reducir la intensidad de la corriente directa, soldando con corriente alterna, mediante la disminución de la longitud del arco, cambiando la conexión del cable al otro extremo de la pieza de trabajo o haciendo conexiones en varios puntos.

Porosidad alineada (linear porosity)

Es una serie de poros alineados que siguen una trayectoria recta o más o menos recta, frecuentemente a lo largo de los límites del metal de soldadura con el metal base, los límites entre cordones o cerca de la raíz de la soldadura.

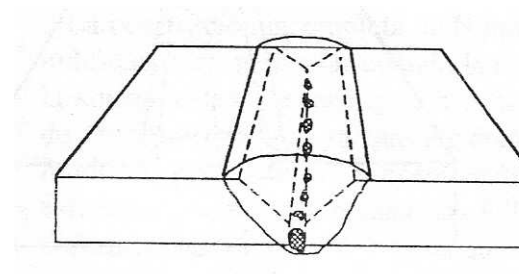
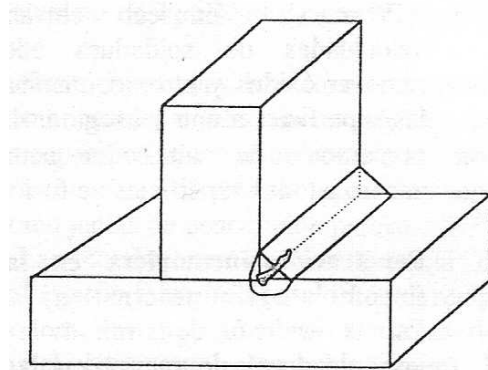


Figura 6.3- Porosidad lineal

Causas probables: Contaminación que reacciona químicamente y genera gases en zonas contaminadas, soplo de arco.

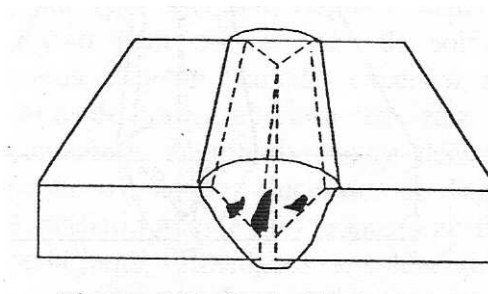
Porosidad tubular o cilíndrica (piping porosity)**Figura 6.4- porosidad tubular o cilíndrica**

Es una cavidad alargada que se extiende de la raíz de la soldadura hacia la superficie. Ocurre principalmente en soldadura de filete pero también en soldadura de ranura. Generalmente los poros superficiales están asociados con porosidad debajo de la superficie.

Causas: Contaminación superficial

Inclusiones de escoria (slag inclusión)

Materiales sólidos no-metálicos que quedan atrapados en el metal de soldadura y el metal base. Una vez que se forma la escoria (a partir del fundente y las reacciones de este con el metal de soldadura fundido), debido a que tiene un peso específico menor que el metal, tiende a subir a la superficie de este, pero si existen ranuras agudas en los bordes a unir del metal base, la escoria puede quedar atrapada mecánicamente. Después de depositar un cordón, si no se remueve adecuadamente la capa de escoria formada antes de aplicar el siguiente paso, ésta puede quedar dentro del metal de soldadura.

**Figura 6.5- Inclusión de escoria**

Causas probables: técnicas erróneas de soldadura, mal diseño de las juntas o preparación incorrecta de éstas, falta de limpieza de los bordes a soldar, acceso restringido para soldar la junta, bordes y ranuras agudos entre metal base y de soldadura o entre cordones y, con frecuencia, limpieza deficiente entre pasos.

Prevención: preparar adecuadamente las juntas antes de depositar cada cordón, disminuir la velocidad de solidificación del metal fundido, no soldar a temperaturas demasiado bajas, tener el cuidado de corregir los contornos que pudieran dificultar el acceso completo del arco, evitar ángulos de ranura muy cerrados y asegurar la remoción completa de escoria antes de depositar el siguiente paso.

Inclusiones de tungsteno (tungsten inclusions)

Son partículas de tungsteno atrapadas en el metal de soldadura. Este tipo de discontinuidad solamente ocurre en juntas soldadas con el proceso GTAW.

Las inclusiones de tungsteno aparecen en las radiografías como áreas más o menos redondeadas y más claras que el cordón de soldadura, a diferencia de las otras discontinuidades, que aparecen como áreas oscuras en las películas radiográficas.

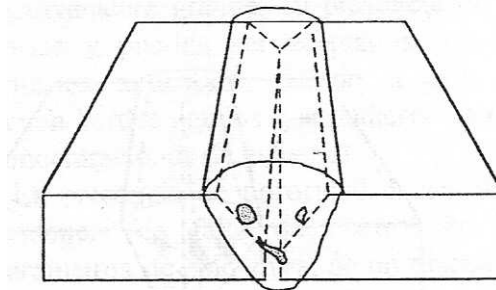


Figura 6.6 inclusión de tungsteno

Causas: las partículas del electrodo de tungsteno (no consumible) que se pueden desprender de éste y quedar atrapadas en el metal de soldadura fundido si se emplean corrientes demasiado altas, si hay contacto ocasional entre el electrodo y la pieza de trabajo o el metal fundido, o si se usa un electrodo de tungsteno con punta muy aguda.

Prevención: emplear corrientes de soldadura adecuadas, afilar correctamente los electrodos de tungsteno aleados con torio o con zirconio, emplear polaridad directa, evitar contactos entre el electrodo y el metal fundido o usar corriente de alta frecuencia para iniciar el arco.

Fusión incompleta (incomplete fusion)

Falta de unión entre el metal de soldadura y las caras del metal base o la superficie de otros cordones en las que no ocurrió la fusión. Esta discontinuidad es también conocida con el término no estandarizado de falta de fusión.

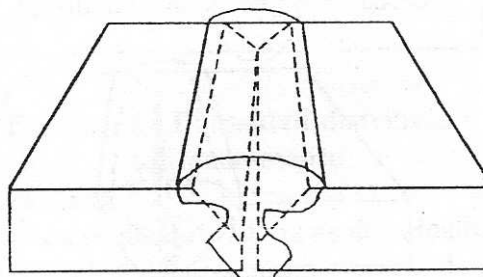


Figura 6.7- Fusión incompleta

Causas Probables: Calor de soldadura insuficiente (baja intensidad de corriente o alta velocidad), falta de acceso a todas las caras de fusión, capas de óxido adheridas al metal base y manipulación inapropiada del electrodo.

Prevención: Emplear corrientes y velocidades de soldadura adecuadas, remover óxidos y otros contaminantes de las superficies a unir y asegurar diseños y preparación de juntas que permitan el acceso a todas superficies de fusión.

Penetración incompleta en la junta (incomplete joint penetration)

Es una condición de la raíz de la junta de las soldaduras de ranura en la cual el metal de soldadura no se extiende a través de todo el espesor de la junta. Esta discontinuidad también es conocida con el término no estandarizado de “falta de penetración” (lack of penetration).

Esta discontinuidad puede presentarse en soldaduras de ranura soldadas por un solo lado o por ambos. Las soldaduras aplicadas en tuberías son especialmente susceptibles a este tipo de discontinuidad, ya que generalmente el interior de los tubos es inaccesible; para minimizar los riesgos de penetración incompleta en la junta, frecuentemente se usan anillos o soleras de respaldo, o bien, insertos consumibles. Cuando se requiere asegurar que las soldaduras tengan penetración completa (como en el caso de puentes, líneas de tubería y en aplicaciones nucleares), se deben inspeccionar con un método no destructivo.

La penetración incompleta en la junta es indeseable, en particular cuando la raíz de la soldadura va a estar sujeta a esfuerzos de tensión o dobléz, ya que las áreas no fundidas permiten la concentración de esfuerzos que podrían causar una falla sin deformación apreciable. Aunque los esfuerzos durante el servicio no involucren tensión o dobléz, los esfuerzos de contracción y la consecuente distorsión que sufren las partes durante la soldadura frecuentemente causan la iniciación de grietas en el área no fundida, y mientras van siendo depositados los cordones sucesivos, tales grietas pueden crecer hasta extenderse a través del espesor completo de la soldadura o gran parte de éste.

Nota: Las consideraciones anteriores son aplicables a las situaciones en las que se especifican penetración completa, y no a las uniones diseñadas específicamente como juntas de penetración parcial.

Las condiciones de transferencia de calor en la junta influyen en la ocurrencia de esta discontinuidad: si las áreas del metal base que se alcanzan primero la temperatura de fusión están arriba de la raíz, el metal fundido puede cubrir esas áreas y protegerlas del arco antes de que funda el metal base en la raíz. En los procesos de soldadura por arco, este se establece entre el electrodo y la parte más cercana del metal base, y todas las otras partes del metal base reciben el calor principalmente por conducción. Si la porción del metal base más cercana al electrodo está a distancia considerable de la raíz, la conducción del calor puede resultar insuficiente para alcanzar la temperatura de fusión en ésta.

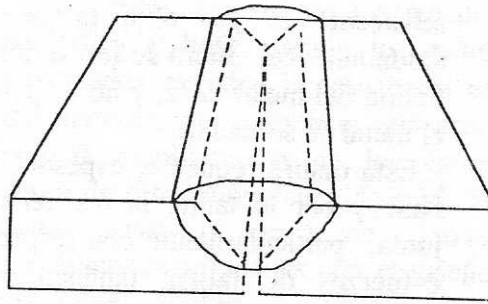


Figura 6.8- penetración incompleta en la junta

Causas probables: calor de soldadura insuficiente, diseño inadecuado de la junta (por ejemplo, espesor demasiado grueso para que el arco de soldadura pueda penetrar, tamaño excesivo de la cra de raíz, abertura de raíz muy pequeña o ángulo de ranura demasiado pequeño), uso de electrodos de diámetro demasiado grande con respecto al diseño de la junta, velocidades de la soldadura muy altas, corriente de soldadura insuficiente, control lateral inadecuado del arco y óxidos o impurezas en las superficies a ser soldadas, particularmente en la cara de la raíz.

Prevención: Usar diseños de la junta adecuados, electrodos del diámetro apropiado y con la intensidad de corriente correcta, condiciones de operación que proporcionen el calor de soldadura adecuado, ejercer un buen control lateral del arco y eliminar los óxidos y otras impurezas de las superficies a soldar.

Para soldaduras de ranura soldadas por un solo lado pueden emplearse soleras o anillos d respaldo, así como insertos consumibles, y en soldaduras de ranura soldadas por los dos lados, es útil ranurar la raíz de la junta antes de soldar el segundo lado a fin de asegurar una penetración completa.

Socavado (undercut)

Es una ranura dentro del metal base, adyacente al pie o la raíz de la soldadura. Tal ranura se forma debido a la fusión del metal base, y no es llenada por el metal de soldadura.

Esta ranura reduce el espesor del metal base y por lo tanto, la resistencia de la junta, particularmente con respecto a los esfuerzos de fatiga; también crea una muesca que actúa como un concentrador de esfuerzos.

Todas las soldaduras tiene alguna forma de socavado, pero cuando este es controlado, no es muy agudo o profundo y no excede los límites permitidos por las normas, no se considera un factor crítico ni un defecto.

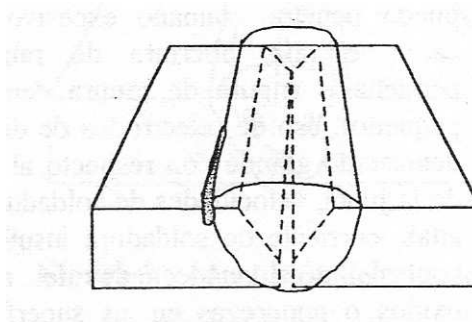


Figura 6.9-socavado

Causas probables: corriente excesiva de soldadura y longitud de arco (voltaje) muy alto, técnicamente incorrecta del soldador (manipulación inadecuada del electrodo y velocidad excesiva de desplazamiento), posición de trabajo incómoda, falta de acceso a la junta y soplo de arco.

Llenado incompleto (underfill)

Es una depresión de la junta soldada en la cual la cara de la soldadura o la superficie de la raíz se extienden por debajo de la superficie del metal base; algunas veces queda descubierta una porción de la cara de la ranura. En la superficie de la raíz de soldaduras hechas por un solo lado, esta discontinuidad es conocida también con el término no estandarizado de concavidad de raíz.

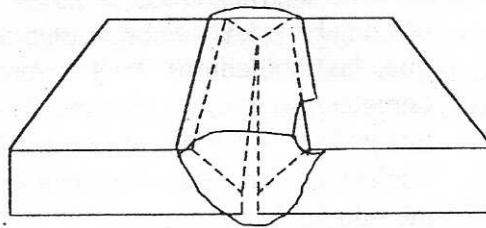


Figura 6.10- llenado incompleto

Causas probables: falla del soldador para rellenar completamente la junta, no seguir el procedimiento de soldadura establecido.

Traslape o cordón traslapado (overlap)

Es la protuberancia del metal depositado que se extiende más allá del pie o la raíz de la soldadura. Es una discontinuidad superficial que constituye una muesca mecánica que actúa como concentrador de esfuerzos y casi siempre se considera rechazable.

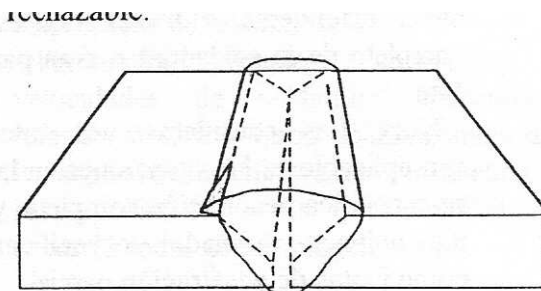


Figura 6.11- cordón traslapado

Causas probables: control insuficiente de las operaciones de soldadura: oscilación excesiva del electrodo, velocidad de avance lenta asociada con corriente alta, posición de soldadura incorrecta (por ejemplo, soldaduras de filete de tamaño relativamente grande depositadas con cordón sencillo en posición horizontal o vertical), selección inapropiada de los consumibles de soldadura, preparación inapropiada de la junta y óxidos firmemente adheridos al metal base, mismos que pueden interferir con la fusión.

Desgarre laminar (lamellar tear)

Discontinuidad subsuperficial en el metal base. Esta discontinuidad tiene forma similar a un terraplén o bancal, con grietas escalonadas; su orientación básica es paralela a la superficie de laminación o forjado y normalmente está localizada dentro de la zona afectada térmicamente o justo por debajo de ésta.

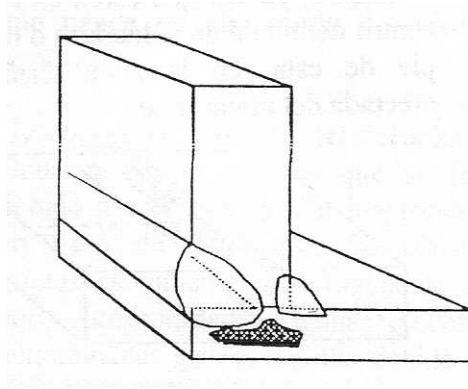


Figura 6.12- desgarre laminar

Causas probables: Esta discontinuidad es causada por los esfuerzos de tensión a lo largo del espesor del metal base que se generan durante las operaciones de soldadura. El desarrollo del desgarre laminar es favorecido por la presencia de inclusiones no metálicas de forma plana y paralelas a la superficie del metal base.

El desgarre laminar tiende a ocurrir en planchas y perfiles estructurales de espesor gruesos y sometidos a un trabajo mecánico limitado desde su etapa de lingote hasta el espesor final. Su ocurrencia se ve favorecida por la aplicación de depósitos masivos de soldadura adyacentes al espesor de las placas.

Prevención: reducir la cantidad de soldadura y cambiar el diseño de la junta de manera que los esfuerzos de contracción estén alineados con la dirección de laminación.

Grietas (cracks)

Discontinuidades de tipo fractura que se caracterizan por sus puntas agudas y la alta relación de su longitud con respecto de su ancho.

Las grietas ocurren en los metales de soldadura y base cuando los esfuerzos localizados exceden la resistencia última del material. Su ocurrencia está asociada con la amplificación de los esfuerzos cerca de discontinuidades de soldadura y metal base, o cercas muescas mecánicas relacionadas con el diseño del ensamble soldado. Algunos de los factores que favorecen su aparición son los esfuerzos residuales altos y la fragilización debida al hidrógeno.

Las grietas que ocurren durante la soldadura o como resultado de ésta generalmente son de naturaleza frágil y muestran muy poca deformación plástica en sus límites. Este hecho se debe a que, si bien los materiales de soldadura y base tienen alta ductibilidad bajo esfuerzos uniaxiales, no la tienen cuando son sometidas a esfuerzos biaxiales o triaxiales, y la contracción causada por las operaciones de soldaduras normalmente genera sistemas de esfuerzos que actúan en varias direcciones.

Hay varios tipos de grieta y éstos se clasifican generalmente en base de su orientación con respecto a la soldadura y también por la temperatura a la que se desarrollan; desde este punto de vista se agrupan en grietas en caliente y grietas en frío.

Las grietas en frío se desarrollan después de que ha concluido el proceso de solidificación y normalmente están asociadas con la fragilización por hidrógeno (cuando se trata de micro-estructuras susceptible al agrietamiento al estar sometidas a esfuerzos). Estas grietas pueden propagarse a través de la microestructura en forma intergranular o transgranular.

Las grietas en caliente se desarrollan a altas temperaturas, durante el proceso de solidificación o a temperaturas cercanas al punto de fusión. Frecuentemente se originan en sitios de solidificación preferencial de aleantes a temperaturas cercanas al punto de fusión y se propagan entre los granos (intergranuladamente), cuando tiene lugar la solidificación preferencial.

En soldaduras de capas múltiples, es más probable que el agrietamiento ocurra en la primer capa, y si no es reparado, frecuentemente se propaga a través de las otras capas, mientras van siendo depositadas.

En términos generales, cuando se detecta agrietamiento en el metal de soldadura, las siguientes acciones pueden ser tomadas con la finalidad de evitarlo o minimizarlo:

- Disminuir la velocidad de avance a fin de proporcionar más metal de soldadura, hecho que aumentará el espesor del depósito y por lo mismo, incrementará su resistencia a los esfuerzos.
- Modificar las características eléctricas o corregir la técnica de manipulación del electrodo a fin de mejorar el contorno del cordón y la composición química del metal depositado.
- Precalentar el metal base para reducir los esfuerzos térmicos.
- Usar electrodos de bajo hidrógeno.
- Establecer la secuencia de soldadura que permita balancear de manera adecuada los esfuerzos de contracción.
- Evitar cualquier condición que pueda favorecer enfriamientos bruscos y el templado de partes de acero al carbono o de baja aleación.

Dependiendo de su orientación, las grietas se clasifican como longitudinales y transversales.

A continuación se describen los tipos de grieta que ocurren con mayor frecuencia en soldadura.

Grietas longitudinales (longitudinal cracks)

Son aquellas paralelas al eje de la soldadura, ya sea que estén en la línea de centro del metal de soldadura o bien, en el pie de esta, en la zona térmicamente afectada del metal base.

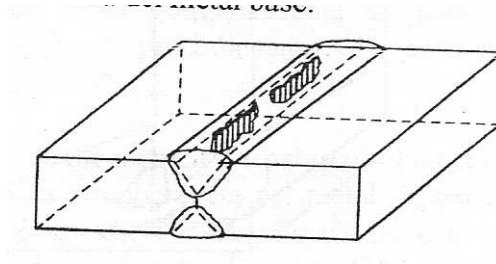


Figura 6.13- grietas longitudinales

Causas probables: En soldaduras de longitud relativamente pequeña entre secciones de espesor grueso, las grietas longitudinales frecuentemente son originadas por altas velocidades de enfriamiento y condiciones severas de sujeción o restricción; en soldaduras de gran longitud depositadas mecanizada o automáticamente, este tipo de grietas está asociado con altas velocidades de soldadura y algunas veces con porosidad que no aflora a la superficie.

Grietas transversales (transverse cracks)

Son grietas perpendiculares al eje de la soldadura, pueden localizarse exclusivamente en el metal de soldadura o pueden propagarse de éste a la zona afectada térmicamente y aún dentro del metal base. En algunos casos las grietas transversales se forman sólo en la zona afectada térmicamente y no en la soldadura.

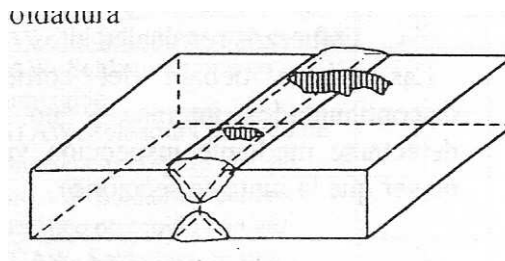


Figura 6.14- Grietas transversales

Causas probables: Estas grietas se deben principalmente a esfuerzos de contracción longitudinales que actúan sobre el metal de soldadura de baja ductilidad y juntas que tienen un alto grado de sujeción o restricción.

Grietas en el cráter (crater cracks)

Ocurren en los cráteres que se forman debido a una terminación inapropiada de un paso de soldadura. Se consideran grietas en caliente y normalmente tienen poca profundidad. Algunas veces son denominadas grietas estrella debido a que frecuentemente se propagan en varias direcciones a partir del centro del cráter, pero también pueden tener otras formas.

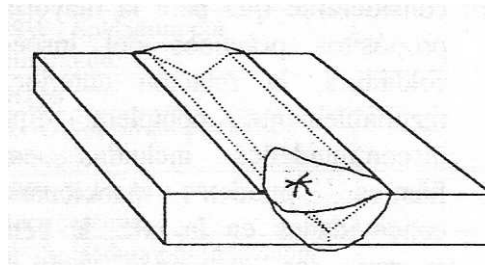


Figura 6.15- grietas en el cráter

Causas probables: Siempre que una operación de soldadura es interrumpida, hay una tendencia a la formación de cráteres y a la aparición de grietas dentro de estos. Estas grietas normalmente se propagan solamente hasta el borde del cráter, sin embargo, pueden ser puntos de inicio de grietas longitudinales, en particular cuando ocurren en la terminación de las soldaduras. Este tipo de grietas se encuentra con mucha frecuencia en materiales con altos coeficientes de expansión, tales como los aceros inoxidables austeníticos.

Prevención: llenar los cráteres de manera que se les dé una forma ligeramente convexa antes de interrumpir el arco.

Grietas en la garganta (throat cracks)

Son grietas longitudinales en la cara de las soldaduras de ranura y de filete. Por lo general, aunque no siempre, son grietas en caliente.

Grietas en el pie de la soldadura (toe cracks)

Éstas se inician y se propagan a partir del pie de la soldadura, donde los esfuerzos de contracción están concentrados; su ocurrencia se ve favorecida por la convexidad excesiva del cordón o por un refuerzo de soldadura muy alto, lo que amplifica los esfuerzos. Se inician en dirección aproximadamente normal a la superficie del metal base, pero su trayectoria puede curvarse y tienden a propagarse a través de la zona afectada térmicamente; por lo general son grietas en frío.

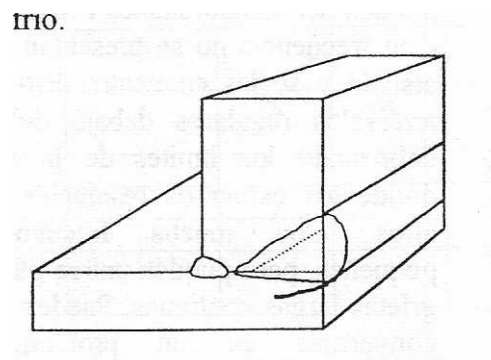


Figura 6.16- grietas en el pie de la soldadura

Causas Probables: Altos esfuerzos de contracción que actúan sobre la zona afectada térmicamente, algunas veces ocurren debido a que las propiedades transversales de tensión del metal base no pueden transmitir los esfuerzos de contracción producidos por la soldadura.

Prevención: Evitar soldaduras con refuerzo o convexidad excesiva.

Grietas en la raíz (root cracks)

Grietas longitudinales en la raíz de la soldadura o en la superficie de la raíz y generalmente, pero no siempre son una forma de agrietamiento en caliente.

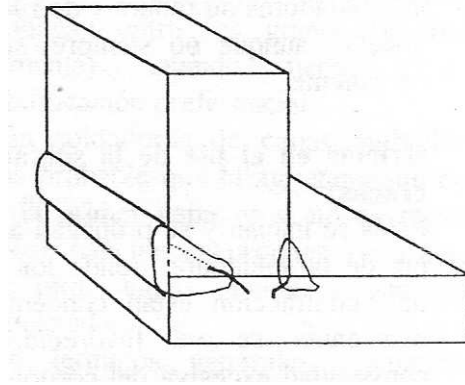


Figura 6.17-Grietas en la raíz

Grietas debajo del cordón y en la zona afectada térmicamente (underbead and heat-affected zone cracks)

Generalmente son grietas en frío que se forman en la zona afectada térmicamente; pueden ser longitudinales o transversales. Con frecuencia no se presentan de forma aislada y se las encuentra distribuidas a intervalos regulares debajo del cordón, delineado en los límites de la soldadura donde los esfuerzos residuales son más altos. Con mucha frecuencia son pequeñas, pero pueden unirse para formar grietas largas continuas. Pueden llegar a convertirse en un problema serio, particularmente cuando se presentan de manera simultánea las siguientes condiciones:

- presencia de hidrógeno
- micro-estructuras susceptibles al agrietamiento (las que tiene una ductibilidad relativamente baja y de alta resistencia y dureza-dureza rockwell "C" de 30 o superior)
- esfuerzos residuales altos.

Las grietas debajo del cordón son discontinuidades internas y no pueden detectarse mediante inspección visual (a no ser que la junta se secciones).

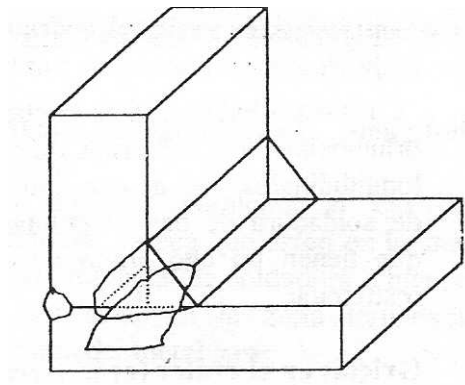


Figura 6.18- grietas bajo el cordón

Diferentes fuentes y autores describen otras discontinuidades pertenecientes a este grupo o variantes de las mismas, pero, en términos generales puede considerarse que para la mayoría de los propósitos prácticos del inspector de soldadura, la relación anterior resulta razonablemente completa. Entre las discontinuidades incluidas en otra fuente, pueden mencionarse las concavidades en la raíz, la penetración excesiva, las “quemadas” (burn through), las huellas de carreta (wagon traces) y la penetración incompleta asociada con la falta de alineación (hi-low) de los miembros del metal base. En la tabla 6.1 se da una relación de las discontinuidades comúnmente encontradas en soldaduras depositadas con diferentes procesos.

PROCESO DE SOLDADURA	TIPO DE DISCONTINUIDAD						
	POROSIDAD	ESCORIA	FUSIÓN INCOMPLETA	PENETRACIÓN INCOMPLETA	SOCAVADO	TRASLAPE	GRIETA
POR ARCO							
SW – Soldadura de pernos			X		X		X
PAW – Soldadura por arco plasma	X		X	X			X
SAW – Soldadura Arco Sumergido	X	X	X	X	X	X	X
GTAW	X		X	X			X
GMAW	X	X	X	X	X	X	X
FCAW	X	X	X	X	X	X	X
SMAW	X	X	X	X	X	X	X
CAW	X	X	X	X	X	X	X
POR RESISTENCIA							
RSW			X				X
RSEW			X				X
PW			X				X
FW			X				X
UW			X				X
CON GAS COMBUSTIBLE Y O ₂							
OAW	X		X	X	X	X	X
OHW	X		X	X			X
PGW	X		X				X
EN ESTADO SÓLIDO							
CW			X				X
DFW			X				X
EXW			X				
FOW			X				
FRW			X				
USW			X				

PROCESO DE SOLDADURA	TIPO DE DISCONTINUIDAD						
	POROSIDAD	ESCORIA	FUSIÓN INCOMPLETA	PENETRACIÓN INCOMPLETA	SOCAVADO	TRASLAPE	GRIETA
OTROS							
EBW	X		X	X			X
ESW	X	X	X	X	X	X	X
IW			X				X
LBW	X		X				X
PEW			X				
TW	X	X	X				X

Tabla 6.1 Discontinuidades comúnmente encontradas en las soldaduras depositadas con diferentes procesos (traducción de la tabla 2 de la norma ANSI/AWS B1.10-86R)

Discontinuidades relacionadas con requisitos dimensionales

Los equipos y estructuras soldadas, así como las soldaduras involucradas, al igual que cualquier producto fabricado, deben cumplir con el tamaño, forma acabado y otras características dimensionales especificadas. Los requisitos que deben satisfacer estas características y las tolerancias correspondientes están especificados en los dibujos, contratos y normas aplicables, y los bienes que no cumplen con tales especificaciones deben ser corregidos antes de su aceptación final. Las discontinuidades y otros tipos de imperfecciones clasificadas dentro de esta categoría se describen brevemente a continuación.

Distorsión

El calor que se genera durante las operaciones de unión y la fusión y la solidificación del metal de soldadura provocan la expansión y contracción térmica de las partes soldadas, mismas que generan esfuerzos de gran magnitud.

Tales esfuerzos permanecen en las partes soldadas después de que estas han enfriado y causan algún grado de distorsión, que puede llegar tan severa como para extender las tolerancias dimensionales e inutilizar tales partes.

Las principales acciones que pueden tomarse para minimizar y controlar la distorsión son: seleccionar los procesos de soldadura adecuados, establecer los procesos de soldadura apropiadas, usar los diseños de junta más convenientes y dispositivos de sujeción que permitan fijar rígidamente las partes a soldar. El trabajo mecánico por medio de pequeños impactos aplicados mediante martillo, si esto es permitido por la norma aplicable y se realiza bajo condiciones controladas, también es útil para ayudar a reducir, en cierta medida, la distorsión.

El establecimiento de secuencias de soldadura apropiadas por lo general resulta particularmente útil para balancear los esfuerzos y reducir la distorsión.

Los métodos para corregir la distorsión de productos o componentes que ya se terminaron de soldar son uno o más de los siguientes:

- Operaciones de enderezado, con o sin aplicación de calor.
- remover las soldaduras que causaron la distorsión y volver a aplicarlas.
- la aplicación de un tratamiento térmico posterior a la soldadura.

En cualquiera de los casos, la aplicación de los métodos anteriores dependerá de las especificaciones establecidas y de los términos estipulados en el contrato entre cliente y fabricante.

Preparación incorrecta de la junta

Para soldar satisfactoriamente cada unión se establece los diseños de una junta específicos, con la geometría y las dimensiones consistentes con el espesor y tipo de material a soldar y con los procesos de soldadura a emplear. Si la preparación de los bordes a unir no cumple con el diseño establecido, existirá alto riesgo de ocurrencia de discontinuidades en la soldadura, así como del incremento de distorsión. Como puede apreciarse, es un factor crítico que la preparación de la junta cumpla con el diseño establecido en dibujos y procedimientos, y una de las responsabilidades clave del inspector es asegurar tal cumplimiento.

Tamaño incorrecto de la soldadura

Los dibujos detallados, los símbolos de soldadura y las normas referidas en los contratos especifican el tamaño que debe tener toda soldadura, y cada norma establece tolerancias permitidas. Las soldaduras que no tienen el tamaño correcto, particularmente si resultan de tamaño menor al especificado (aunque algunas normas, sobre todo las europeas, tampoco permiten soldaduras de tamaño menor al especificado), se consideran defectuosas y deben ser detectadas y corregidas. Su detección se realiza por medio de su inspección visual y con calibradores de soldadura, y es una de las funciones del inspector realizar tal detención.

En el capítulo 2, que trata sobre el significado de los términos, se establecen las definiciones de tamaño de soldadura y en el capítulo 11, "inspección de soldadura", se describe la manera que se llevan a cabo las actividades relacionadas con la evaluación de los tamaños de la soldadura.

Perfil incorrecto de la soldadura

El perfil o contorno de las soldaduras ya terminadas influye en el comportamiento durante servicio de las partes soldadas, ya que las cargas involucradas pueden provocar efectos de concentración de esfuerzos en condiciones tales como soldaduras con convexidad o refuerzo excesivos. En soldaduras de pasos múltiples, el perfil inadecuado de un cordón incrementa el riesgo de ocurrencia de discontinuidades, tales como fusión incompleta, grietas e inclusiones de escoria, al aplicar los pasos subsecuentes.

Los criterios de aceptación relacionados con los perfiles de soldadura también están incluidos en las diferentes normas, y la falta de cumplimiento con respecto a estos criterios constituye defectos de soldadura, mismo que deben ser identificados, rechazados y reportados por el inspector de soldadura a fin de que el fabricante o el contratista procedan a su corrección.

Las principales discontinuidades e imperfecciones de esta categoría son: los traslapes (overlaps) soldaduras cóncavas y convexidad y refuerzos de soldadura excesivos. Por lo general, este tipo de discontinuidades involucran condiciones que pueden alterar el comportamiento previsto durante servicio de las partes soldadas y poner en riesgo su seguridad.

En el capítulo 11 se hace referencia a algunos criterios de aceptación para perfiles de soldadura y a los métodos de inspección correspondientes.

Productos terminados con dimensiones incorrectas

Las normas sobre estructuras, equipos y partes soldadas, y en algunos casos, los dibujos y especificaciones de ingeniería, también establecen los requisitos dimensionales, y las tolerancias aplicables, con los que deben cumplir los bienes fabricados. La falta de cumplimiento de estos requisitos es motivo de rechazo de los productos involucrados, ya que resultan afectados su utilidad y su comportamiento durante servicio; El inspector de soldadura también tiene, entre sus funciones, la de asegurar la conformidad con respecto a este tipo de características.

Es conveniente mencionar que el cumplimiento con las dimensiones especificadas puede ser una tarea muy difícil, ya que las operaciones de soldadura involucran diferentes grados de contracción y distorsión, por lo que los medios para controlarlas y minimizarlas, tales como secuencias adecuadas de soldadura, debieran ser analizadas y discutidas, antes que inicie la fabricación por el diseñador, el inspector y el fabricante.

Discontinuidades en la estructura y propiedades de juntas soldadas

Además de las imperfecciones de los metales de soldadura y base descritas anteriormente, existen otras condiciones y discontinuidades relacionadas con las propiedades, estructura y apariencia que afectan adversamente a las juntas soldadas. A continuación se describen brevemente las imperfecciones de este tipo.

Golpes de arco (arc strikes)

Son discontinuidades que se producen, intencional o accidentalmente, cuando se establece el arco eléctrico entre la pieza de trabajo y el electrodo, fuera del área del metal de soldadura permanente. Consisten en pequeñas áreas localizadas de metal fundido y térmicamente afectado, o en cambios del contorno superficial de cualquier objeto metálico sobre el que se inició o desplazó el arco, fuera de las áreas a fundir posteriormente como parte de las operaciones de soldadura. Se pueden considerar como discontinuidades en la micro-estructura de los metales.

Las áreas con golpe de arco contienen regiones de metal que fundió, solidificó y enfrió rápidamente (debido a la dispersión masiva del calor originada por la cantidad relativamente grande de metal). Los golpes de arco son deseables y con frecuencia no son aceptables, ya que pueden originar el agrietamiento de las partes que los contienen (principalmente si son de aceros al carbono o de baja aleación), durante el proceso de fabricación o al estar en servicio, particularmente si existen condiciones de fatiga. La mayoría de las normas requiere que las áreas con golpes de arco sean removidas y que su eliminación efectiva sea verificada.

Salpicaduras o chisporroteo (spatter)

Partículas metálicas expulsadas durante soldadura por fusión y que no forman parte de la junta. Por la definición, las salpicaduras son partículas lanzadas lejos de los metales base y de soldadura, pero algunas de estas realmente se adhieren al metal base continuo.

Por lo general las salpicaduras no se consideran un problema serio, a menos que su presencia interfiera con operaciones posteriores, particularmente con la ejecución de exámenes no destructivos, o afecten la unidad o la apariencia de la parte o componente.

Condiciones indeseables relacionadas con las propiedades, composición y estructura de las juntas soldadas

Idealmente, las juntas soldadas debieran tener las mismas propiedades, composición química y micro-estructura en el metal de soldadura, el metal base y la zona afectada térmicamente, pero en la práctica, siempre existen diferencias entre estas regiones de las juntas; tales diferencias pueden resultar perjudiciales para el comportamiento seguro de las partes soldadas.

En todo caso, la condición que siempre se necesita satisfacer es que las propiedades de la junta, tanto en el metal de soldadura, el metal base y la zona afectada térmicamente, sean similares o compatibles. Esto es, que la unión soldada en su conjunto posea (en la medida de lo posible y cumpliendo los requisitos de las normas aplicables) propiedades similares –resistencia a la tensión ductilidad, resistencia al impacto, dureza, resistencia a la corrosión y composición química, entre otras- a fin de que las partes soldadas puedan tener un comportamiento satisfactorio durante servicio.

Los medios para cumplir la condición anterior son provistos por las normas, a través de sus requisitos sobre la preparación de las especificaciones de procedimientos de soldadura adecuadas para cada aplicación, su calificación mediante pruebas (o su precalificación, si ésta procede) y su aprobación.

Discontinuidades de los metales bases

Por su parte, las placas, los tubos, las piezas forjadas y fundidas y los otros metales base presentan discontinuidades que pueden afectar la calidad de los productos soldados. Las especificaciones de los metales base establecen los criterios de aceptación para tales discontinuidades, y es deber del inspector de soldadura detectarlas, evaluarlas y rechazar los productos que no cumplen los criterios especificados.

Algunas discontinuidades que presentan los metales base, tales como las grietas y desgarre laminar, se desarrollan durante las operaciones de soldadura, mientras que otras ya existen en ellos como parte inherente de sus procesos de fabricación; Las imperfecciones mas comunes de este tipo se describen a continuación.

Laminaciones (laminations)

Discontinuidades planas, generalmente extendidas y paralelas a la superficie de laminación, que se encuentran en el área central de productos laminados, tales como placas, laminadas y perfiles.

Las laminaciones se forman como resultado de porosidades, cavidades de concentración o inclusiones no metálicas en el lingote original a partir del cual se fabrico el producto laminado; el proceso de laminado provoca que tales discontinuidades se usen, extiendan, crezcan y adquieran forma plana en la parte central del espesor de la pieza.

Algunas laminaciones pueden ser eliminadas debido a las altas temperaturas y presiones de la operación de laminado, pero otras persisten y pueden ser completamente internas, caso en el que solo pueden detectarse con inspección ultrasónica; también pueden extenderse a los extremos y bordes y resultan visibles en la superficie, o bien, pueden quedar expuestas por operaciones de corte y maquinado, situaciones en las que pueden ser verificadas por medio de líquidos penetrantes o partículas magnéticas.

Las partes metálicas que contienen laminaciones por lo general no son capaces de conducir satisfactoriamente los esfuerzos de tensión a traves de la dirección del espesor, por lo que el tamaño y frecuencias de las laminaciones están restringidos por las especificaciones correspondientes.

Delaminación (delamination)

Es la separación de una laminación debida a esfuerzos aplicados. Estos esfuerzos pueden ser generados por operaciones de soldadura o por presión. Pueden ser detectadas con ultrasonido (con haz recto), o, si aflojaran a la superficie de los bordes, visualmente.

Costuras y pliegues (seams and laps)

Discontinuidades en los metales base fabricados por medio de operaciones que involucran deformaciones plásticas.

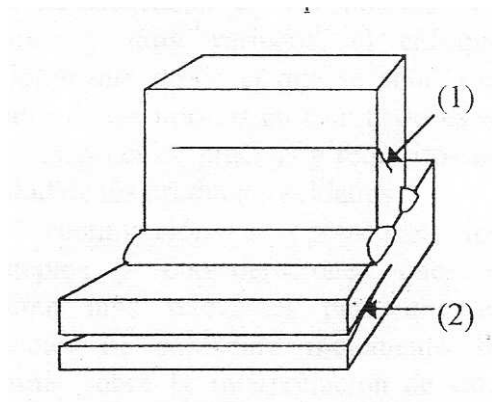


Figura 6.19- Costura o pliegue (1) y laminación (2) en metales base

Cuando las costuras y pliegues son paralelos a los esfuerzos principales, generalmente no constituyen condiciones críticas, pero si son perpendiculares a los esfuerzos residuales o aplicados durante servicio, frecuentemente tienden a propagarse como grietas. Asimismo, soldar sobre costuras o traslapes puede causar agrietamiento.

Capítulo 07

CÓDIGOS, NORMAS Y ESPECIFICACIONES

Contenidos:

DESCRIPCIÓN

PÁGINA

Introducción

Origen de las normas

Código, normas y especificaciones

Aplicabilidad de las normas y claves para su interpretación

Algunas normas sobre equipos y estructuras soldadas

Requisitos de las normas para los materiales y su control

Requisitos de calificación de procedimientos y personal de soldadura

Requisitos sobre inspección y pruebas

Normas para equipos y tuberías en servicio

Introducción

Los códigos, normas y especificaciones son documentos que rigen y regulan actividades industriales.

Existe una variedad muy amplia de áreas, productos, servicios y sistemas objeto a las normas, y el alcance, campo de aplicación, extensión y estructura de estas también son muy variados.

Los documentos que gobiernan o establecen lineamientos para las actividades relacionadas con la industria de la soldadura tienen el propósito de asegurar que solo se producirán bienes soldados seguros y confiables, y que las personas relacionadas con las operaciones de soldadura no estarán expuestas a peligros indebidos ni a condiciones que pudieran resultar dañinas a su salud.

Todo el personal que participa en la producción de bienes soldados, ya sean diseñadores, fabricantes, proveedores de producción y de servicio, personal de montaje o inspectores, tienen la necesidad de conocer, por lo menos, las porciones particulares de las normas que aplican a sus actividades. La declaración anterior es particularmente válida para el inspector de soldadura, ya que el propósito del ejercicio de su especialidad es determinar si los productos soldados cumplen los criterios de aceptación de las normas y otros documentos aplicables.

Por otra parte, algunas normas, particularmente los códigos, son muy extensos y se refieren a todos los aspectos de su campo de aplicación, por lo que con frecuencia, su manejo e interpretación pueden resultar difíciles y provocan una reacción de rechazo por parte de los lectores.

La intención de este capítulo es presentar la información básica necesaria para adquirir una visión de conjunto acerca de la estructura, campo de aplicación y requisitos generales de los códigos, normas y especificaciones de mayor aplicación en el campo de las estructuras, equipos y tuberías en cuya fabricación y montaje intervienen operaciones de soldadura.

Debido a que los aspectos y puntos de vista considerados en las normas son amplios y muy variados, el enfoque predominante desde el que se aborda el estudio de las normas en este texto es el de la inspección, pruebas y requisitos de calidad de los productos soldados.

A continuación se presentan los conceptos y consideraciones que se estiman más relevantes para que el inspector de soldadura incremente su dominio sobre la interpretación de este tipo de documentos.

Origen de las normas

Las normas son desarrolladas, publicadas y actualizadas por organizaciones y entidades gubernamentales y privadas en el propósito de aplicarlas a las áreas y campos particulares de sus intereses.

Las principales entidades que generan las normas relacionadas con la industria de la soldadura son las siguientes:

- American Association of State Highway and Transportation Officials –AASHTO (Asociación Americana de Oficiales de Carreteras Estatales y Transportación)
- American Bureau of shipping –ABS (Oficina Americana de Barcos)
- American Institute of steel construction –AISC (Instituto americano de construcción)
- American National Standards Institute-ANSI (Instituto Nacional Americano de Normas)

- American Petroleum Institute –API (Instituto Americano del Petróleo)
- American Society of Mechanical Engineers –ASME (Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos)
- American Water Works Association-AWWA (Asociación Americana de Trabajos de Agua)
- American Welding Society –AWS (Sociedad Americana de Soldadura)
- Association of American Railroads- AAR (Asociación de Ferrocarriles Americanos)
- ASTM, Anteriormente The American Society for Testing and Materials (Sociedad Americana de Pruebas y Materiales)
- International Organization for Standardization –ISO (Organización Internacional para la Normalización)
- SAE, anteriormente The Society of Automotive Engineers (Sociedad de Ingenieros Automotrices).

Debido a que muchas áreas de interés se traslapan, las entidades involucradas proceden, cuando es posible o práctico, a hacer los acuerdos pertinentes a fin de evitar la duplicación de esfuerzos.

Las normas reflejan el consenso de las partes relacionadas con su campo de aplicación, por lo que cada organización que las repara, tiene comités o grupos de trabajo compuestos por representantes de las diferentes partes interesadas. Todos los miembros de esos comités son especialistas en sus campos, y preparan borradores o versiones preliminares de las normas, mismos que son revisados por grupos más amplios antes de que las versiones finales sean probadas.

Los integrantes de cada uno de los comités principales se seleccionan entre grupos de productores, usuarios y representantes del gobierno, de manera que incluyan miembros de todos los sectores y estén representados los diversos intereses de todas las partes involucradas. Para evitar el control o influencia debida de un grupo de interés, debe alcanzarse el consenso de un alto porcentaje de todos los miembros.

Los gobiernos federales también se han dado a la tarea de desarrollar normas, o bien a adoptarlas, para que aquellos bienes o servicios que resultan de interés público más bien que del privado. Los procedimientos para preparar, publicar y actualizar normas gubernamentales o de aplicaciones militares son similares a los que emplean las organizaciones privadas, y dentro de los organismos federales generalmente existen comités encargados de preparar las normas para regular encargados de preparar las normas para regular las aplicaciones particulares que son de su interés o responsabilidad.

En los Estados Unidos de América, la entidad responsable es el Instituto Nacional Americano de Normas. El ANSI es la organización privada que opera a través de grupos de revisión de interés nacional que determinan si las normas propuestas son de interés público. Estos grupos están integrados por representantes de diversas organizaciones relacionadas con los asuntos de cada norma, y si los integrantes del grupo alcanzan el consenso en el sentido valor general de la norma en cuestión, entonces ésta puede ser adoptada como una Norma Nacional Americana.

Si una norma adoptada por el ANSI es invocada por un mandato o regulación gubernamental, su cumplimiento, desde un punto de vista legal, adquiere un carácter obligatorio. Los siguientes ejemplos ilustran situaciones en las que algunas normas sobre bienes soldados, adoptadas por el ANSI, alcanzan la categoría de aplicación obligatoria:

- El código ANSI/ASME para calderas y recipientes a presión, al estar referido en las regulaciones de seguridad de la mayor parte de los estados y las principales ciudades de los Estados Unidos, así como en las provincias del Canadá, obliga a fabricantes, agencias de inspección y usuarios de este tipo de bienes en esas entidades, a

cumplir los requisitos de este código, que también está incluido en las regulaciones de algunas agencias federales.

- El código para tuberías sujetas a presión, ANSI/ASME B3.14, "sistemas de transportación líquida para hidrocarburos, gas líquido de petróleo, amoníaco anhidro y alcoholes", al estar incorporado por referencia en las regulaciones del departamento de transportación de los Estados Unidos, lo convierte, legalmente, en una forma de cumplimiento obligado. El departamento de transportación tiene la responsabilidad de regular, en el comercio interestatal, la transportación, a través de líneas de tubería, de materiales peligrosos, petróleo y sus derivados. Las disposiciones de este departamento están publicadas bajo el título 49 del código de regulaciones federales de los Estados Unidos, parte 195.

Otros países desarrollados industrialmente, y algunos en vías de desarrollo, también se han dado a la tarea de preparar y publicar las normas necesarias para regular la producción y el comercio de los bienes que fabrican, venden y compran. A manera de ejemplo, se citan algunos organismos nacionales de normalización y el nombre con que son designadas las normas que publican.

-British Standards Institution (Institución británica de normas). Emite las normas Británicas (British Standard-**BS**)

-Canadian Standards Association (asociación de normas de Canadá) Emite las normas canadienses (Canadian Standards-**CSA**)

-Deutsches Institut fuer Normung (Instituto alemán de normas) emite las normas alemanas-**DIN**

-Japanese Standards Association (asociación japonesa de normas) emite las normas industriales japonesas (japanese industrial standards-**JIS**)

-Association Francaise de Normalisation-AFNOR (asociación francesa de normalización) emite las normas francesas (french Standard-**NF**)

-Asociación española de normalización y certificación –AENOR. Emite las normas técnicas nacionales españolas ("una norma española"- **UNE**)

En el ámbito internacional opera la organización internacional para la normalización fundada en 1947 para desarrollar un conjunto común de normas para la manufactura, el comercio y las comunicaciones. Aunque este organismo generalmente es referido como ISO, esta designación técnicamente no tiene un significado directo: es el nombre corto de la organización y fue derivado de la palabra griega *ísos*, que significa igual. Conceptualmente remite a igual, uniformidad, normal.

Las ISO tiene su sede en Ginebra, Suiza, esta compuesta por más de 120 países miembros y la integran aproximadamente 180 comités técnicos que preparan normas preliminares.

El Instituto Nacional Americano de normas es el organismo miembro que representa a los Estados Unidos de América en la ISO.

Códigos, normas y especificaciones

Como se mencionó anteriormente, los códigos, normas y especificaciones son documentos que regulan a las actividades industriales.

Los códigos, las especificaciones otros documentos de uso común en la industria tiene diferencias en cuanto su extensión, alcance, aplicabilidad y propósito. A continuación se mencionan las características clave de algunos de estos documentos.

Código (code)

Código es un conjunto e requisitos y condiciones generalmente aplicables a uno o más procesos, que regulan de manera integral el diseño, materiales, fabricación, construcción, montaje, instalación, inspección, pruebas, reparación, operación y mantenimiento de instalaciones, equipos, estructuras y componentes específicos.

Normas (standards)

El termino “norma” tal, y como es empleado por la AWS, la ASTM, la ASME y el ANSI, se aplica de manera indistinta a especificaciones, códigos, métodos, practicas recomendadas, definiciones de términos, clasificaciones y símbolos por un comité patrocinador (vigilante) de cierta sociedad técnica y adoptados por esta.

Especificación

Una especificación es una forma que describe clara y concisamente los requisitos esenciales y técnicos para un material, producto, sistema o servicio. También indica los procedimientos, métodos, clasificaciones o equipos a emplear para determinar se los requisitos especificados par el producto han sido cumplidos o no.

Practicas recomendadas y guías

Son normas que cuyo propósito principal es brindar asistencia, a través de la descripción de reglas y principios de efectividad comprobada sobre una actividad especifica, para que los usuarios pueden entenderlos y aplicarlos de manera adecuada antes de emplear algún proceso, técnica o método.

Clasificaciones

Estas normas generalmente establecen arreglos o agrupamientos de materiales, procesos o productos atendiendo a las características que tienen común, tales como origen, composición, propiedades, procesos de fabricación o uso.

Métodos y guías

Indican las prácticas reconocidas para realizar actividades tales como las pruebas, análisis, muestreos y mediciones aplicables a un campo específico. Este tipo de documentos establecen los procedimientos necesarios para determinar la composición, integridad, propiedades o funcionamientos de las partes o materiales a los que se aplican. Un método describe procedimientos uniformes que aseguran o mejoran la confiabilidad de los resultados a obtener, y no incluyen los límites numéricos de las propiedades o composición involucradas; tales límites o criterios de aceptación están contenidos en las especificaciones y códigos correspondientes. Ejemplos de este tipo de normas son los métodos de examen no destructivo.

Existen otros tipos de norma, tales como las de definiciones de términos y aquellas de símbolos gráficos. Estos documentos presentan y explican los temidos y símbolos estándar propios del dominio específico del campo de aplicación que regula estas normas. Esta clase de documentos constituyen un recurso que permite el uso de un lenguaje común entre los usuarios, son útiles para el entrenamiento del personal y mejoran la comunicación dentro de la industria.

Aplicabilidad de las normas y claves para su interpretación

El cumplimiento de los requisitos de las normas es obligatorio cuando tales normas están referidas o especificadas en las jurisdicciones gubernamentales, o cuando estas incluidas en contratos u otros documentos de compra.

El cumplimiento de las prácticas recomendadas o las guías es opcional. Sin embargo, estos son referidos en los códigos o especificaciones aplicables o en acuerdos contractuales, su uso se hace obligatorio. Si los códigos o los acuerdos contractuales contienen secciones o apéndices no obligatorios, empleo de las guías o las practicas recomendadas queda a la discreción del usuario.

El usuario de una norma debiera conocer completamente el alcance, el uso previsto y el campo de aplicación de esta, aspectos que están indicados en la **introducción** o en el **alcance** de cada documento. Asimismo, también es muy importante, pero a menudo más difícil, reconocer los aspectos no cubiertos por el documento. Estas omisiones pueden requerir algunas consideraciones técnicas adicionales: Un documento puede cubrir detalles sobre el producto, tales como forma, sin considerar las condiciones especiales bajo las cuales éste será usado. Ejemplos de estas condiciones especiales no previstas podrían ser la operación del material o parte en atmósfera corrosivas, bajo temperaturas elevadas o sometidas a cargas dinámicas o cíclicas en lugar de cargas estáticas.

En las normas hay diferencias en cuanto a la forma de lograr el cumplimiento de los requisitos: Algunas establecen existencias específicas que no permiten acciones alternativas, otras permiten acciones o procedimientos alternos, siempre y cuando se cumplan con los criterios estipulados, mismos que generalmente están dados como requisitos mínimos. Como ejemplo de esta situación puede citarse la resistencia ultima a la tensión que un espécimen soldado debe satisfacer o exceder, donde el criterio de aceptación a cumplir es la resistencia a la tensión mínima especificada para un metal base correspondiente.

Por otra parte, los requisitos mínimos de una norma particular pueden no ser suficientes para satisfacer las necesidades especiales de cada usuario, por lo que algunos usuarios pueden encontrar que resulta indispensable recurrir a requisitos adicionales para obtener las características de calidad que necesitan cubrir. Las especificaciones, ASTM por ejemplo, de materiales y productos, incluyen los requisitos suplementales previstos para especificar las características adicionales correspondientes, pero en circunstancias especiales, aun estos podrían resultar insuficientes.

Existen varios mecanismos por medio de los cuales la mayoría de las normas son revisadas. Estos mecanismos se ponen en practica cuando se detecta que una norma tiene errores, algunas normas son actualizadas regularmente en base de periodos establecidos, mientras que otras son revisadas según lo que requieran las necesidades. Las revisiones pueden ser en forma de "addenda", o estas pueden ser incorporadas en documentos que rempazan a las ediciones obsoletas.

Cuando hay preguntas acerca de una norma en particular con respecto a su interpretación o a un posible error, el usuario debiera contactar con la organización responsable.

Cuando el uso de una norma es obligatorio como resultado de una regulación gubernamental o de un acuerdo de compra y venta, es esencial conocer la edición particular del documento que debe ser empleado. Desafortunadamente no es poco común encontrar situaciones en las que se especifican ediciones obsoletas del documento al que se hace referencia, y tales ediciones deben ser seguidas a fin de poder dar cumplimiento a estos requisitos estipulados. Siempre que existan dudas enguanto a las ediciones o revisiones del los documentos a ser usados estas deberán aclararse antes de que se inicien los trabajos correspondientes.

Hay algunas palabras clave que se emplean ampliamente en las normas relacionadas con bienes soldados, a fin de asegurar su interpretación correcta, es conveniente precisar su significado e intención:

- **Shall y Hill (debe de)**, indican requisitos obligatorios, tales como el uso de ciertos materiales o la realización de determinadas acciones, o ambas cosas. Estos son términos que se encuentran con frecuencia en los códigos y especificaciones.
- **Should (podría y debiera)**, denota que el requisito o aspecto a que se refiere no es obligatorio, pero se recomienda como una buena practica, las practicas recomendadas y las guías generalmente emplean esta palabra.
- **May (puede)**, indica que la aplicación de la provisión a la cual se hace referencia es de carácter opcional.

Algunas normas sobre equipos y estructuras soldadas

A continuación se listan algunas de las normas que con mayor frecuencia están asociadas con las asignaciones con el inspector de soldadura:

- CODIGO ANSI/ASME BPV (ASME BPV CODE) PARA CALDERAS Y RECIPIENTES A PRECION.
- CODIGO ANSI/ASME B31 PARA TUBERIAS SUJETAS A PRECION.
- CODIGO ANSI/ASME D1.1 DE SOLDADURA ESTRUCTURAL -ACERO
- CODIGO ANSI/ASME D1.2 PARA SOLDADURA ESTRUCTURAL-ALUMINIO
- CODIGO ANSI/ASME D1.3 SOLADADURA ESTRUCTURAL –LAMINA DE ACERO (ESPESORES DELGADOS, MENORES DE1/8”)
- CODIGO ANSI/ASME D1.4 PARA SOLDAADURA ESTRUCTURAL –ACERO DE REFUERZO (VARILLAS PARA CONCRETO REFORZADO)
- CODIGO ANSI/ASME D1.5 PARA SOLDADURA DE PUENTES
- CODIGO ANSI/ASME D1.6 PARA SOLDADURA ESTRUCTURAL –ACERO INOXIDABLE
- ESPECIFICACIÓN ANSI/ASME D15.1 DE SOLDADURA DE FERROCARRILES, CARROS Y LOCOMOTORAS
- ESPECIFICACIÓN ANSI/ASME D14.1 PARA SOLDADURA DE GRUAS INDUSTRIALES Y OTROS EQUIPOS DE MANEJO DE MATERIALES
- ESPECIFICACIÓN ANSI/ASME D3.6 PARA SOLDADURA SUBACUATICA
- ESPECIFICACIÓN ANSI/ASME D18.1 PARA SOLDADURA DE SISTEMAS DE TUBERIA DE ACERO INOXIDABLE AUSTENÍTICO PARA APLICACIONES SANITARIAS (HIGIENICAS)
- ESPECIFICACIÓN ANSI/ASME B2.1 PARA CALIFICACION DE PROCEDIMIENTOS Y HABILIDAD DE SOLDADURA
- NORMA API 1104, SOLDADURA DE LÍNEAS DE TUBERIA E INSTALACIONES RELACIONADAS
- PRÁCTICA RECOMENDADA API 1107, PRÁCTICAS DE SOLDADURA DE MANTENIMIENTO PARA LÍNEAS DE TUBERÍA

- PRÁCTICA RECOMENDADA API 1111 PARA EL DISEÑO, CONSTRUCCIÓN, OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE LÍNEAS DE TUBERÍA PARA HIDROCARBUROS EN PLATAFORMAS MARINAS
- ESPECIFICACIÓN API 5L PARA TUBERÍA DE LÍNEA
- NORMA API 620, DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE TANQUES GRANDES DE ALMACENAMIENTO A BAJA PRESIÓN, SOLDADOS
- NORMA API 650, PARA TANQUES DE ACERO SOLDADO PARA ALMACENAR PETRÓLEO
- PRÁCTICA RECOMENDADA API 2AWS, PLANEACIÓN, DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE PLATAFORMAS MARINAS FIJAS –DISEÑO CON ESFUERZOS DE TRABAJO
- PRÁCTICA RECOMENDADA API 2ALRF, PLANEACIÓN, DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE PLATAFORMAS MARINAS FIJAS –DISEÑO CON FACTORES DE CARGA Y RESISTENCIA
- ISO 13920, TOLERANCIAS PARA CONSTRUCCIONES SOLDADAS –LONGITUDES, ÁNGULOS, POSICIÓN Y FORMA
- ISO 5817, JUNTAS SOLDADAS POR ARCO EN ACERO –GUÍA SOBRE NIVELES DE CALIDAD PARA IMPERFECCIONES
- ISO 3183-1, 3183-2, 3183-3/COR. INDUSTRIAS DEL PETRÓLEO Y GAS NATURAL –TUBO DE ACERO PARA LÍNEAS DE TUBERÍA –CONDICIONES TÉCNICAS DE ENTREGA, A, B, Y C (NORMA EN 3 PARTES)

ALCANCE, CAMPO DE APLICACIÓN Y ESTRUCTURA DE ALGUNAS NORMAS

Las normas mexicanas relacionadas con estructuras, líneas de tubería, equipos y componentes soldados no cubre la amplia gama de este tipo de bienes que se producen en el país, por lo que para cubrir las necesidades relacionadas con su diseño, construcción e inspección, se tiene recurrir a normas extranjeras.

Por otra parte, la globalización de las actividades industriales y comerciales impone el empleo de las normas nacionales del país que contratan el suministro de bienes, las que la nación de las partes contratadas para su suministro o las normas de uso común en el país de las organizaciones propietarias de la tecnología o desarrolladoras de la ingeniería de los productos o servicios a suministrar; también, cada vez es más frecuente el empleo de las normas de aceptación internacional.

Las situaciones que involucran los hechos anteriores se complican debido a que muchos fabricantes, contratistas y firmas de ingeniería y de servicios de inspección y control de calidad que operan en México, desconocen el alcance, campo de aplicación, interpretación y características generales de la gran variedad de las normas existentes.

A fin de familiarizar al lector con los documentos de uso más frecuente para el inspector de soldadura, a continuación se hace un breve bosquejo de estos.

Código ANSI/ASME para calderas y recipientes a presión (ASME BPVC)

Este código es emitido por la sociedad americana de ingenieros mecánicos. Su alcance y su campo de aplicación son muy amplios, y aunque a grandes rasgos están definidos por el nombre, es necesario tener presente el campo específico de cada una de las secciones, subsecciones y partes de que consta.

Este código es el único que requiere que las inspecciones sean llevadas a cabo por terceras partes independientes de los fabricantes y los usuarios. Los individuos designados para realizar este trabajo son los inspectores del consejo nacional de inspectores de calderas y recipientes a presión (nacional board of boiler and pressure vessel inspectors –NBBPVI).

Estos inspectores son empleados por agencias de inspección autorizadas, por lo general compañías aseguradoras, o bien por autoridades jurisdiccionales.

El código establece que antes de que una compañía pueda construir calderas o recipientes a presión, es necesario que posea el permiso correspondiente. Para que las compañías obtengan tales permisos, deben tener implantado un sistema de control de calidad y un manual que lo describa. Tal sistema debe resultar aceptable a la agencia de inspección autorizada y a la autoridad jurisdiccional o al NBBPVI. Si los resultados de la auditoria que se practica al sistema de calidad en cuestión son satisfactorios, ASME puede emitir al fabricante el certificado de autorización y la estampa del símbolo del código correspondiente al bien que esta autorizado a construir.

Adicionalmente, las agencias de inspección autorizadas llevan a cabo monitoreos de la construcción en planta y el montaje en campo de las calderas y recipientes a presión que constituyen las compañías, y antes de que estas puedan aplicar su estampa a cualquier bien que producen, un inspector autorizado debe asegurarse de que se cumplieron todas las provisiones aplicables del código.

El código ASME BPV consta de las siguientes secciones:

I Calderas de potencia

II Especificaciones de materiales

Parte A- Materiales ferrosos

Parte B- materiales no ferrosos

Parte C- varillas, electrodos y materiales de aporte para soldadura

Parte D- propiedades

III Subsección NCA- requisitos generales para las divisiones 1 y 2

III División 1

Subsección NB –Componentes clase 1

Subsección NC –Componentes clase 2

Subsección ND –Componentes clase 3

Subsección NE –Componentes clase MC

Subsección NF -Soportes

Subsección NG –Estructuras d soportes de núcleo

Subsección NH - Componentes clase 1 en servicio a temperaturas elevadas apéndices

III División 2- código para recipientes y contenedores de concreto de reactor

IV calderas de calefacción

V Exámenes no destructivos

VI Reglas recomendadas para el cuidado y operación de calderas calefacción

VII Reglas recomendadas para el cuidado de calderas de potencia

VIII Recipientes a presión

División 1

División 2 –Reglas alternativas

División 3 –Reglas alternativas para la construcción de recipientes a alta presión

IX Calificaciones de soldadura y soldadura fuerte

X Recipientes a presión de plástico reforzado con fibra de vidrio

XI Reglas para la inspección durante servicio de componentes de plantas de energía nuclear

Debido al contenido y campo de aplicación tan amplio de este código, es conveniente hacer algunas precisiones acerca del alcance de algunas de las secciones que cubren el diseño, construcción e inspección de calderas y recipientes a presión.

La sección I cubre las calderas de potencia, eléctricas y miniatura, así como calderas de agua que operan a altas temperaturas y que son empleadas en servicio estacionario, y también aquellas calderas de potencia que se usan en locomoción, portátiles y en servicio de tracción.

La sección III esta orientada a los diversos componentes requeridos en la industria de la energía nuclear.

La sección IV aplica calderas que suministran vapor de agua caliente y que están sometidas a fuego directo producido por petróleo, gas, electricidad o Carbón.

La sección VIII Cubre los recipientes a presión no sometidos directamente a fuego. Este tipo de recipientes son contenedores sujetos a presión interna o externa. Todos los recipientes a presión que no están cubiertos por las secciones I, III y IV, lo están por la sección VIII. Entre estos están incluidos las torres de destilación, los reactores y los otros recipientes usados a la refinación química o de petróleo, intercambiadores de calor para refinerías y otras industrias de proceso, así como tanques de almacenamiento para compresores grandes y pequeños de gas y aire.

Código ANSI/ASME B31 para tuberías sujetas a presión

Actualmente consta de ocho secciones, cada una de las cuales prescribe los requisitos mínimos aplicables al diseño, materiales, fabricación, montaje, pruebas e inspección de un tipo específico de sistema de tubería.

Sección B31.1, tubería para potencia cubre sistemas de potencia y de servicios auxiliares para estaciones de generación de energía eléctrica, plantas industriales e institucionales, plantas de calefacción principales y regionales, y sistemas de calefacción regionales. Y sistemas de calefacción regionales.

Esta sección no incluye la tubería externa de las calderas que es definida por la sección I del código ASME BPV; tal tubería requiere un sistema de control de calidad y una inspección por terceras partes similar a aquella requerida para fabricación de calderas. Pero por otra parte, los materiales, el diseño, la fabricación, instalación, inspección y pruebas para la tubería externa de calderas deben cumplir los requisitos de la sección B31.1.

Sección B31.2, tubería para gas combustible

Esta sección se discontinuó como norma Nacional Americana en febrero de 1988, y era aplicable a los sistemas de tubería para gases combustibles, tales como gas natural, gas manufacturado, gas licuado de petróleo (LP) y mezclas con aire arriba de los límites superiores combustibles, gas LP en la fase gaseosa, o mezclas de estos gases. Las especificaciones que eran objetos de esta sección actualmente están cubiertas por la sección B31.4.

Sección B31.1, tubería para plantas químicas y refinerías de petróleo

Cubre todas las tuberías dentro de los límites de propiedad de las instalaciones dedicadas al proceso o manejo de productos químicos, del petróleo y sus derivados. Como ejemplo de este tipo de tuberías se pueden citar las de las plantas químicas, refinerías de petróleo, terminales de carga, plantas de procesamiento de gas natural (incluyendo instalaciones de gas natural licuado), plantas de entrega a granel, plantas de mezclado y campos o conjuntos de tanques. Esta sección aplica a sistemas de tubería que manejan todo tipo de fluidos, incluyendo sólidos fluidizados, y para todo tipo de servicios, incluyendo materias primas, productos químicos intermedios y finales; aceite y otros productos de petróleo, gas, vapor, aire, agua y refrigerantes, excepto aquellos que específicamente están excluidos. Las tuberías para aire y otros gases los cuales actualmente no están dentro del alcance de las secciones existentes de este código pueden diseñarse, fabricarse, inspeccionarse y aprobarse de acuerdo con los requisitos de esta sección de código. Las tuberías deben estar en plantas, edificios e instalaciones similares que de otra forma no están incluidos dentro del alcance de esta sección.

Sección B31.4 “sistemas de transportación líquida para hidrocarburos, gas líquido de petróleo, amoníaco anhidro y alcoholes”

Esta sección prescribe requisitos para tubería que transporta líquidos tales como petróleo crudo, condensados, gasolina natural, líquidos de gas natural, gas licuado de petróleo, alcohol líquido, amoníaco anhidro líquido y productos líquidos de petróleo, entre las instalaciones de contratación de los productores, conjuntos de tanques, plantas de procesamiento de gas natural, refinerías, estaciones, plantas de amoníaco, terminales (marítimas, de ferrocarril y de autocamiones) y otros puntos de entrega y recepción.

Sección B31.5, tubería de refrigeración

Aplica a tuberías para refrigerantes y salmueras para uso a temperaturas tan bajas como -320°F (-196°C), ya sea que hayan sido construidas en el campo o ensambladas en fábrica. Esta sección no es aplicable a sistemas unitarios de

refrigeración o auto-contenidos que están sujetos a requisitos de los underwriters laboratorios o cualquier otro laboratorio de pruebas de reconocido nacionalmente, tubería para agua o tubería diseñada para presión interna o externa que no exceda de 15 lb/pulg² manométricas, sin considerar su tamaño. Otras secciones del código pueden estipular requisitos para tuberías de refrigeración dentro de sus respectivos alcances.

Sección B31.8, sistemas de tubería de transmisión y distribución de gas

Está orientada a estaciones compresoras de gas, estaciones de regulación y dosificación de gas, líneas de servicio hasta el punto de entrega del dispositivo de medición del cliente. También están incluidas las líneas y equipos de almacenamiento de gas del tipo tubo cerrado que son fabricadas o forjadas a partir de tubos y conexiones.

Sección B31.9, tuberías de servicios en edificios

Esta sección es aplicable a sistemas de tuberías para servicios a edificios industriales, comerciales, públicos, institucionales y residenciales de unidades múltiples. Incluye solamente los sistemas de tubería dentro de los edificios o sus límites de propiedad.

Sección B31.11, sistemas de tubería para transportación de lechadas o lechos fluidos

Sección B31g, manual para determinar la resistencia remanente de líneas de tubería corroída. Un suplemento al código ASME B31

Esta contiene procedimientos para la evolución de tuberías en servicio corroídas, así como para la toma de las acciones permanentes a fin de determinar si estas pueden continuar en operación en condiciones razonablemente seguras, si tienen que ser reparadas o se debe disminuir la presión máxima permisible de operación a fin de que puedan continuar en servicio.

Todas las secciones del código para tuberías a presión requieren de la calificación de los procedimientos y la habilidad de soldadores y operadores de equipo para soldar a ser usados en construcción.

Algunas secciones requieren que estas calificaciones sean realizadas de acuerdo con la sección IX del código ASME BPV, mientras que en otras, esto es opcional. Algunas de las secciones requieren o permiten, como alternativa, realizar estas calificaciones de acuerdo con API 1104, norma para la soldadura de líneas de tubería e instalaciones relacionadas.

En todo caso, debe consultarse la sección aplicable en el código a fin de determinar correctamente cuales son las normas de calificación aplicables.

Código ANSI/AWS D1.1 de soldadura estructural – Acero

Este código cubre los requisitos aplicables a estructuras de acero al carbono y de baja aleación. Esta previsto para ser empleado conjuntamente con cualquier código o especificación que complemente el diseño y construcción de estructuras de acero. Quedan fuera de su alcance los recipientes y tuberías a presión, metales base de espesores

menores de 1/8 pulg. (3.2mm), metales base diferentes a los aceros de carbono y de baja aleación y los aceros con un límite de resistencia mínimo mayor a 100,000 lb/pulg² (690Mpa).

A continuación se indican las secciones que lo componen y se resumen de los requisitos que cubren:

1. Requisitos generales.

Contiene la información básica sobre el alcance y limitaciones del código.

2. Diseño de conexiones soldadas

Contiene requisitos para el diseño de conexiones soldadas compuestas por perfiles tubulares y no tubulares.

3. Precalificación

Cubren los requisitos para poder excluir a las especificaciones de procedimiento de soldadura de las exigencias de calificación propias del código.

4. Calificación

Contiene los requisitos de calificación para especificaciones de procedimientos y personal (soldadores, operadores de equipo para soldar y "punteadores") de soldadura necesarios para realizar trabajos de código.

5. Fabricación

Cubre los requisitos para la preparación, ensamble y mano de obra de las estructuras de acero soldadas.

6. Inspección

Contiene los criterios para la calificación y las responsabilidades de inspecciones, los criterios de aceptación para soldaduras de producción y los procedimientos estándar para realizar inspección visual y las pruebas no destructivas.

7. Soldadura de pernos

Esta sección contiene los requisitos aplicables a la soldadura de pernos a acero estructural.

8. Reforzamiento y reparación de estructuras existentes

Contiene la información básica relacionada con la modificación o reparación de estructuras de acero ya existentes.

Anexos –información obligatoria

Anexos no obligatorios

Comentarios sobre el código de soldadura estructural – acero

Código para soldadura de puentes ANSI/ASHTO/ AWS D15

Esta norma cubre los requisitos de fabricación por medio de la soldadura aplicables en los puentes de carreteras, y debe ser usado conjuntamente con la especificación estándar para puentes de carreteras AASHTO o la especificación AASHTO para el diseño de puentes LRFD.

Las provisiones de este código no son aplicables a la soldadura de metales base de espesores menores a 3mm.

Las secciones de que consta este documento se listan a continuación:

1. Provisiones generales
2. Diseño de conexiones soldadas
3. Mano de obra
4. Técnica
5. Calificación
6. Inspección
7. Soldadura de pernos
8. Estructuras estáticamente cargadas (sin aplicaciones dentro de este código)
9. Puentes de acero soldados
10. Estructuras tubulares (sin aplicaciones dentro de este código)
11. Reforzamiento y reparación de estructuras existentes (sin aplicaciones dentro de este código)
12. Plan de control de fractura (fracture control plan –FCP) para miembros no redundantes

Anexos –Información obligatoria

Anexos no obligatorios

Norma API 1104 para Líneas de tubería e Instalaciones Relacionadas

Esta norma aplica a la soldadura por arco y por oxígeno y combustible de tubería empleada en la comprensión, bombeo y transmisión de petróleo crudo, productos del petróleo y gases combustibles, y también para los sistemas de distribución cuando esto es aplicable. Presenta métodos para la producción de soldadura aceptables realizadas por soldadores certificados que usan procedimiento y equipo de soldadura y materiales aprobados. También presentan métodos para la producción de radiografías adecuadas realizadas por técnicos que empleen procedimientos y equipos aprobados, a fin de asegurar un análisis adecuado de la calidad de la soldadura. También incluye los estándares de aceptabilidad y reparación para defectos de soldadura.

La autoridad legal para el empleo de esta norma deriva del título 49, parte 195, transportación de líquidos a través de líneas de tubería del código de regulaciones federales (CFR) de los Estados Unidos de Norteamérica.

A continuación se citan las secciones que forman parte de esta norma:

Sección 1 – Generalidades

Sección 2 – Calificación de procedimientos de soldadura con metal de aporte

Sección 3- Calificación de soldadores

Sección 4- Diseño y preparación de una junta para soldaduras de producción

Sección 5- Inspección y pruebas de soldadura de producción

Sección 6- Estándares de aceptación para pruebas no destructivas

Sección 7- Reparación y remoción de defectos

Sección 8- Procedimientos para pruebas no destructivas

Sección 9- Soldaduras automática

Sección 10- Soldadura automática sin adiciones de metal de aporte

Apéndice- Estándares alternativos de aceptación para soldaduras

Especificación API 5L para tubería de línea

El propósito de esta especificación es proporcionar estándares para tubos adecuados para usarse en la conducción de gas, agua y petróleo, en las industrias petroleras y de gas natural.

Es aplicable a tubos para líneas, soldados y sin costura. Incluye tubos de línea roscados de peso estándar y de pared extra- gruesa y doble, de los extremos planos especiales y también tubos con extremo en campana y espita y tubos de línea de flujo directo (through-the-flowline – TFL). El contenido de esta especificación se presenta a continuación:

1. Alcance
2. Referencias
3. Definiciones
4. Información a ser Suministrada por el Comprador.
5. Materiales y procesos de manufactura
6. Requisitos para los materiales
7. Dimensiones, pesos, pasos, longitudes, defectos y acabados en los extremos
8. Copes
9. Inspección y pruebas
10. Marcado
11. Recubrimiento y protección
12. Documentos

Apéndice A –Especificación para uniones soldadas de los segmentos de tubo

Apéndice B –Reparación de defectos por medio de soldadura

Apéndice C –Procedimiento de soldadura de reparación

Apéndice D –Tabla de elongaciones

Apéndice E –Dimensiones, pesos y presiones de prueba

Apéndice F –Requisitos suplementarios

Apéndice G –Dimensiones del dispositivo de prueba de doblado guiado

Apéndice H –Inspección del comprador

Apéndice I – Instrucciones de mercado para licenciatarios API

Apéndice J –Conversiones de unidades métricas (si) y procedimientos de redondeo.

Requisitos de las normas para los materiales y su control

De una forma u otra, las diferentes normas establecen una serie de requisitos para los materiales a ser empleados en los trabajos cubiertos por sus respectivos campos, así como para la inspección, pruebas y control de dichos materiales.

Por ejemplo, el código ASME BPV, en su sección II, partes A, B y c, recopila las especificaciones de los materiales adoptados para ser empleados en la construcción de calderas y recipientes a presión. Las especificaciones para materiales base las adoptó de la ASTM, y las relacionadas con consumibles de soldadura las adoptó de las AWS.

Otras normas, como el código AWS D1.1, hacen referencia directa a las especificaciones de materiales ASTM y AWS aplicables.

Antes de describir la forma en que las normas sobre bienes soldados prevén el control de los materiales, es conveniente examinar algunos aspectos relacionados con las especificaciones ASTM y AWS y las instituciones que las emiten

Las Especificaciones ASTM

ASTM (en otro tiempo the American Society for Testing and Materials, Sociedad Americana de Pruebas y Materiales) desarrolla y publica especificaciones que se usan en la producción y prueba de materiales. Los comités de esta asociación que desarrollan las especificaciones están compuestos por productores y usuarios, así como por otras entidades que tienen algún interés en los materiales correspondientes. Estas especificaciones cubren virtualmente todos los materiales que se emplean en la industria y el comercio, con excepción de los consumibles de soldadura, mismos que están cubiertos por especificaciones AWS.

Esta asociación publica un libro anual de normas ASTM que incorporan las normas nuevas y revisadas. Actualmente esta compuesta de 15 secciones formadas por 73 volúmenes y un índice. Las especificaciones para los productos metálicos, métodos de prueba y procedimientos analíticos de intereses en la industria de la soldadura se encuentran en las primeras tres secciones, compuestas por 18 volúmenes. La sección 1 cubre productos de hierro y acero, la sección 2 productos metálicos no ferrosos y la sección 3, métodos y procedimientos analíticos para metales y aleaciones.

Los prefijos que forman parte de la designación alfanumérica de cada especificación indican de manera general el contenido de estas: para metales ferrosos se usa "A" para metales no ferrosos se usa "B", y para materias diversas, entre las que incluyen exámenes, pruebas y métodos analíticos, el prefijo empleado es "E".

Cuando ASME adopta una especificación ASTM para cualquiera de sus aplicaciones, ya sea de manera completa y fiel o en forma revisada, le antepone una letra "S" al prefijo ASTM correspondiente. Así, la especificación ASME SA-36 es muy parecida o idéntica a la especificación ASTM A36 de la edición correspondiente.

Muchas especificaciones ASTM incluyen requisitos suplementarios que deben ser especificados por el comprador si este requiere que tales requisitos sean aplicados. Entre estos se pueden citar los relacionados con el tratamiento al vacío del acero, pruebas de tensión adicionales, pruebas de doblado, ensayos de impacto e inspección ultrasónica.

El productor de un material o parte es responsable de que estos cumplan con todos los requisitos obligatorios y los suplementarios especificados de la especificación ASTM correspondiente, mientras que el usuario del material o producto es responsable de verificar que el productor ha cumplido con todos estos requisitos.

Algunos códigos permiten a los usuarios realizar las pruebas requeridas por ASTM u otra especificación para verificar que el material cumple con los requisitos. Si los resultados de estas pruebas cumplen con los requisitos de la especificación asignada, el material puede ser usado para esa aplicación.

Algunos productos cubiertos por las especificaciones ASTM son fabricados por soldadura. De estos, el grupo más grande es el de tubos de acero. Algunos tipos de tubos son producidos a partir de solera, plancha o lamina, por medio de operaciones de rolado y soldadura por arco para ser la costura longitudinal. Los procedimientos de soldadura que se emplean para esta costura generalmente deben ser calificados de acuerdo con los requisitos del código ASME BPV o alguna otra norma. Otros tipos de tubos son producidos con costuras soldadas por resistencia, y en el caso, por lo general las especificaciones ASTM aplicables no establecen requisitos especiales de soldadura, pero el producto terminado es sometido a pruebas necesarias para demostrar si las operaciones de soldadura fueron efectivamente controladas.

Las especificaciones ASTM para materiales, ya sea que se trate de una en partículas, o que esta haga referencia a otra especificación de requisitos generales para un tipo de material o aplicación, son similares entre ellas y también a especificaciones de materiales emitidos por otras asociaciones en términos generales, la estructura, contenido y requisitos de este tipo de normas son los siguientes:

Alcance

Indica los materiales y productos a los que la especificación aplica. A veces esta sección incluye otros datos como el tipo, grado y clasificación, y la "calidad", servicio o aplicación al que se están destinados, por ejemplo, material para aplicación estructural o para operar a altas temperaturas.

Documentos aplicables o referidos

En esta parte se incluyen todas aquellas normas de referencia relacionadas, tales como requisitos generales, métodos de prueba o análisis y normas dimensionales.

Descripción y definición de términos

Algunas especificaciones en particular las de los requisitos generales, definen los términos empleados o hacen referencia al documento en que están definidos.

Pertenencia de materiales (Appurtrnant Materials)

Algunas especificaciones incluyen esta sección, en la que se hace referencia a algunos requisitos y a normas aplicables para la entrega de un material no considerado de alguna manera o no disponible en formas de producto cubiertas por la especificación.

Requisitos generales de entrega

En esta parte se establece que los materiales o productos a ser suministrados bajo la especificación, deben satisfacer los requisitos estipulados por el documento vigente sobre requisitos generales aplicable a un grupo de especificaciones particulares. Así, en la especificación ASTM A-240 (para placa, lámina y solera de acero al cromo resistente al calor, y de acero inoxidable al cromo-níquel), se establece que los materiales cubiertos deben cumplir con los requisitos aplicables de la norma ASTM A480, “requisitos generales para placa, lámina y fleje de aceros inoxidables y resistentes al calor”.

Información para la compra

Esta sección esta incluida en las especificaciones de requisito generales, y establece la información que deben incluir los pedidos o las ordenes de compra para describir adecuadamente el material deseado, a fin de evitar posibles confusiones. Los principales aspectos involucrados son: Asignación ASTM (incluyendo tipo, clase, grado) y la fecha de emisión de la especificación, cantidad, nombre del material, forma del producto, tamaño, condición, reportes de prueba, certificados de calidad y requisitos suplementarios y adicionales.

Proceso de fabricación

Tratamiento térmico

Estructura metalúrgica

Calidad

Requisito de composición química

Propiedades mecánicas

Inspección y pruebas especificadas

Métodos de prueba

Reportes de pruebas y certificados variaciones permisibles en dimensiones y masa

Reparaciones

Mercado, identificación, empaque y carga para el embarque

Rechazos

Requisitos suplementarios

Esta sección contiene los requisitos suplementarios, ya sea estandarizado u opcional, aplicable a los productos cubiertos por una especificación particular. Es conveniente hacer énfasis en el sentido en el que el productor esta obligado a que los bienes que suministra solo deben cumplir los requisitos estándar contenidos en las especificaciones correspondientes, y que para que también se cumplan los requisitos suplementarios deseados, estos debe estar especificado en las órdenes de compra.

Especificaciones AWS para materiales consumibles de soldadura

La Sociedad Americana de Soldadura publica- entre una cantidad numerosa de normas (alguna de las cuales han sido escritas o referidas en este texto) sobre usos y calidad de materiales, productos, prueba, operaciones y procesos de soldadura-, las especificaciones para varillas, electrodos y materiales de aporte y soldadura.

Estas especificaciones cubren la mayor parte de los materiales consumibles empleados en proceso de soldadura y soldadura fuerte, e incluyen requisitos obligatorios y opcionales. Los requisitos obligatorios cubren aspectos tales como composición química y propiedades mecánicas, fabricación, pruebas, marcado e identificación y empaque de los productos. Los requisitos opcionales incluidos en apéndices se proporcionan como fuente de información sobre la clasificación descripción o uso previsto de los metales de aporte cubiertos.

La designación alfanumérica de la AWS para especificaciones de materiales de aporte consta de una letra "A" seguida de 5, un punto y uno dos dígitos adicionales, por ejemplo la AWS A5.1, especificación para electrodos de acero al carbono para soldadura por arco metálico protegido.

La mayor parte de las especificaciones AWS para metales de aporte han sido aprobadas como normas nacionales norteamericanas por el ANSI.

Cuando ASME adopta estas especificaciones, ya sea de manera completa y fiel o con revisiones, le antepone las letras "SF" a la designación AWS, así, la especificación ASME SFA 5.1 es similar, si no idéntica a la AWS A5.1 (de la misma edición).

Además de las especificaciones para cada metal de aporte, la AWS emite el **documento A5.01, Guía para la Adquisición de Metales de Aporte**, misma que, para asistir a los usuarios en sus funciones de adquisición, establece los métodos para la identificación de componentes de los metales de aporte, para la clasificación de lotes y para la especificación de programas de prueba.

Actualmente y en términos generales, las especificaciones AWS para metales de aporte tienen el siguiente formato:

- Alcance
- Parte A –Requisitos generales
- Parte B –Pruebas, procedimientos y requisitos
- Parte C –Manufactura, empaque e identificación
- Apéndice (en esta parte se incluyen los métodos de clasificación de los materiales objeto de la norma particular, algunos aspectos sobre procedimientos de soldadura y pruebas de clasificación, la descripción y uso intentado para cada clasificación, la descripción y uso intentado para cada clasificación, la descripción y uso intentado para cada clasificación cubierta y las condiciones típicas de almacenamiento y secado para electrodos recubiertos).

Por otra parte, es conveniente señalar que en un contexto internacional. Actualmente no existe consenso en cuanto a la designación de los diferentes metales de aporte, ya que cada uno de los países desarrollados emite sus propias normas y no hay correspondencia completa entre estas. Hace falta un sistema genérico para la designación de metales de aporte, pero en la preparación de tal sistema están trabajando el Instituto Internacional de Soldadura de los Estados Unidos de América y organismos de países de la Unión Europea. Se prevé que las designaciones empleadas por países europeos y por la AWS formaran la base de un sistema genérico internacional de designación,

mismas que serán empleadas en las especificaciones ISO e Irán siendo, de alguna manera, incorporadas a las especificaciones AWS.

Como puede apreciarse después de la descripción de algunas especificaciones de materiales base y de aporte, los requisitos para estos están incluidos en las especificaciones mismas, pero el control de los materiales en rubros tales como la inspección durante recibo, la identificación, rastreo habilidad, almacenamiento, manejo y preservación durante los procesos de fabricación y montaje, son requisitos establecidos por cada norma particular para bienes soldados, y hay que remitirse a estas, según la aplicación de que se trata.

Por ejemplo, la Sección VIII, División I del Código ASME BPV, entre sus apéndices obligatorios incluye en N°.10, "Sistema de Control de Calidad", mismo que contiene previsiones para el control de materiales. Adicionalmente, en sus diferentes partes y subsecciones contiene requisitos particulares para dicho control, tales como la inspección y el marcado de materiales y el examen de superficies durante la fabricación.

El código AWS D1.1, por su parte, en sus secciones sobre fabricación e inspección, contiene algunos requisitos aplicables al control de materiales, además de que estos deben cumplir con las especificaciones correspondientes.

Requisitos de Calificación de Procedimientos y personal de Soldadura

Los requisitos de las normas relacionados con la documentación, calificación y certificación de los procedimientos y personal de soldadura son tratados con cierto detalle en el Capítulo 8.

Requisitos sobre Inspección y Pruebas

Los códigos y especificaciones establecen las diversas inspecciones y pruebas que se deben aplicar para asegurar el cumplimiento de los requisitos estipulados, quien debe realizar tales actividades y cuando, los criterios de aceptación y los requisitos de calificación y certificación del personal de inspección. En general, todas las normas hacen una distinción entre las actividades de inspección y control de calidad que deben ser realizadas por el fabricante o contratista y aquellas a ser llevadas a cabo por segundas o terceras partes.

El Código ASME BPV, además de establecer las responsabilidades de examen y pruebas propias de los fabricantes y contratistas, incluye la intervención de una inspección por terceras partes independientes del fabricante y el comprador: el "Inspector Autorizado". Por su parte, el Código AWS D1.1 hace la distinción muy clara entre Inspección y Pruebas durante Fabricación e Inspección de Verificación, siendo estas últimas una prerrogativa del propietario. ASME BH31.3 distingue entre exámenes e inspección, reservando esta última designación para las funciones realizadas por parte del inspector del propietario o el delegado del inspector, y API 1104 establece que las actividades de inspección pueden ser realizadas por parte de la compañía o por parte del contratista.

ASME B31.1, API 1104 y AWS D1.1, entre otras normas, establecen los requisitos de calificación y/o certificación para el personal que realiza los exámenes y pruebas o inspecciones por parte del fabricante o contratista y por segundas o terceras partes. Los requisitos de calificación para este tipo de personal generalmente están fijados en términos de entrenamiento y experiencia, aunque algunas veces se hace referencia a esquemas más completos de calificación y certificación, mismos que incluyen también requisitos de escolaridad, exámenes de pericia y agudeza visual. Entre

estos esquemas destaca el Programa de Certificación de la Sociedad Americana de Soldadura, mismo que es descrito en el Capítulo 1 de este texto.

Los exámenes o inspección y pruebas a ser realizados por el personal empleado por el fabricante o contratista indicados anteriormente se refiere a actividades generales de control o aseguramiento de calidad (tales como control de materiales base y aporte y otras funciones propias de la inspección de soldadura), de las que se excluyen las pruebas no destructivas, para las cuales existen requisitos particulares, los mas relevantes de los cuales se describen en la siguiente sección.

Requisitos para la realización de exámenes no destructivos

Las diferentes normas establecen una serie de requisitos para la realización de las pruebas no destructivas especificadas a fin de verificar la calidad de los metales base y las juntas soldadas.

Los requisitos establecidos pueden clasificarse en dos grupos: los relacionados con la ejecución de las pruebas en si y aquellos que tienen que ver con la capacitación, calificación y certificación del personal encargado de llevarlas a cabo.

En cuanto al personal de pruebas no destructivas, las normas generalmente establecen de que este debe estar calificado y certificado de acuerdo con la edición vigente de la Practica Recomendada SNT-TC-1^a emitida por la Sociedad Americana de Ensayos no Destructivos (american Society for Nondestructive Testing –ASNT). De esta manera se tiene que, en términos generales –como lo establece claramente AWS D1.1 en sus párrafos 6.14.7.1 y 6.14.7.2-, solo individuos certificados con Nivel I (en la técnica no destructiva correspondiente) y trabajando bajo la supervisión de individuo Nivel II, o personal certificado como Nivel II, pueden realizar las pruebas no destructivas especificadas.

Adicionalmente, las normas coinciden en señalar que la certificación del personal de niveles I y II debe ser realizada por un individuo certificado como Nivel III por la ASNT o que ha sido certificado sobre los requisitos, incluyendo los exámenes, establecidos en el documento SNT-TC-1^a.

Hay algunas variantes en los requisitos anteriores, ya que ASME B31.3 solo indica que la Practica Recomendada SNT-TC-1^a puede emplearse para propósitos de calificación y certificación, mientras que la Sección VIII División I de ASME BPV permite la Certificación de Competencia del personal que realiza los exámenes por partículas magnéticas y líquidos penetrantes requeridos por esa división. Las condiciones para esta certificación de competencia que debe cumplir el personal que realiza estos ensayos por partículas y líquidos (y los procedimientos de examen) están estipulados en los Apéndices Obligatorios Nos.6 y 8. Respectivamente.

En cuanto a los requisitos para la realización de las pruebas, estos varían de una norma a otra. A manera de ejemplo, a continuación se citan algunos casos:

- El Código ASME especifica que las pruebas deben realizarse cumpliendo todos los requisitos establecidos en su Sección V.
- AWS D1.1 describe los procedimientos de pruebas radiográficas y ultrasónicas de soldaduras en su Sección 6, Parte D, E y F.
- La Norma API 1104, en su Sección 8 presenta métodos y establece los requisitos aplicables, y para la situación en las que están especificadas pruebas con partículas magnéticas, líquido penetrantes y ultrasonido, remite al usuario a las especificaciones ASTM correspondientes. (La sección 6 contiene los estándares de aceptación).

Normas para equipos y tuberías en servicio

Las normas analizadas con anterioridad están orientadas, preferente o exclusivamente, al diseño, fabricación, construcción e inspección y pruebas de equipos y estructuras nuevas, pero existen algunos documentos cuyo campo de aplicación está relacionado con recipientes a presión, calderas y líneas de tuberías en servicio. A continuación se describen brevemente los de mayor importancia en los Estados Unidos de América.

Código de inspección del Consejo Nacional

Este documento (the National Board Inspection Code –NBIC), preparado por el Consejo Nacional de Inspectores de Calderas y Recipientes a Presión, tiene el propósito de mantener la integridad de las calderas y recipientes a presión después de que han sido puestos en servicio, y establece las reglas para la inspección, reparación y alteración de tales equipos a fin de asegurar que estos puedan continuar de manera segura.

Al establecer lineamientos a las autoridades jurisdiccionales, inspectores, usuarios y organizaciones que realizan las reparaciones y alteraciones, este código fomenta la administración uniforme de las reglas relacionadas con los contenedores de presión.

En su parte RA-1000, “Generalidades”, se refiere a los requisitos administrativos para la acreditación de organizaciones dedicadas a la reparación, así como para organizaciones de inspección por parte de usuarios y propietarios.

El Consejo Nacional administra los cuatro programas de acreditación que se indican a continuación:

- Estampa Símbolo “R”, cuyo alcance es la reparación y alteración de contenedores de presión.
- Estampa Símbolo “VR”, que cubre la reparación de válvulas de alivio de presión.
- Estampa Símbolo “NR”, orientado a reparaciones, modificaciones y reemplazos de las partes y componentes empleados en la industria nuclear.
- Organizaciones de Inspección de Propietarios/Usuarios, que cubre la inspección durante servicio de los contenedores de presión, empleados por o en posesión de la organización acreditada como una Organización de Inspección Propietaria/Usuaría.

Código API 570 para Inspección de Tubería

Este código cubre procedimientos de inspección, reparación, alteración y reclasificación (rerating) para sistemas de tubería metálica que ha estado en servicio, y fue desarrollado para las industrias de refinamiento de petróleo y de procesos químicos, pero puede ser usado, cuando resulte práctico, en cualquier sistema de tubería.

Norma API 653 para Inspección, Reparación, Reconstrucción y alteración de Tanques

Esta cubre los tanques de acero al carbono y de baja aleación construidos de acuerdo a la Norma API 650 y a su predecesora, 12C. Establece los requisitos mínimos para mantener la integridad de tanques soldados o remachados, no refrigerados y a presión atmosférica, después que han sido puestos en servicio. Su alcance está limitado a la cimentación, fondo, envoltorio, estructura, techo, accesorios y a las boquillas unidas a las primeras bridas, juntas rosca latas o conexiones soldadas exteriores.

Código API 510 para Inspección de Recipientes a Presión

Cubre el mantenimiento, inspección, reclasificación (rerating) y alteración de recipientes a presión en servicio empleados en la industria petroquímica a refinación.

Practica Recomendada API 573

Este documento proporciona los lineamientos para la inspección de calderas y calefactores sometidos a fuego directo. Combina los capítulos VIII, “Calderas a Fuego Directo y Equipo Auxiliar” y IX, “Calefactores a Fuego y Chimeneas”, de la **Guía de inspección de Equipo de Refinería**. Su propósito es promover procedimientos de inspección pro-activa que permitan evitar fallas en los equipos, y de esta manera incrementar la confiabilidad y seguridad en las plantas

Programas API de Certificación de Inspectores

El instituto Americano del Petróleo, con el fin de ayudar a la industria a mantener y mejorar la seguridad y confiabilidad durante la operación de equipos e instalaciones, ha desarrollado algunos esquemas de certificación de inspectores. Actualmente tiene implementados los siguientes programas:

- Certificación de Inspector de Tuberías de Proceso I API 570
- Certificación de Inspector de Tanques de Almacenamiento I API 653
- Certificación de Inspector de Recipientes a Presión I API 510.

Capítulo 08

CALIFICACIÓN DE PROCEDIMIENTOS Y PERSONAL DE SOLDADURA

Contenidos:

DESCRIPCIÓN

PÁGINA

Introducción

Variables de soldadura

Requisitos de calificación de procedimientos y personal de soldadura

Especificación de procedimientos de soldadura EPS (WPS)

Calificación de procedimientos de soldadura

Especificación estándar de procedimientos de soldadura

Calificación de la habilidad del personal de soldadura

Variables de soldadura a incluir en los documentos de calificación

Responsabilidad con respecto a la calificación de procedimientos y personal de soldadura

Introducción

En términos generales, todos los trabajos de soldadura necesitan de uno o más procedimientos de soldadura que definan, con suficiente detalle, como deben realizarse las operaciones involucradas, y todas las normas sobre equipos, partes de equipos, tuberías y estructuras en cuya fabricación, construcción y montaje intervienen operaciones de soldadura, establecen requisitos relacionados con la preparación, calificación y certificación de los procedimientos de soldadura, así como la calificación de la habilidad, de los soldadores y operadores de equipo para soldar a emplearse en la realización de soldaduras de producción en los trabajos a realizar.

La exigencia de tales requisitos se debe a que si existen muchos factores que influyen en las características de las uniones soldadas. Entre estos factores pueden mencionarse, entre muchos otros, los diferentes procesos de soldadura con que puede realizarse una junta, los diversos materiales base (aceros al carbono, aceros inoxidables, aleaciones de níquel, magnesio, titanio, etc.), las variaciones del espesor del metal base y las diferentes diseños de junta.

A fin de que las uniones producidas tengan, de manera consistente, las propiedades especificadas y la calidad requerida, es necesario controlar, de manera rigurosa, todas las variables que intervienen en la producción de las uniones soldadas, y tal control se logra mediante la preparación por escrito los procedimientos de soldadura necesarios, la calificación de los mismos y la calificación de la habilidad del personal que los empleará.

Es un hecho indiscutible que el éxito de los trabajos de soldadura depende, en gran medida, del cumplimiento total de las condiciones anteriores (disponibilidad de los procedimientos de soldadura certificados y aprobados para cubrir los requisitos de las aplicaciones previstas, así como del personal apto para aplicarlos), además de una inspección completa antes, durante y después de soldar, a fin de asegurar que los procedimientos establecidos son aplicados de manera correcta por el personal debidamente calificado.

Variables de soldadura

Los parámetros y condiciones que varían de una operación de soldadura a otra o dentro de una misma operación, y que influyen en mayor o menor grado sobre las propiedades de las uniones soldadas, son conocidos con el nombre de variables de soldadura.

Existen designaciones diferentes para estas variables, tales como variables de procedimiento y habilidad de soldadores y de operadores, y variables esenciales y no esenciales. Debido a las diferencias que existen entre las normas de mayor aplicación con respecto a la clasificación, designación y requisitos para los diferentes tipos de variable, en las secciones siguientes de este capítulo se describen los principales tipos de estas, se hacen algunas consideraciones acerca de cada uno y se señalan las diferencias básicas con que son tratadas en las principales normas.

Requisitos de calificación de procedimientos y personal de soldadura

Las normas también establecen que cada fabricante o contratista es el responsable de las soldaduras depositadas por el personal de su organización, que ningún trabajo de soldadura debe iniciarse si no se cuenta previamente con las especificaciones del procedimiento de soldadura a emplearse, que estas deben estar documentadas, calificadas y aprobadas, y que en tales trabajos solo debe intervenir personal de soldadura previamente calificado en la extensión y alcance completos estipulados.

Sin embargo, es necesario tener en cuenta que cada código o especificación tiene requisitos particulares para la documentación y calificación de los procedimientos y personal de soldadura, y que si bien las normas tiene características y propósitos similares, hay diferencias básicas en los requisitos especificados entre una y otra: por ejemplo, el código AWS D1.1 permite el uso de especificaciones de procedimientos de soldadura precalificados (mismos que no requieren de pruebas de calificación antes de poder ser empleados), pero otras normas no contemplan esta posibilidad.

Por otra parte, de acuerdo con los alineamientos del código ASME BPV, si un procedimiento de soldadura se califica en cualquier Posición, en términos generales, queda calificado para todas las posiciones, mientras que en el AWS D1.1, hay limitaciones considerables en cuanto a la calificación de los procedimientos en posiciones diferentes a aquella en la que se realizó la prueba de calificación.

A continuación se hace una descripción breve de los requisitos generales sobre la documentación, calificación, certificación y aprobación de procedimientos y de personal de soldadura establecidos en las normas más empleadas, y se hacen algunos comentarios con respecto a las diferencias más relevantes establecidas en éstas.

Especificación de procedimiento de soldadura –EPS (Welding Procedure Specification –WPS)

Una especificación de procedimiento de soldadura es un documento que contiene y describe las variables que aplican a los procesos y operaciones de soldadura a emplearse, así como los límites de los valores dentro de los que estas variables están calificadas y pueden emplearse en producción o construcción.

Las EPS se preparan con el propósito de dirigir a soldadores y operadores para que hagan soldaduras de manera que se asegure que se cumplen los requisitos de las normas aplicables.

Todo fabricante o contratista que realiza trabajos bajo un código, debe preparar por escrito, (ya sea que se trate de procedimientos precalificados o a calificar con pruebas) todas las especificaciones de procedimiento de soldadura a emplear, de manera que queden cubiertas todas las variables, operaciones y aplicaciones de cada trabajo o proyecto, y cumpliendo con los requisitos específicos del código aplicable; también debe proceder a su calificación y aprobación (esta última por parte del ingeniero o el representante del propietario, o por el inspector autorizado). Así mismo, debe proporcionar estas EPS al personal de soldadura para que le sirvan como guía para los trabajos a realizar, y tenerlas disponibles para la revisión y las actividades de inspección de los inspectores de las segundas o terceras partes involucradas, ya sea por requisitos contractuales o de norma.

Desde el punto de vista de las variables, existen diferencias significativas entre una norma y otra: mientras que en el código ASME BPV estipula que es una EPS debe contener todas las variables esenciales y esenciales suplementarias (y

también que, opcionalmente, puede contener las no esenciales), el código AWS D1.1 y la especificación API 1104 únicamente establecen que deben especificarse las variables esenciales.

Adicionalmente, solo en el código ASME BPV se hacen consideraciones relacionadas variables esenciales y esenciales suplementarias y se define con claridad cada tipo de variable mencionado.

El código ASME BPV (sección IX) considera a los diferentes tipos de variable de la siguiente manera:

-Variable esencial de procedimiento es aquella cuyo cambio (según es descrito en las tablas Nos. QW-252 a QW-265 de variables para cada proceso) afecta las propiedades mecánicas – con excepción de la resistencia al impacto- de la junta soldada y requiere la recalificación del procedimiento. Ejemplos de variable esencial son los cambios en el espesor del metal base (fuera del espesor calificado, según las tablas de variables de cada proceso y condición) y la inclusión y la exclusión de tratamiento térmico posterior de la soldadura.

-Variable esencial suplementaria es un cambio en la condición de la soldadura que afecta la tenacidad (resistencia al impacto) de una junta soldada. Un ejemplo de esta variable son los incrementos (mayores a los establecidos en las tablas de variables) en la temperatura entre pasos y el calor aportado por paso.

Es necesario tener presente que este tipo de variables solo es aplicable cuando otras secciones del código (no la sección IX), la sección VIII, División I, por ejemplo, especifican requisitos de resistencia al impacto para algunos metales. En este caso, un o más cambios en las variables esenciales suplementarias hace obligatoria la recalificación del procedimiento.

-Variable no esencial de procedimiento es un cambio en una condición de soldadura no afecta las propiedades mecánicas de la unión y no requiere recalificación.

Por su parte, ni AWS D1.1 ni API 1104 definen expresamente que es una variable esencial, pero en todas las normas se indica con precisión cuales son estas para cada proceso de soldadura, y se establece que un cambio con una o más de este tipo de variables, hace obligatoria la recalificación de procedimiento.

Cada norma particular establece los requisitos generales y específicos para la documentación (y calificación) de las EPS e incluye los formatos recomendados para éstas.

En cualquiera de los casos, el usuario debe remitirse a la norma específica correspondiente a cada campo de aplicación particular a fin de conocer con exactitud los requisitos que debe cumplir.

Calificación de procedimientos de soldadura

La calificación de un procedimiento consiste en soldar un ensamble o cupón de prueba empleando las variables establecidas en la especificación de procedimiento de soldadura (preliminar) a calificar, y obtener de este las probetas o especímenes para realizar los ensayos que establece cada norma.

El propósito de la calificación de un procedimiento es determinar la ensambladura soldada que se propone (en la EPS) para construcción, es capaz de tener las propiedades requeridas para la aplicación intentada.

El tipo y el número de ensayos que se deben realizar depende del tipo de soldadura involucrado (de ranura o de filete, por ejemplo) y para un mismo tipo de soldadura, los requisitos de cada código son diferentes, por lo que es necesario consultar cada norma particular a fin de identificar sus requisitos específicos.

Para el caso de soldaduras de ranura y de la mayoría de las aplicaciones, el código ASME requiere dos pruebas de tensión, dos de doblado de cara y dos de doblado de raíz (o cuatro de doblado lateral, en sustitución de las de caras y raíz, cuando los espesores del cupón de prueba son de 3/8" o mayores).

Se hace énfasis en la necesidad de remitirse a cada norma aplicable, ya que para soldaduras de ranura, el código AWS D1.1 requiere, además de dos pruebas de tensión y cuatro de doblado, inspecciones visual y no destructiva del cupón de prueba. Por su parte, la especificación API 1104, dependiendo del espesor de pared y de diámetro del tubo (cupón), además de establecer un número variable y diferente de ensayos de tensión (que varía de 0 a 4) y doblado de raíz, cara o lateral (de 2 a 8), también especifican de 2 a 4 pruebas de rotura en probeta ranurada (nick-break).

Si las pruebas realizadas a los especímenes cumplen los criterios de aceptación de resistencia a la tensión, de aceptación de resistencia a la tensión, de ductilidad (doblado) y "sanidad" (nick break), se comprueba que la unión soldada obtenida con el procedimiento propuesto para construcción tiene las propiedades requeridas para la aplicación intentada y la clasificaciones satisfactoria.

Los resultados de estos ensayos y los valores reales de las variables empleadas para soldar el ensamble de prueba deben ser documentadas en un *registro de calificación de procedimiento –RCS (procedure qualification record –PQR)*, para el cual, cada norma incluye sus formatos recomendados.

Una vez que las pruebas se realizaron y sus resultados son satisfactorios según los criterios de aceptación establecidos, se procede a hacer los cambios aplicables en la EPS preliminar, de acuerdo con los valores reales de las variables empleadas en las pruebas de calificación del procedimiento, y se emiten en la EPS y el RCS definitivos.

En el RCP, el fabricante o contratista debe certificar que los cupones y específicos de prueba se prepararon, soldaron y ensayaron cumpliendo los requisitos especificados. Adicionalmente, el EPS calificado puede proporcionarse a los soldadores u operadores que lo van a emplear, y tal EPS, así como el RCP correspondiente, debe tenerse disponible para la revisión de los representantes del cliente y para las actividades aplicables del inspector de soldadura.

Conviene mencionar que también pueden calificarse procedimientos a ser empleados para producir solamente soldaduras de filete y, en este caso, las pruebas que se deben realizar son otras: de macro-ataque, principalmente.

Especialización de procedimiento de soldadura precalificado

El código ANSI/AWS D1.1 para la soldadura estructural de acero permite el empleo de procedimientos precalificados.

La precalificación de especificaciones de procedimiento de soldadura debe ser definida como la exención de una EPPS de las pruebas de calificación requeridas en la sección 4 de este código, esto es, que dicha EPS puede emplearse para realizar soldaduras de construcción sin necesidad de efectuar dichas pruebas.

En cualquier caso, toda EPS precalificada debe estar escrita, el personal de soldadura que la aplique debe estar calificado de la manera prevista en la misma sección 4 del código.

Para que una EPS pueda considerarse como precalificada, debe cumplir con todos los requisitos establecidos en la sección 3 del código, algunos de los cuales se indican a continuación:

- El empleo exclusivo de procesos considerados como precalificados.
- El empleo exclusivo de los metales base y de aporte incluidos en la tabla 3.1
- La aplicación de las temperaturas mínimas de precalentamiento y entre pasos indicada en la tabla 3.2
- Que los parámetros de intensidad de corriente (amperaje) o velocidad de alimentación de alambre, potencial (voltaje), velocidad de desplazamiento y flujo de gas de protección estén establecidos en la EPS dentro de la limitación de variables prescrita en la tabla 4.5 para cada proceso aplicable
- Deben cumplirse todos los requisitos indicados en la tabla 3.7.

Especificaciones estándar de procedimientos de soldadura

Las EPS's estándar son procedimientos generados por la Sociedad Americana de Soldadura y el Consejo de Investigación en soldadura (Welding Research Council –WRC). Estos procedimientos están derivados de, y tiene el soporte de dos o mas RCP's realizados de acuerdo con la **Norma AWS B2.1 para la Calificación de Procedimientos y Habilidad de Soldadura**, y bajo el auspicio del WRC.

Estas especificaciones de procedimiento estándar pueden adquirirse y emplearse (sin la necesidad que el usuario las califique, ya que están previamente calificadas) siempre y cuando su uso esté permitido por las normas o documentos contractuales aplicables, se acepte (por escrito) la responsabilidad completa derivada de su uso, no se empleen fuera del intervalo de las variables establecidas y se proporcione el personal calificado y el equipo adecuado para su implantación.

Es interesante señalar el hecho de que el código NBIC permite, bajo ciertas circunstancias, efectuar reparaciones y alteraciones de partes sujetas a presión empleando una o más EPS estándar; y que la sección IX del código ASME BPV, a partir de su adenda 2000, permite que los fabricantes o contratistas usen las EPS estándar de la AWS en la construcción de las partes y equipos nuevos sujetos a presión, y no tendrán que realizar pruebas de calificación de procedimiento, sino deberán efectuar y documentar una demostración que avale que conocen suficiente de soldadura para seguir y aplicar la EPS estándar correspondiente.

Calificación de la habilidad del personal de soldadura

Las normas establecen que el personal, antes de iniciar cualquier soldadura de producción o construcción, debe estar debidamente calificado, en la extensión y en los términos especificados, ya sea que se trate de procedimientos calificados, precalificados o estándar.

El personal de soldadura es clasificado como sigue: soldador (welder) si emplea métodos de aplicación manuales o semiautomáticos, operador de equipo para soldar (welding operador) si aplica métodos mecanizados o automáticos, y “punteador” (tack welder) si únicamente aplica puntos (tack welds). Esta última clasificación es considerada únicamente por las normas emitidas por la AWS.

La preparación y la realización de una prueba de clasificación de habilidad de personal presupone la existencia de la EPS aplicable previamente documentada y calificada, misma que servirá como base para fijar los límites de las variables dentro de los cuales queda calificada la habilidad.

Las pruebas de calificación de habilidad tienen el propósito de demostrar si el personal tiene la capacidad para depositar metal de soldadura sin defectos: Habilidad manual para producir soldaduras sanas en el caso del soldador, y habilidad mecánica para operar el equipo en el caso de los operadores de equipo para soldar.

Los detalles de los ensambles o cupones de prueba, el tipo y número de ensayos a realizar y los criterios de aceptación están definidos en cada norma particular y difieren entre una y otra. Se vuelve a hacer énfasis en el sentido de que el lector debe remitirse a la norma correspondiente a cada aplicación.

En términos generales, para calificar la habilidad de soldadores y operadores para hacer soldaduras de ranura, se requieren, además de la inspección visual, una probeta de doblado de raíz y una de doblado de cara, o dos de doblado lateral. (La norma API 1104 también requiere pruebas de tensión y de rotura de probeta ranurada). Con ciertas limitaciones, las pruebas de doblado pueden ser sustituidas por el examen radiológico de los cupones o ensambles de prueba.

La limitación más frecuente para sustituir las pruebas de doblado por examen radiográfico está relacionada con las calificaciones de habilidad que involucran el proceso de soldadura de arco metálico protegido con gas con el modo de transferencia metálica en corto circuito (GMAW –S). Esto se debe a que el metal de soldadura depositado con este proceso (y modo de transferencia metálica) es susceptible de contener pequeñas zonas de fusión incompleta que no siempre pueden detectarse por medio de radiografía.

Las variables esenciales de habilidad del personal de soldadura, tales como posiciones, tipo de metales base y de aporte, el empleo de respaldo, diámetros de tubería, etc., así como el tipo y números de ensayos aplicables a cada tipo de soldadura y los criterios de aceptación están estipulados en cada norma.

Para cada prueba aprobada debe generarse un *registro de Calificación Habilidad del soldador –CHS orcas (Record Welder Qualification Record- WPQ or WPOR)*. En este documento se registran las condiciones y los valores reales de las variables que usó el soldador u operador al soldar su cupón de prueba de calificación, así como el intervalo (límites) de las variables en las que queda calificado. También se deben registrar los resultados de la inspección visual del cupón y de los ensayos mecánicos o exámenes radiográficos. Adicionalmente, el fabricante o contratista debe certificar que las soldaduras de pruebas fueron preparadas, realizadas y ensayadas de acuerdo con los requisitos aplicables.

Recalificación de la habilidad del personal de soldadura

La sección IX del código ASME establece que la calificación de la habilidad de un soldador o un operador de equipo para soldar expira si este no ha soldado con un proceso durante un periodo de 6 meses o más.

Por su parte, el código ANSI/AWS D1.1 establece que el periodo de efectividad de la calificación del personal de soldadura ha terminado, debe procederse a realizar las pruebas de recalificación correspondientes.

Ambos documentos estipulan que si hay razones específicas para cuestionar la capacidad del personal para hacer soldaduras satisfactorias, cesa la calificación de habilidad y deben llevarse a cabo las pruebas de recalificación en los términos especificados. Estas dos normas establecen con detalle las condiciones, excepciones y requisitos aplicables para cada caso particular de pruebas de recalificación, y también indican como y en que circunstancias debe conducirse la repetición de pruebas de habilidad en aquellos casos en el que el personal fallo en su primera prueba de calificación.

Adicionalmente, los soldadores y los operadores de un equipo para soldar deben ser recalificados cuando hay cambios en una o más de las variables esenciales de habilidad.

Las variables esenciales de habilidad están definidas como cambios en las condiciones de soldadura que afectan la capacidad del personal para depositar metal de soldadura sano. Ejemplos de este tipo de variables son cambios de proceso de soldadura, omisión del respaldo en las juntas y cambios en el No. F de los metales de aporte. Las normas incluyen tablas que describen este tipo de variable para cada proceso.

Variables de soldadura a incluir en los documentos de calificación

Como se mencionó anteriormente, la información requerida acerca de las variables de soldadura que se debe incluir en los EPS, RCP y RCS difiere de una norma a otra, y también varía en la forma en que cada norma clasifica a estas variables, pero independientemente de las diferencias señaladas, las variables de soldadura pueden agruparse en las siguientes categorías:

1. Uniones o juntas
2. Metales Base
3. Metales de aporte y electrodos
4. posiciones
5. Precalentamiento y temperatura entre pasos
6. Tratamiento térmico posterior a la soldadura
7. Gases de combustión y de protección
8. características eléctricas
9. técnica.

También son variables los diferentes tipos de proceso de soldadura (un cambio de proceso es considerado como variable esencial de procedimiento y de habilidad) y los métodos de aplicación (manual, semiautomático, mecanizado ó a máquina y automático).

A continuación se describen las principales variables de cada categoría y se indican algunos de sus aspectos clave.

Uniones o juntas

Los siguientes aspectos se consideran variables de soldadura asociadas con las juntas:

- *Tipo de unión (a tope, en esquina, de traslape, en "T" y de borde).*
- *Tipo de ranura ("V" sencilla, doble "V", bisel sencillo, etc.)*

- *Diseño básico de la unión*
- *La adición o eliminación de respaldos*
- *Eliminación de respaldo en uniones a tope soldadas por un solo lado*
- *Abertura de raíz*
- *Dimensión de la cara de raíz*
- *Angulo de ranura*

Metales base

Las variables principales relacionadas con los metales base son las siguientes:

- *Agrupamiento según la composición química, soldabilidad y propiedades mecánicas.*

Las normas agrupan a los metales base en función de característica tales como composición química, soldabilidad y propiedades mecánicas, de manera que los metales bases con características similares están clasificados dentro de un mismo grupo. Esta clasificación se hace con la finalidad de reducir el número de EPS a preparar y las pruebas de calificaciones correspondientes.

En la sección IX del código ANSI/ASME se agrupan los diferentes metales base adoptados para la construcción de calderas y recipientes a presión, asignándoles un número "P" y números de grupo (del 1 al 10) dentro de los números P para metales ferrosos los cuales tiene especificados requisitos de resistencia al impacto.

Así, si una EPS se califica con un acero ASME SA-36, con P No.1, esta misma EPS también esta calificada y puede emplearse (si no hay cambios en otras variables esenciales) para soldar un acero ASME SA-258 grados A, B y C o uno ASME SA-53, ambos con P No.1.

Por su parte, en el código AWS D1.1, los metales base precalificados están clasificados en los grupos I, II y III, y los del anexo M para EPS's a calificar con pruebas.

En la especificación ANSI/AWS B2.1, los metales base están agrupados en categorías generales bajo Números M de materiales y subsidios en grupos dentro de cada categoría general.

- *Espesor del metal base*

Las variaciones del espesor del metal base son una consideración importante en la calificación de los procedimientos, ya que si esta variación es mayor al intervalo permitido (en base al espesor del cupón de prueba empleado para la calificación) en las tablas de límites de espesores en las normas, se considera una variable esencial y la EPS correspondiente debe recalificarse o debe prepararse una nueva.

En la sección IX del código ASME BPV, los límites de espesores calificados de metales están establecidos en las tablas QW-451.1, QW-451.2 y QW-451.3 para la calificación procedimientos, y QW-452.2 y QW-452.2 para calificar la habilidad de soldador u operador. En el código AWS D1.1, los límites de espesor para calificación de EPS están especificados en la tabla 4.2, y para personal de soldadura en la tabla 4.9.

Metales de aporte y electrodos

Las principales variables de los metales de aporte son:

-Números F

Los electrodos y varillas de soldaduras están agrupados y clasificados en números F. Esta clasificación está basada principalmente en sus características de uso, mismas que determinan de manera fundamental la habilidad que tienen los soldadores para realizar soldaduras satisfactorias con un metal de aporte específico.

-Composición química del metal de soldadura depositado

La sección IX del código ASME, en su tabla QW-442, establece una clasificación de los metales ferrosos de soldadura depositados. Este agrupamiento está hecho en función de la composición química y a cada grupo se le asigna un número "A" esta clasificación agrupa los diferentes metales de soldadura en "familias" tales como metales ferrosos dulces (A No.1), aceros al carbono molibdeno (a No.2), aceros al cromo molibdeno (A No.12), etc.

-Clasificación de los metales de aporte

-Diámetro nominal de los electrodos consumibles

Con relación a esta variable, es oportuno señalar otra diferencia entre los requisitos de algunas normas: mientras que el código ASME y la norma API 1104 no consideran una variable esencial de procedimiento al cambio del diámetro de los electrodos, AWS D 1.1 si lo considera (en el caso particular del proceso SMAW, es variable esencial un incremento mayor a 1/32" en el diámetro de los electrodos recubiertos).

- *Espesor del metal de soldadura depositado*
- *Cambios en el tipo de electrodo de tungsteno*
- *Clasificación de los fundentes (para arco sumergido)*
- *Tipo y composición del fundente*
- *Adición o eliminación de insertos consumibles*
- *Tipo de metal de aporte (alambre sólido o tubular, por ejemplo)*
- *Adición o eliminación de metal de aporte suplementario*

Posiciones

- *Cambios en la posición de soldadura*
- *En posición vertical, cambios en la progresión ascendente o descendente*

Las posiciones de soldadura de ranura y de filete, así como las "tolerancias" para la inclinación del eje de soldadura y la rotación de la cara están ilustradas en las normas para las construcciones soldadas (las figuras 4.1 y 4.2 del código AWS D1.1, por ejemplo). En la figura 8.1 se ilustran las diferentes posiciones de prueba.

Pre calentamiento (preheat), temperatura entre pasos (interpass temperatura) y calor aportado por paso (heat input)

Las principales variables dentro de esta categoría son:

- *Disminución de la temperatura de pre calentamiento*
- *Variaciones en el sostenimiento o reducción de la temperatura después de terminar una soldadura y antes de aplicar cualquier tratamiento térmico posterior requerido*
- *Incrementos en la temperatura entre pasos máxima especificada en la EPS y registrada en el RCP*
- *Incrementos en el calor aportado por paso.*

Debido a la influencia que tiene estas variables sobre las propiedades mecánicas de las uniones soldadas y con la finalidad de hacer referencia a algunos requisitos clave de varias normas, a continuación se comentan algunos aspectos relevantes:

Las temperaturas de pre calentamiento y entre pasos son parámetros cuyas variaciones esenciales de procedimiento en las normas.

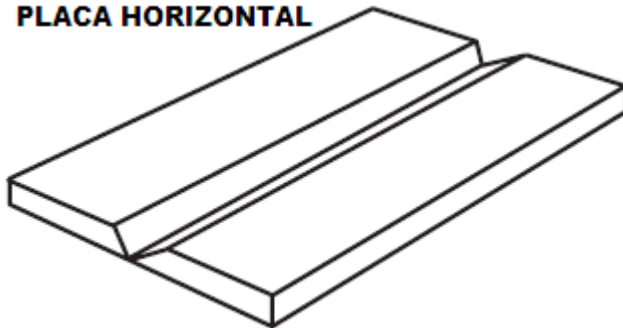
El propósito del pre calentamiento es evitar el agrietamiento de las uniones durante las operaciones de soldadura, y en cierta medida, ayudar a reducir los esfuerzos residuales.

En términos generales, las necesidades de pre calentamiento son mayores en la medida en la que aumentan los contenidos de aleantes (incrementos en el carbono equivalente) de los aceros al carbono y de baja aleación, los espesores a unir son mayores y si no se emplean procesos y metales consumibles de soldadura de bajo hidrogeno.

Los requisitos para temperaturas mínimas de pre calentamiento y entre los mismos pasos están referidos en cada norma, por ejemplo:

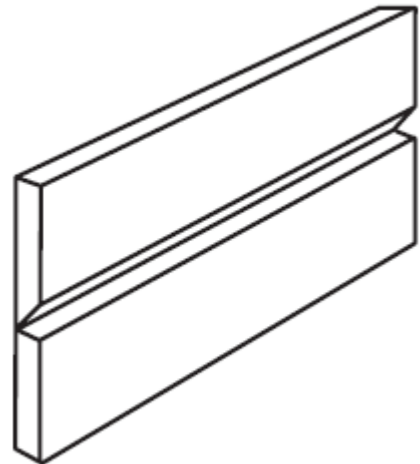
- El código AWS D1.1 en su Tabla 3.2 establece las temperaturas mínimas de pre calentamiento y entre pasos para procedimientos precalificados, así como métodos opcionales (véase Anexo XI) para fijar éstas.
- la sección VIII, división I del código ASME, en su Apéndice R, "Pre calentamiento", ofrece una guía general para fijar el pre calentamiento para los metales base listados bajo diferentes números P en la sección IX. En este caso no hay reglas obligatorias para establecer las temperaturas mínimas de pre calentamiento y entre pasos, con excepción de las indicadas en las notas de pie de página de las tablas Nos. UCS-56 y UHA-32.
- El código ASME B31.3, "tuberías para plantas químicas y refinerías de petróleo" establece, en su Tabla N° 330.1.1, las recomendaciones y requisitos de temperatura mínima de pre calentamiento y entre pasos (y de temperaturas máxima entre pasos) para metales base de diferentes espesores Y Números P.

PLACA HORIZONTAL



POSICIÓN DE PRUEBA 1G

PLACA VERTICAL; EJE DE SOLDADURA HORIZONTAL



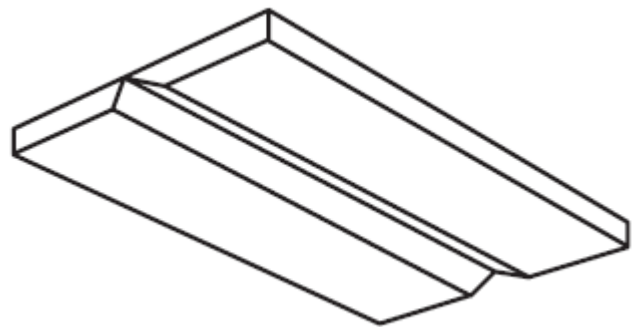
POSICIÓN DE PRUEBA 2G

PLACA VERTICAL; EJE DE SOLDADURA VERTICAL



POSICIÓN DE PRUEBA 3G

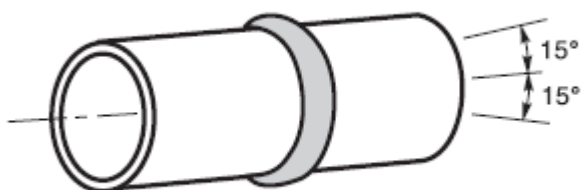
PLACA HORIZONTAL (SOBRECABEZA)



POSICIÓN DE PRUEBA 4G

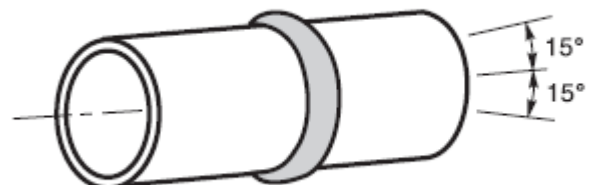
Posiciones de Prueba para Soldaduras de Ranura en Placa

TUBO HORIZONTAL; SE GIRA AL SOLDAR

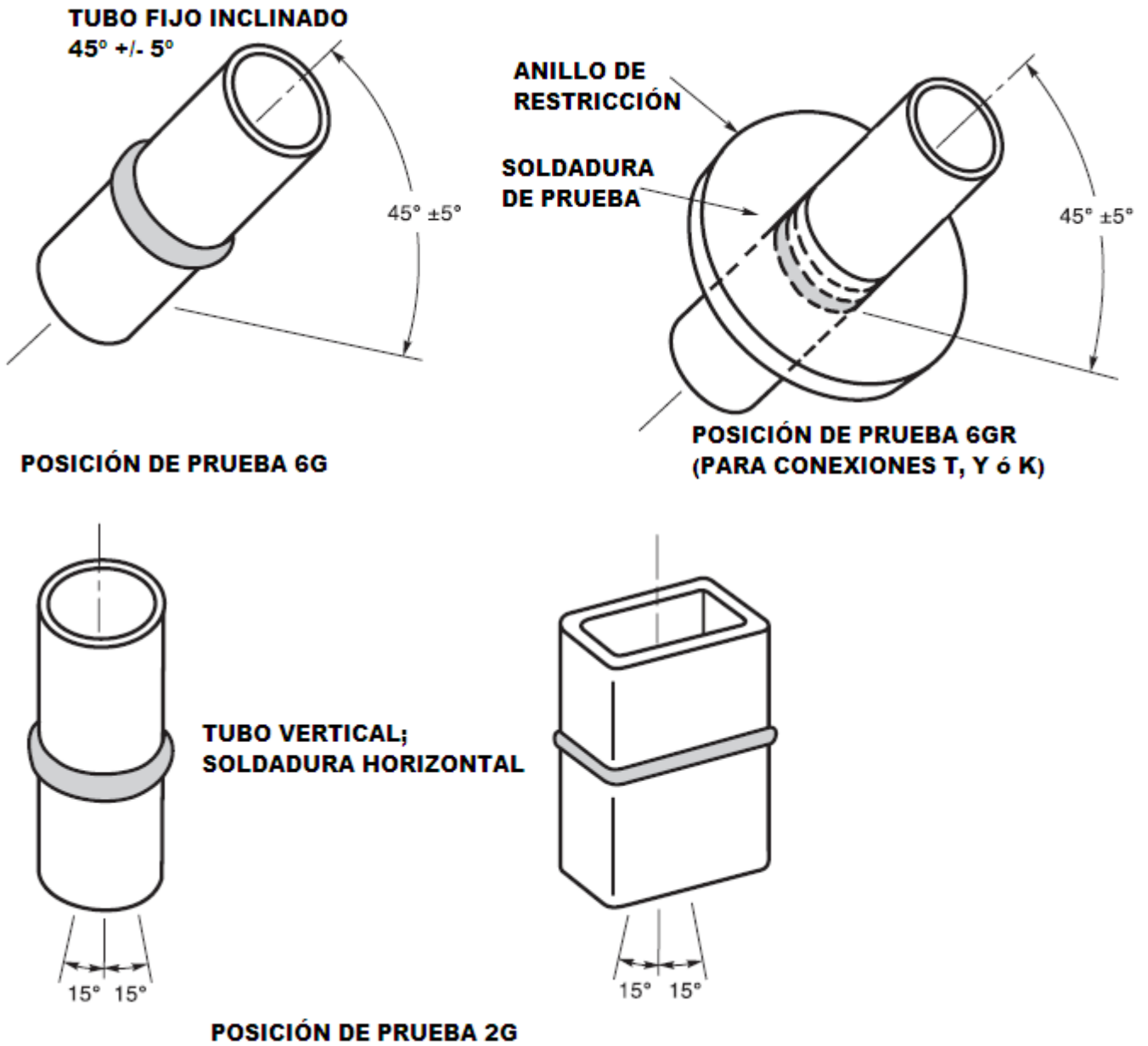


POSICIÓN DE PRUEBA 1G (GIRADA)

TUBO HORIZONTAL; NO SE GIRA AL SOLDAR SOLDADURA PLANA, VERTICAL Y SOBRE CABEZA



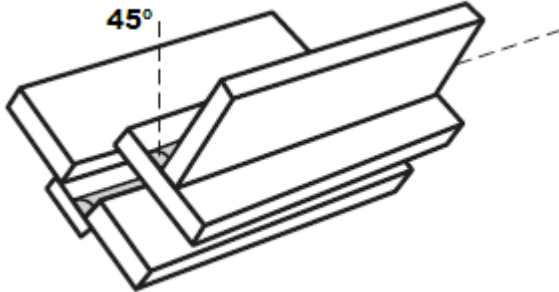
POSICIÓN DE PRUEBA 5G



Posiciones de Prueba para Soldaduras de Ranura en Tubo

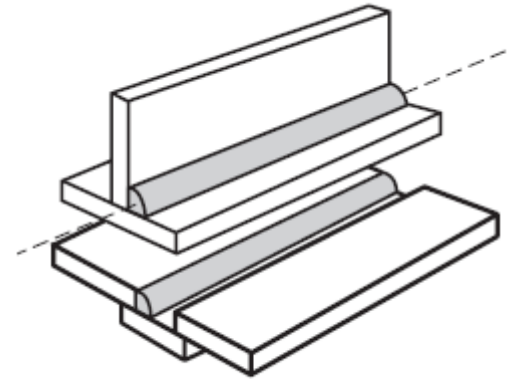
Figura 8.1 – Posiciones de Prueba de Soldadura

GARGANTA DE SOLDADURA VERTICAL



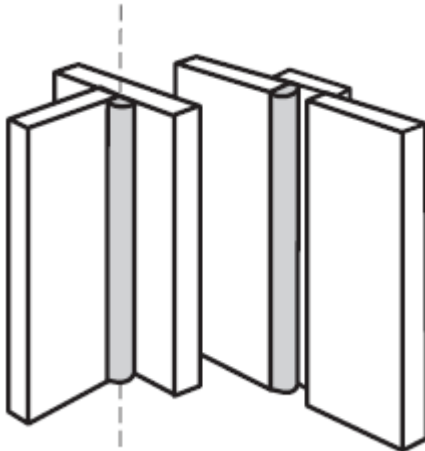
POSICIÓN DE PRUEBA 1F

EJE DE SOLDADURA HORIZONTAL



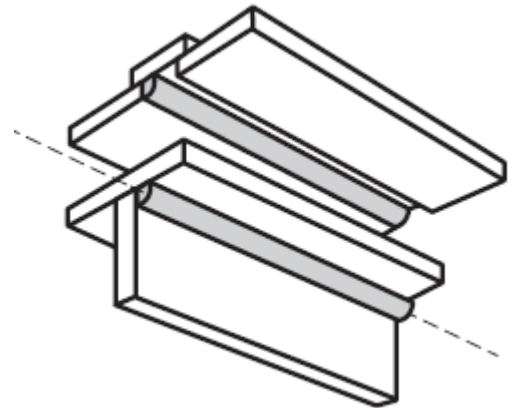
POSICIÓN DE PRUEBA 2F

EJE DE SOLDADURA VERTICAL



POSICIÓN DE PRUEBA 3F

EJE DE SOLDADURA HORIZONTAL



POSICIÓN DE PRUEBA 4F

Posiciones de Prueba de Soldaduras de Filete en Placa

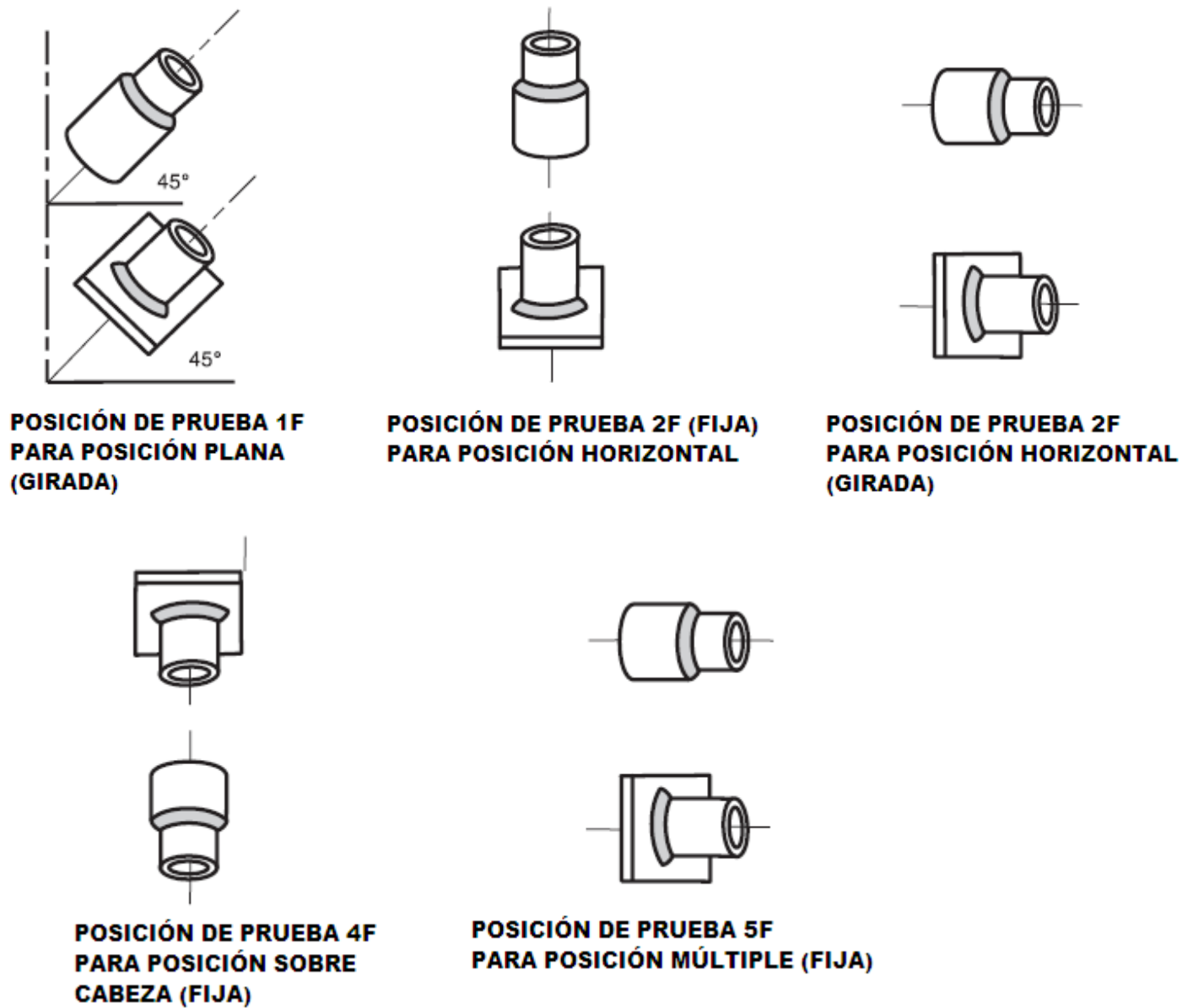


Figura 8.1 – Posiciones de Prueba de Soldadura (continuación...)

Asimismo, cada norma particular, en sus tablas variables para cada proceso de soldadura, especifica los intervalos de variación que se permiten para estos parámetros sin que se consideren variables esenciales y sin que se requiera la recalificación de los procedimientos.

En relación con la temperatura máxima entre pasos y al calor aportado por paso, en las normas (con excepción de las variables esenciales suplementarias y donde existen requisitos de resistencia al impacto) por lo general no están definidas por completo las limitaciones aplicables.

Cuando se trata de aceros al carbono, el hecho de que en las normas no están establecidas las limitaciones a las variables antes citadas, obedece a que la soldadura de estos aceros no presume problemas serios, pero cuando se sueldan otros metales base, por ejemplo aceros de alta resistencia y baja aleación templados y revenidos, o cuando

se trata de aceros inoxidable austeníticos, es necesario fijar con precisión los límites permisibles en las temperaturas máximas entre pasos y el calor aportado por paso, ya que de no hacerlo se corre el riesgo de afectar las propiedades mecánicas o de resistencia a la corrosión. Para fijar los intervalos de variación de estos parámetros hay que remitirse no solo a las tablas de variables esenciales suplementarias incluidas en las normas, sino a las recomendaciones de los fabricantes de metales base involucrados, y a bibliografía especializada sobre la metalurgia e ingeniería en soldadura.

Tratamiento térmico posterior a la soldadura (postweld heat treatment)

Las variables más comunes son:

- *Inclusión u omisión del tratamiento térmico posterior*
- *Tratamiento térmico se efectúa a temperaturas menores a la temperatura inferior de transformación, por ejemplo el alivio o relevado de esfuerzos (aplicable sólo a metales base ferrosos)*
- *Tratamiento térmico a temperaturas arriba a la temperatura superior de transformación. Un tratamiento de este tipo es normalizado (aplicable solo a metales base ferrosos)*
- *Un tratamiento térmico a temperaturas mayores a la superior de transformación, seguido por otro a temperaturas por debajo de la inferior de transformación, por ejemplo, normalizado y templado seguido y revenido (sólo aplicable a metales ferrosos)*
- *Un tratamiento térmico entre las temperaturas inferior y superior de transformación (aplicable sólo a metales base ferrosos)*
- *Cambios en la temperatura y tiempo de permanencia en horno.*

A continuación se hace referencia a algunos requisitos clave de las normas con respecto a estas variables.

Los tratamientos térmicos que se realizan después de soldar son de varios tipos, pero el que se aplica en la mayoría de las veces a los aceros al carbono y de baja aleación es el alivio o relevado de esfuerzos.

Para el caso de los recipientes a presión diseñados y construidos de acuerdo a la sección VIII, división I del código ASME, los requisitos correspondientes están contenidos en el párrafo UW-40 y las tablas Nos. UCS-56, UHT-56, UNF-56 y UHA-32, además de consideraciones como las indicadas en el párrafo UW-2, "restricciones de servicio", que establece que los recipientes que van a contener sustancias letales, si son construidos con aceros al carbono o de baja aleación, siempre deben ser térmicamente tratados.

El código ASME B31.3 establece los requisitos de tratamiento térmico posterior a la soldadura en el párrafo 331 y en la tabla 331.1.1, y los aplicables al tratamiento térmico posterior al formado o doblado se establecen en el párrafo 332.4.

Por su parte, el código AWS D1.1 establece en el párrafo 5.8 que cuando las especificaciones o dibujos de contrato lo requieren, los ensambles soldados deben ser sometidos a un relevado de esfuerzos por tratamiento térmico, y especifica los requisitos aplicables a este.

En cualquiera de los casos, los procedimientos de soldadura deben establecerse y

Calificarse considerando todas las variables esenciales, incluyendo las relacionadas con los tratamientos térmicos.

Gases empleados en soldadura

Las principales variables asociadas con los gases empleados son:

- *La adición u omisión del gas de protección (Shielding gas)*
- *Cambios de un gas sencillo de protección a otro gas sencillo, o a una mezcla de gases.*
- *Cambios en los porcentajes especificado a la composición de la mezcla de gases*
- *La adición o eliminación de gas de seguimiento (trailing gas), o bien un cambio en su posición*
- *Cambios en la velocidad del flujo del gas*
- *Adición u omisión del gas de respaldo (backing gas), o cambios en la velocidad del flujo o la composición del gas de respaldo*
- *La omisión de gas inerte en el gas de respaldo*
- *Cambios de protección en el ambiente (empleo de vacío, por ejemplo)*
- *Tipo de gas combustible*
- *Cambios en la presión del oxígeno o en la del gas combustible*

Características eléctricas

Las principales variables son:

- *Tipo de corriente (directa o alterna)*
- *Tipo de polaridad (directa o invertida)*
- *Calor aportado por paso*
- *Volumen de soldadura depositado por unidad de longitud*
- *El tipo de transferencia metálica a través de arco*
- *Adición u omisión de corriente pulsante a las fuentes de energía de corriente directa*
- *Variación en el amperaje y voltaje de soldadura*
- *Variación en la velocidad de alimentación de alambre (wire feed speed)*
- *Cambios en el tamaño y en el tipo de electrodos de tungsteno*
- *Cambios en la velocidad de desplazamiento (travel speed)*

Técnica

Las principales variables dentro de esta categoría son:

- *Cambio de técnica de cordón recto (string bead) a técnica de cordón oscilado (weave bead)*
- *Oscilación*
- *Naturaleza de la flama (reductora, oxidante o neutra)*
- *Tamaño del orificio de la copa de gas*
- *Técnica de soldadura, hacia delante o hacia atrás*
- *Método de limpieza inicial y entre pasos*
- *Método de ranurado (back gouging)*
- *Distancia entre la punta del contacto eléctrico a la pieza de trabajo (stickout or tube –work distance)*
- *Numero de electrodos (un solo electrodo o electrodos múltiples)*
- *Espaciado entre electrodos*
- *Angulo del electrodo (para arco sumergido)*
- *Si la soldadura es depositada por un solo lado o por ambos*
- *Cambios de método de aplicación (manual semiautomático, mecanizado o automático)*
- *Adición u omisión de martillado (peening).*

Es oportuno indicar que la relación anterior de variables de soldadura no es completa ni detallada, y que no todas las variables o categorías estas son aplicables a todos los procesos o metales base o de aporte. Los individuos encargados a realizar el trabajo (y también los inspectores o el personal encargado de evaluarlos y aprobarlos) asociados con la realización de pruebas de realización de pruebas de calificación y elaboración de los registros correspondientes, deben consultar las normas apropiadas, mismas que detallan con exactitud los requisitos aplicables en cada situación.

Responsabilidades con respeto a la calificación de procedimientos y personal de soldadura

Como se mencionó a lo largo de este capítulo, los contratistas y fabricantes que interviene en un trabajo a realizar de acuerdo con un código o especificación, son los responsables directos de las soldaduras aplicadas por todos los integrantes de su organización. Tales contratistas o fabricantes son los responsables de preparar todas las EPS necesarias, de realizar las pruebas de calificación de estas y de calificar la habilidad del personal de soldadura que va a emplear tales EPS, así como preparar, y actualizar los registros correspondientes (EPS, RCP y RCS); asimismo, tienen la obligación de poner estos documentos a la disposición del representante del cliente y los inspectores encargados de evaluarlos y emplearlos en sus tareas de inspección.

Las responsabilidades y obligaciones del inspector de soldadura son las de verificar que los procedimientos a ser empleados durante el trabajo de código satisfagan los requisitos especializados por este y que cubran las aplicaciones, condiciones y variables previstas para la ejecución del trabajo.

En este sentido, el inspector debe asegurar que los procedimientos estén debidamente preparados por escritos en las EPS correspondientes, que las calificaciones de procedimientos y de habilidad de soldadores y operadores de equipo para soldar hayan sido debidamente realizadas, documentadas y certificadas y estén actualizadas.

Una vez que se inician los trabajos de producción o construcción, el inspector debe verificar que los procedimientos establecidos y calificados se apliquen correctamente en cada junta, y que en su aplicación solo intervenga personal cuya habilidad este calificada en la extensión y las variables de soldadura impuestas en cada situación.

El inspector de soldadura, para cumplir satisfactoriamente con sus obligaciones y responsabilidades relacionadas con la calificación de procedimientos y personal, debe estar completamente familiarizado con los procesos involucrados en cada procedimiento, así como los requisitos específicos y generales del código particular aplicable, ya que en algunos sentidos, estos requisitos pueden diferir grandemente entre una norma y otra.

Algunas de las diferencias clave de las normas empleadas con mayor frecuencia fueron comentadas con cierto detalle a lo largo de este capítulo.

Capítulo 09

PRUEBAS DESTRUCTIVAS

Contenidos:

DESCRIPCIÓN

PÁGINA

Introducción
Pruebas destructivas aplicables a las soldaduras
Pruebas Mecánicas
Pruebas Químicas
Pruebas metalográficas
Otras pruebas

Introducción

Como todos los productos que se fabrican y se construyen, las partes y estructuras soldadas están destinadas a realizar un servicio bajo condiciones específicas, y las juntas soldadas de tales productos se diseñan para que posean propiedades y capacidad apropiadas para operar satisfactoriamente bajo condiciones de servicio previstas. Con el propósito de asegurar que las juntas cumplirán de manera efectiva intentada, por lo general se llevan a cabo algunas pruebas. Es obvio que la prueba ideal sería la operación de la estructura en las condiciones reales de operación, pero aun en los casos en los cuales su ejecución fuera factible, resultaría cara y consumiría mucho tiempo. Debido a esto, se emplean pruebas estandarizadas, y los resultados de estas pueden relacionarse con materiales y estructuras que se han comportado satisfactoriamente durante servicio.

Las pruebas a las que se someten las juntas soldadas son tan antiguas como la soldadura misma. Las primeras pruebas o ensayos que se aplicadas tuvieron los propósitos principales de detectar defectos bastos y evaluar la ductibilidad, pero a medida que los requisitos de calidad aumentaron, se desarrollaron pruebas para determinar características específicas, como la composición química y las propiedades mecánicas y metalúrgicas, así como para identificar y localizar discontinuidades tales como grietas, inclusiones de escoria y penetración y fusión incompletas.

Actualmente existe una variedad muy grande de pruebas estandarizadas, y estas se clasifican de acuerdo a diferentes criterios. Algunas son de naturaleza definitivamente destructiva, mientras que otras no. Desde el punto de vista, para el trabajo que desarrolla el inspector de soldadura en relación con las pruebas, resulta adecuado dividir las en dos grandes grupos: las destructivas y las no destructivas. Las primeras son tratadas brevemente en este capítulo y la segunda se describe en la siguiente.

Las pruebas destructivas que se realizan en el campo de las construcciones soldadas se conducen principalmente con la finalidad de calificar procedimientos de soldadura y habilidad de soldadores y operadores, así como para el control de calidad de las juntas soldadas y de los metales base.

La responsabilidad principal que el inspector de soldadura tiene con respecto de pruebas destructivas consiste en confirmar que son conducidas adecuadamente, y que los resultados satisfacen los criterios de aceptación especificados. A fin de cumplir con esta responsabilidad, el inspector necesita estar completamente familiarizado con los propósitos, alcances, aplicaciones y limitaciones de las pruebas especificadas, así como con los procedimientos para llevarlas a cabo; también debe saber interpretar los resultados y como relacionarlos con las propiedades de las juntas soldadas de los bienes que inspecciona.

Las pruebas con mas frecuencias se emplean en las aplicaciones en que se ve involucrado el inspector son tratadas en las normas ANSI/AWS B4.0, *“Métodos Estándar para Pruebas Mecánicas de Soldaduras”* y ASTM A370, *“Métodos Estándar y Definiciones para Pruebas Mecánicas de Productos de Acero”*.

Existen muchas otras normas acerca de las pruebas destructivas (o sobre aspectos particulares de éstas) que se aplican a los materiales y productos asociados con la producción de bienes soldados, pero las normas citadas cubren la mayor parte de las necesidades del inspector de soldadura. El volumen 03.01, *“Metales – Pruebas Mecánicas; Pruebas a Temperaturas Elevadas y Bajas; Metalografía”*, de la sección 3 de ASTM contiene una colección de la

normas sobre pruebas que eventualmente el inspector puede tener la necesidad de consultar, entre ellas puede citarse ASTM E 6, "Terminología Estándar Relacionada con los Métodos de Pruebas Mecánicas".

El alcance con que el inspector de soldadura debe estar familiarizado con las pruebas destructivas debe cubrir, además de los aspectos ya mencionados, habilidades para verificar los cálculos involucrados en cada prueba, el manejo y conversión de las unidades de medición de las diferentes propiedades evaluadas y la interpretación adecuada de los resultados, así como las implicaciones de los mismos. Debido a la gran cantidad de pruebas y a la amplitud y profundidad del tema, no resulta posible en este texto cubrir todas las necesidades del inspector, por lo que solo se tratan los aspectos básicos de estas pruebas y se hace referencia a las normas que tratan sobre su ejecución y sobre los criterios de aceptación especificados para los especímenes ensayados.

Por otra parte, se hace énfasis en el hecho de que el inspector de soldadura debe consultar otras fuentes a fin de que pueda complementar sus conocimientos y habilidades sobre esta materia, para la que afortunadamente, existe una bibliografía abundante en español.

Pruebas destructivas aplicables a las soldaduras

Los ensayos, pruebas o exámenes destructivos pueden definirse como aquellos en los cuales se destruye o inutiliza el espécimen probado.

Las pruebas destructivas a que se someten las juntas y productos soldados se pueden clasificar en mecánicas, químicas y metalográficas, y cada una de estas clasificaciones incluye un número relativamente grande de pruebas particulares para satisfacer los requisitos especificados.

Pruebas mecánicas

Estas pueden definirse como aquellas que se emplean para determinar propiedades mecánicas, tales como la resistencia, la tenacidad y la ductibilidad. Por su parte, las propiedades mecánicas de un material son aquellas que están relacionadas con sus reacciones elásticas o inelásticas (plásticas) cuando se le aplica una fuerza, o aquellas que involucran la relación entre esfuerzo y deformación. Las pruebas mecánicas involucran la deformación plástica o permanente del espécimen probado e indican si este es apropiado para un servicio mecánico determinado.

Existen pruebas mecánicas estáticas y dinámicas, y la mayor parte de estas se realizan a temperaturas ambiente, pero hay otras que deben conducirse a temperaturas muy altas o muy bajas.

Las pruebas mecánicas que se realizan con más frecuencia son las siguientes:

- Tensión
- Doblado
- Dureza
- Impacto

-Fatiga

-Termofluencia (creep)

Antes de considerar algunos aspectos básicos, de las pruebas mecánicas, es conveniente tener presente el significado de los términos que a continuación se definen:

- Deformación (strain) - Medida del cambio en la forma o tamaño de un cuerpo, referido a su forma o tamaño original.
- Ductibilidad (ductility) –la habilidad un material para deformarse plásticamente antes de fracturar. Por lo general se la evalúa por la elongación o la reducción de área en una prueba de tensión, o por el radio del ángulo de doblez en una prueba de doblado.
- Elasticidad -es la propiedad de un material en virtud de la cual, después de deformarse bajo la aplicación de una fuerza (carga), tiende a recuperar en su tamaño y forma originales cuando deja de aplicarse la fuerza.
- Esfuerzo (stress) –Intensidad de la fuerza por unidad de área, a menudo pensada como la fuerza que actúa en una pequeña área dentro de un plano. Puede dividirse en componentes, normal y paralela al plano, llamadas al esfuerzo normal y esfuerzo constante, respectivamente. Los esfuerzos son expresados en términos de fuerza de unidad de área, tales como libras fuerza por pulgada cuadrada, o en mega pascales.
- Limite elástico – el esfuerzo más grande que un material es capaz de soportar sin ninguna deformación permanente residual después de que se deja de aplicar el esfuerzo.
- Plasticidad- Capacidad de un metal para deformarse no elásticamente (permanentemente) sin sufrir rotura.
- Tenacidad (toughness) – Capacidad de un metal de absorber energía y deformar plásticamente antes de fracturarse. También se le define como la habilidad de un metal para resistir a la fractura en presencia de una ranura o en talla, y para absorber las cargas deformándose plásticamente. Por lo general se evalúa al medir la energía absorbida por un espécimen muescado durante un ensayo de impacto, por el área bajo la curva esfuerzo-deformación de la prueba de resistencia a la tensión también se usa como un gran medida de tenacidad.

Pruebas de tensión

Las pruebas de tensión se emplean para determinar la resistencia de los materiales bajo esfuerzos de tracción (aquellos que son normales –perpendiculares- al plano sobre el actúan y son producidos por fuerzas cuyas direcciones se apartan de tal plano); también sirve para evaluar la ductibilidad de los materiales.

Durante las pruebas de tensión se determinan las siguientes propiedades:

- Resistencia a la tensión (tensile strength), que es el esfuerzo de tracción máximo de un material es capaz de soportar, también se le llama resistencia última. Se calcula dividiendo la carga máxima (la de rotura) durante la prueba entre el área de la sección transversal original del espécimen.
- Resistencia de fluencia o cadencia (yield strength), es el esfuerzo (de ingeniería) al cual, de manera convencional se considera que comienza la elongación plástica del material.

- Elongación, es el incremento medido en la longitud calibrada del espécimen ensayado, por lo general se expresa como un porcentaje de la longitud calibrada original.
- Reducción de área, es la diferencia entre las áreas de las secciones transversales del espécimen, la original y la mas pequeña después de realizado el ensayo. Se expresa como un porcentaje del área de la sección transversal original.

Las dos últimas propiedades citadas son una medida de la ductibilidad del material. La siguiente figura ilustra una curva típica de esfuerzo –deformación obtenida en un ensayo de tensión.

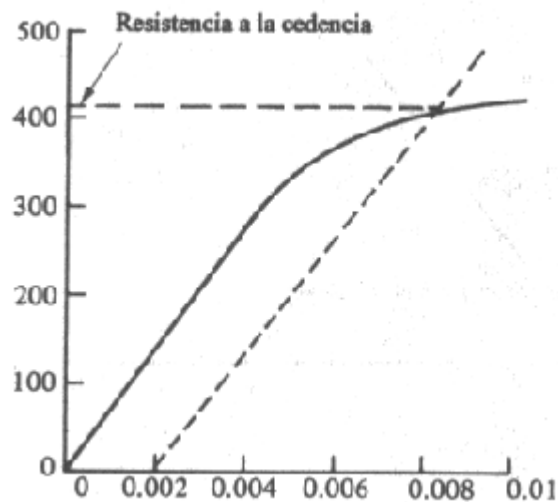


Figura 9.1 - Diagrama esfuerzo – deformación para determinar la resistencia de fluencia por el método convencional

Una gran parte del diseño de los productos (incluyendo las partes y equipos soldados) está basado en las propiedades de tensión de los materiales empleados, por lo que la realización de las pruebas para determinarlas es de importancia vital. En el campo de las construcciones soldadas, las pruebas de tensión se emplean para ensayar metales base, metal de soldaduras y juntas soldadas, las cuales incluyen regiones de metal base, metal depositado de soldadura y zonas térmicamente afectadas. Las pruebas de tensión de los especímenes obtenidos de cupones de calificación de procedimientos de soldadura sirven para demostrar que las juntas soldadas que se pueden obtener con el procedimiento (calificado) tienen las propiedades de tensión iguales o superiores a los metales base soldados.

Otras pruebas de tensión que se emplean con frecuencia son: tensión a corte para determinar la resistencia al corte de las soldaduras de filete y en juntas obtenidas por medio de la soldadura fuerte, y pruebas de tensión a corte para soldaduras por puntos.

Los criterios de aceptación para los resultados de las pruebas de tensión que se requieren para los metales base están contenidos en las especificaciones aplicables (ASTM o API, por ejemplo), mientras que los criterios relacionados con aspectos como la resistencia que deben tener las juntas de cupones de prueba para calificar procedimientos de soldaduras están establecidos en las normas correspondientes. Así, el código AWS D1.1 para soldadura estructural de acero, en la sección 4, "calificación", especifica las dimensiones de los especímenes y los criterios de aceptación, estos

últimos en el párrafo No. 4.8.3.5. Por su parte, el código ASME para calderas y recipientes a presión, establece las provisiones correspondientes en su sección IX, “norma para la calificación de procedimientos de soldadura y soldadura fuerte, soldadores y operadores”. El Artículo I contiene los criterios de aceptación (véase en el párrafo QW-163).

Nota: los métodos de prueba a emplear son los cubiertos en las normas ASTM A370 y AWS B 4.0 antes mencionadas.

Pruebas de doblado (bend testing)

Las pruebas de doblado se emplean para evaluar La ductibilidad y sanidad (ausencia de efectos) de las juntas soldadas, y la ductibilidad por lo general se juzga verificando si el espécimen se fracturó o no bajo condiciones especificadas de prueba.

Estas pruebas consisten en doblar o plegar un espécimen bajo cargas aplicadas gradual y uniformemente, aunque a veces también se aplican mediante impactos. Hay cuatro tipos de pruebas de doblado: libre, guiado, semiguaido y “doble alrededor de” (wrap-around bend test).

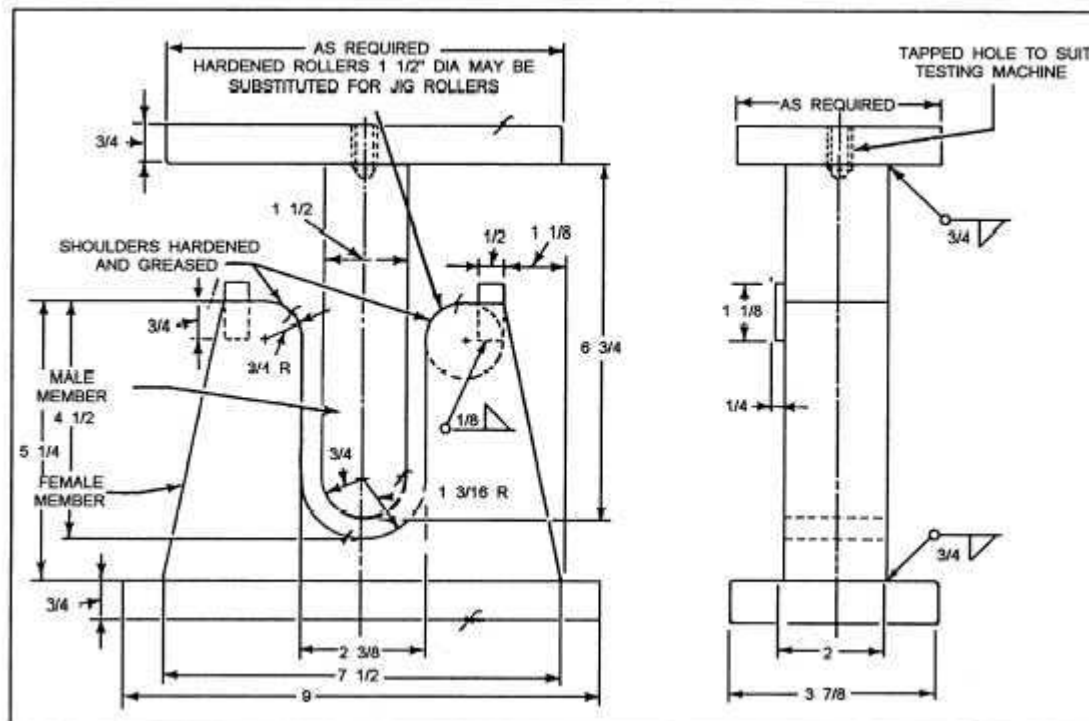


Figura 9.2 –Dispositivo de prueba de doblado guiado y un espécimen

de doblado de cara con la soldadura transversal

Las pruebas de doblado guiado se usan como parte del proceso de calificación de procedimientos de soldadura y habilidad de soldadores y operadores de equipo para soldar. Los especímenes de doblado guiado pueden ser longitudinales o transversales al eje de la soldadura, y estos últimos, dependiendo de la superficie que se somete a la

tensión durante la prueba, puede ser de doblado de cara, raíz o lateral. La siguiente figura ilustra un dispositivo para realizar este tipo de pruebas.

Los resultados de las pruebas de doblado que se practican a los especímenes tomados de los cupones de pruebas de calificación de procedimientos y de habilidad del personal de soldadura indican, respectivamente, lo siguiente: si el procedimiento de soldadura propuesto (en el proceso de calificación) es capaz de producir juntas soldadas con los niveles de ductibilidad mínimos especificados por las normas aplicables, y que los soldadores o los operadores de equipos de soldar son capaces de depositar metal de soldadura sin defectos y con el nivel de ductibilidad requerido.

Los requisitos y criterios de aceptación para pruebas de doblado varían un tanto entre una norma y otra, y el inspector debe asegurar que estas pruebas y sus resultados son conducidas de acuerdo con el documento aplicable, y que cumplen con los estándares especificados.

Los criterios de aceptación están establecidos en términos de la ausencias de discontinuidades (con alguna tolerancia) superficiales en la parte convexa de los especímenes que se doblaron durante la prueba con un radio de curvatura dado (dimensión B de la figura 9.2), para cada tipo de material y para cada tipo de espesor nominal de espécimen o probeta. La dimensión del radio de doblez especificado varía entre una norma y otra en relación con el tipo de material a ensayar. A continuación se refieren las partes de algunas normas donde se establecen los radios de doblez:

- Código AWS D1.1: Figuras 4.15, 4.16, y 4.14.
- Sección IX del Código ASME: Figuras QW-466.1, QW-466.2 y QW-466.3.
- Norma API 1104, "Soldadura de Líneas de Tubería e Instalaciones Relacionadas" Figura 9.
- Especialización API 5L para Tubería de Línea: Apéndice G (normativo).

Pruebas de dureza

La dureza es la resistencia que ofrece un material a la deformación permanente, a la depresión (indentation) o al rayado; puede considerarse como la resistencia que ofrece un metal a ser penetrado.

Las pruebas de dureza se emplean en la evaluación de metales base, metal de soldadura depositado y zonas afectadas térmicamente. Las mediciones de dureza pueden proporcionar información acerca de los cambios metalúrgicos causados por las operaciones de soldadura. En los aceros simples al carbono y en los de baja aleación, una dureza alta por lo general indica la presencia de martensita en la zona afectada térmicamente, mientras que valores bajos de dureza pueden indicar condiciones de soldadura en las cuales el material se reblandeció debido a efectos similares a los producidos por el tratamiento térmico de revenido, o aún el de recocido.

Los métodos de prueba de dureza que se emplean en los metales son los siguientes:

- Brinell
- Vickers
- Knoop
- Rockwell (varias escalas)
-

Los métodos de prueba de dureza a emplear en una aplicación específica dependen de factores como la dureza o resistencia del metal, el tipo de metal o aleación y su espesor y la información requerida. Hay métodos de prueba y escalas de dureza apropiadas para cubrir diferentes necesidades. También hay pruebas

de microdureza Vickers y Knoop adecuadas para medir la dureza de las juntas soldadas en sus diferentes regiones (metal base, metal de soldadura depositado y zonas térmicamente afectadas).

Algunas normas, para situaciones especiales o particulares, especifican ciertos requisitos de dureza, pero para algunas aplicaciones, por ejemplo en aquellas en las que los equipos soldados van a estar sometidos a condiciones corrosivas, los requisitos de dureza pueden ser muy rigurosos.

Prueba de impacto

Los metales se comportan de manera dúctil o de manera frágil, esto es experimentan deformaciones plásticas relativamente elevadas antes de fracturar, o fracturan con muy poca o ninguna deformación plástica. Algunos aceros que durante las pruebas de tensión o de doblado han mostrado comportamiento dúctil, pueden no comportarse de una misma manera cuando se les somete a otros tipos de prueba mecánica, o bajo condiciones de servicio. De hecho, se han registrado muchos casos en los cuales, metales considerados dúctiles (a juzgar por los resultados de las pruebas de tensión y de doblado), han fracturado de manera frágil (con muy poca o ninguna deformación plástica y requiriendo muy poca energía), por lo que tenacidad y ductibilidad se consideran propiedades distintas (consúltense las definiciones incluidas en la sección “Pruebas mecánicas” de este capítulo).

Adicionalmente, algunos metales, en un cambio de comportamiento (de dúctil a frágil) en el modo de falla al descender la temperatura, al tener muescas o ranuras o por la forma de la aplicación de las cargas. Las pruebas apropiadas para evaluar este tipo de propiedades y comportamiento son las pruebas de tenacidad.

Tenacidad con respecto a la fractura (fracture toughness) es un término genérico empleado para referirse a la resistencia de los metales en relación con la extensión de las grietas. La propagación de las grietas requiere de una fuente de energía, misma que, en las estructuras en servicio, procede de la energía de deformación elástica almacenada, y en los ensayos de tenacidad en fractura, es producida en la máquina de prueba.

Los métodos comunes de prueba para medir esta tenacidad en las juntas soldadas son: impacto charpa en la probeta con ranura en “V”, desgarre dinámico, la tenacidad de la fractura en plano de deformación (plane strain fracture toughness) y caída de peso (drop weight).

La prueba de tenacidad más empleada es el impacto Charpy en probeta con ranura “V”; su utilidad radica en que puede reproducir el cambio de comportamiento dúctil a frágil de los aceros en casi el mismo intervalo de temperaturas que las observadas en las condiciones reales de servicio de estructuras o componentes, cosa que no sucede en los ensayos de tensión ordinarios, en los que la transición dúctil-frágil ocurre a temperaturas mucho más bajas. Sin embargo es necesario tener en cuenta que los resultados de esta prueba no pueden ser usados directamente para valorar el comportamiento de una estructura o equipo.

El procedimiento de prueba, los detalles sobre las dimensiones de los especímenes y otros aspectos clave pueden consultarse en las normas ASTM A370 y AWS B4.0 citadas con anterioridad. Los resultados generalmente se reportan en términos de energía absorbida por los especímenes (en libras-pie o en Joules), aunque también desuelen reportar como el porcentaje de fractura frágil y la expansión lateral. Para metales como los aceros al carbono y de baja aleación, que exhiben un cambio en el modo de falla al descender la temperatura, es común conducir la prueba a varias temperaturas, y determinar la temperatura de transición, la cual se define de varias maneras, dos de las cuales son: “la temperatura más baja a la cual la fractura del espécimen exhibe una estructura fibrosa”, y “la

temperatura correspondiente al vapor de energía igual al 50% de la diferencia entre los vapores obtenidos a 100 por ciento y 0 por ciento de fractura de apariencia fibrosa”. La siguiente figura muestra una curva típica de temperatura de transición.

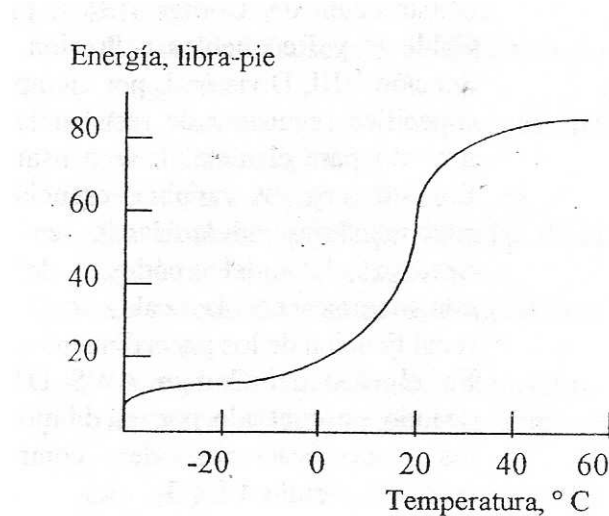


Figura 9.3 - Curva típica de temperatura de transición para una placa de acero al carbono

Esta prueba por lo general se usa para especificar los criterios mínimos de aceptación con que deben cumplir los metales base y de aporte. Es común que los criterios de aceptación estén fijados en términos de los valores mínimos de absorción de energía que deben satisfacer los metales a una temperatura particular.

En ciertas situaciones, algunas normas de construcción requieren que los procedimientos de soldadura también se califiquen con pruebas de impacto charpy en especímenes tomados del metal de soldadura y de la zona térmicamente afectada; igualmente, hay requisitos de norma para la realización de pruebas de impacto de soldaduras de producción. En tales casos, la norma en cuestión especifica las condiciones en las que estas pruebas son un requisito a cumplir y los criterios de aceptación.

Dos situaciones en las que es un requisito incluir pruebas de impacto Charpy en la clasificación de procedimientos de soldadura son:

- Cuando una sección de diseño y construcción del Código ASME para calderas y recipientes a presión (la sección VIII, División I, por ejemplo) especifica requisitos de resistencia al impacto para el metal base a usarse. En este caso, las variables esenciales suplementarias identificadas en la sección IX del código deben considerarse en la calificación o recalificación de los procedimientos.
- En el caso del código AWS D1.1, cuando es requerido por los dibujos o las especificaciones del contrato (véase el párrafo 4.1.1.3.).

Pruebas Químicas

Las pruebas químicas se emplean con dos propósitos principales: determinar la composición química de metales base y metales de soldadura depositados y para evaluar la resistencia a la corrosión de las juntas soldadas.

La composición de los metales base y los electrodos y metales de aporte, o el metal de soldadura depositado por estos últimos (durante pruebas estandarizadas) es determinada por los fabricantes de dichos productos, y es un requisito que estos proporcionen los reportes o certificados de composición química correspondientes que demuestren que tales productos cumplen con los requisitos especificados por las normas aplicables, cumplimiento que debe ser verificado por el inspector de soldadura.

En las situaciones en las cuales es necesario determinar la composición del metal de soldadura depositado durante la aplicación de soldaduras de producción o construcción, tal tarea debe ser llevada a cabo por el contratista o fabricante de los productos soldados, y el inspector debe asegurarse que tal composición es la especificada o la apropiada.

Existe una gran cantidad de métodos y técnicas sobre el análisis químico y la obtención de las muestras representativas que han de someterse a análisis. Las normas para realizar estas actividades están referidas en las especificaciones de cada material, y los volúmenes N° 03.05 y 03.06 de la sección 3 de ASTM contienen una colección completa de estos.

En cuanto a las pruebas de corrosión de juntas soldadas, pueden decirse que estas son necesarias debido a que muchos equipos y componentes (fabricados por medio de operaciones de soldadura) destinados a las industrias químicas y de refinación de petróleo, entre otras, operan en una gran variedad de ambientes, algunos de los cuales son corrosivos. Por otra parte, la resistencia a la corrosión de juntas soldadas puede diferir mucho de aquella de los metales base no soldados debido que en las primeras, las regiones del metal depositado y la zona afectada térmicamente tiene estructuras metalúrgicas y niveles de esfuerzos residuales diferentes a las del metal base, y el metal depositado también tiene una composición química diferente.

La corrosión, definida como el deterioro de un metal debido a la reacción química o electroquímica con su ambiente, puede atacar de manera uniforme a la junta soldada, o atacar de manera preferencial el metal base, el de soldadura o la zona afectada térmicamente, y pueden ocurrir varios tipos o mecanismos de corrosión; picadura o corrosión diseminada (pitting), corrosión en línea (line corrosion), corrosión generalizada (general corrosion), "ranuramiento" (grooving), corrosión galvánica (galvanic corrosion) ataque de hidrogeno (hydrogen attack), fragilización causada por hidrógeno (hydrogen embrittlement) y agrietamiento por corrosión bajo esfuerzo (stress corrosion cracking).

Las normas sobre las pruebas de corrosión mas empleadas se pueden consultar en el *volumen 03.02, "Desgaste y Erosión; corrosión de metales"* de la sección 3 de ASTM, aunque para aplicaciones particulares relacionadas con juntas soldadas, existen normas específicas que tratan sobre pruebas y métodos de control de corrosión, algunas de estas se citan a continuación:

- Norma NACE TM0284, "evaluación de la resistencia al agrietamiento inducido por hidrogeno (HIC) en aceros para Líneas de Tubería y Recipientes a Presión.

- Norma NACE TM177, "Pruebas de Laboratorio para la Resistencia al Agrietamiento Ambiental en Ambientes de H_2S ".
- Práctica Recomendada Estándar NACE RP0472 "Métodos de Control para Prevenir Agrietamiento Ambiental en Servicio de Ensamblajes Soldados de Acero al Carbono en Ambientes Corrosivos en la Refinación de Petróleo".
- Norma NACE MR0175, "Materiales Metálicos Resistentes al Agrietamiento de Sulfuro bajo Esfuerzo, para Equipo Petrolero".

Nota: Las normas NACE son publicadas por Asociación Nacional de Ingenieros en Corrosión (National Association of Corrosion Engineers) de los Estados Unidos de América (USA).

Pruebas metalográficas

Las pruebas metalográficas consisten en la obtención, preparación (mediante corte, desbaste y pulido y ataque químico o electroquímico) y evaluación de muestras metálicas representativas en la estructura metalúrgica que se desea examinar. El examen puede hacerse a simple vista, a pocos aumentos, por medio de microscopios óptico o electrónico y por difracción de rayos-X.

En la evaluación de las juntas soldadas, los exámenes metalográficos se usan para determinar uno o más de los siguientes aspectos:

- la sanidad (ausencia de defectos) de las juntas
- la distribución de inclusiones no metálicas en la junta
- el numero de pasos de soldadura
- la localización y la profundidad de la penetración de la soldadura
- la extensión de la zona térmicamente afectada
- la estructura metalúrgica del metal de soldadura y la zona afectada térmicamente.

La mayor parte de las pruebas metalográficas que se emplean para evaluar juntas soldadas se efectúan a escala macroscópica (a simple vista o a pocos aumentos), y permiten revelar aspectos tales como la estructura y configuración generales de los cordones de soldadura y su penetración, así como la presencia de poros, grietas e inclusiones. Dos aplicaciones típicas de estas pruebas son las siguientes:

- calificación de procedimientos de soldadura de filete y de habilidad de soldadores que van a depositar solamente soldaduras de filete (véase tabla 4.4 y 4.9, y párrafos 4.8.4, 4.8.4.1 y 4.30.2 del código AWS D1.1; y tablas QW-451.3 y QW-452.5, y párrafos QW-183 y QW-184 de la sección IX del código ASME).
- Calificación de procedimientos de soldadura de ranura de penetración parcial en la junta (véase la tabla 4.3 del código AWS D1.1).

Por lo general es necesario hacer un ataque químico (macro-ataque) a los especímenes a examinar. Los procedimientos y reactivos que se emplean con mayor frecuencia para este propósito pueden consultarse en:

- *Párrafo QW-470, "Reactivos y Procedimientos de Ataque", de la sección IX del Código ASME.*
- *Apéndice F, "Procedimiento de Macroataque", de la norma ANSI/AWS B2.1, "Especificación para la Calificación de Procedimientos y Habilidad de Soldadura".*

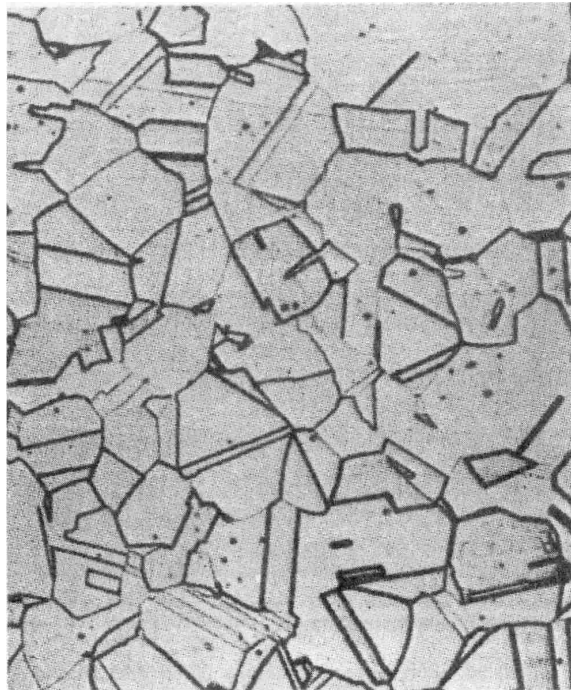


Imagen Metalográfica con Microscopio Óptico

Adicionalmente, los métodos y los procedimientos para la realización de exámenes metalográficos macroscópicos y microscópicos que eventualmente el inspector de soldadura puede tener la necesidad de consultar, están cubiertos en el volumen 03.01 de la sección 3 de ASTM antes citado.

Otras pruebas

Se ha desarrollado y estandarizado una variedad de pruebas destructivas para cubrir propósitos específicos de evaluación de juntas soldadas, mismos que por las limitaciones inherentes a un texto de esta naturaleza, no pueden ser tratados, ni aun de manera superficial.

Entre otras pruebas que se emplean con cierta frecuencia, pueden mencionarse las siguientes:

- Pruebas de rotura en probeta ranurada (nick-break), las cuales se emplean como medio de control y como parte de los procesos de calificación de procedimientos y personal de soldadura cubiertos por la norma API 1104.
- Pruebas de soldabilidad y sensibilidad de agrietamiento en caliente.

La discusión de las pruebas incluidas en este capítulo, en términos de profundidad y alcance, no es, ni con mucho, suficiente para cubrir los aspectos fundamentales de éstas, pero se estima que los aspectos tratados y las referencias

generales y particulares que hacen las normas sobre métodos de prueba y criterios de aceptación, podrán ser de utilidad durante el entrenamiento y funciones del inspector de soldadura.

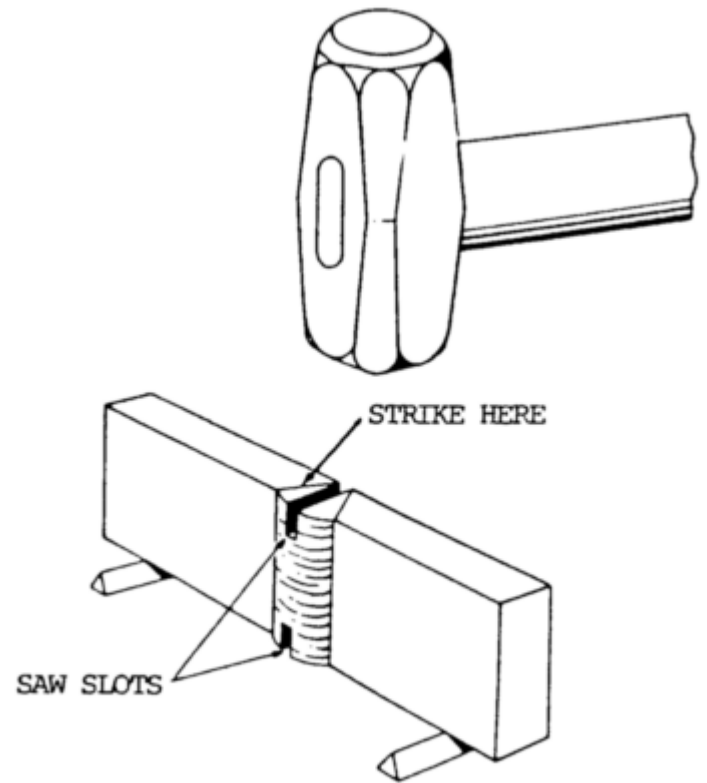
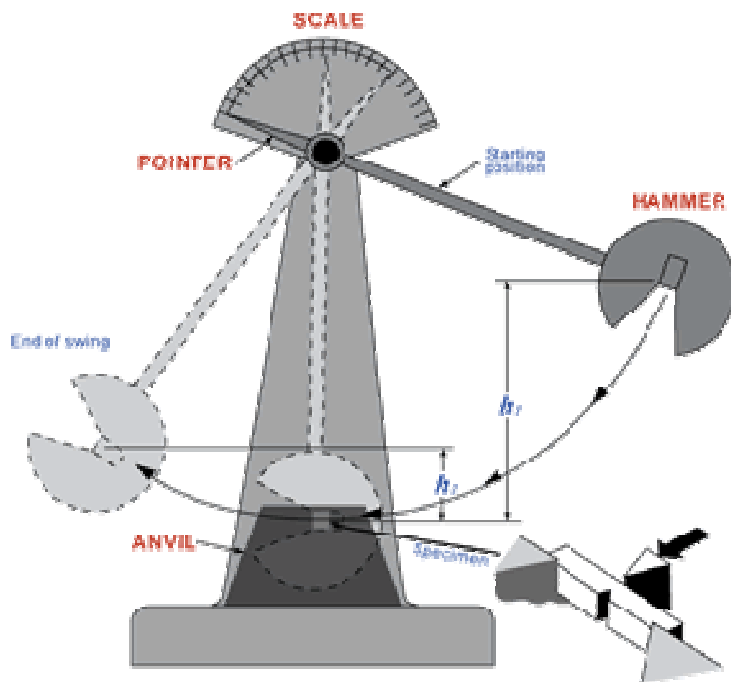


Figure 13-5. Nick break test.



Ejemplo Probeta ensayo Charpy-V

Capítulo 10

ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS

NDT - END

Contenidos:

DESCRIPCIÓN

PÁGINA

Introducción
Ensayos No Destructivos
Inspección Visual (VT)
Líquidos Penetrantes (PT)
Partículas Magnéticas (MT)
Radiografía (RT)
Ultrasonido (UT)
Requisitos de calificación para el personal de NDT – END
Requisitos para la conducción de NDT – NDT
Comentarios finales

Introducción

Las normas sobre bienes soldados regulan todas o algunas de las actividades y funciones relacionadas con la producción, operación, mantenimiento y reparación de tales bienes. Entre estas funciones y actividades están incluidas las siguientes: diseño, control de materiales, fabricación, construcción, montaje, calificación de procedimientos y personal de soldadura, calificación y certificación de inspectores, inspección y pruebas y control de reportes y registros.

La participación y la responsabilidad del inspector de soldadura en cada una de las actividades mencionadas tiene, independientemente de las partes que contratan los servicios de inspección y de las situaciones contractuales, alcances y limitaciones bien definidas: Mientras que hay funciones, como el diseño, en las que el inspector prácticamente no tiene responsabilidad alguna, existen varias en las que debe participar de manera parcial o limitada, y existen otras en las que el inspector de soldadura es quien tiene la responsabilidad principal o completa.

Las funciones y propósitos de los inspectores y del personal de control y aseguramiento de calidad están definidas en las normas correspondientes a cada aplicación así como en las políticas y procedimientos internos de cada organización. Por otra parte, las normas AWS sobre la certificación de inspectores de soldadura establecen con claridad cuales son sus responsabilidades y deberes, mismos que están tratados con cierta amplitud en el capítulo 1 de este texto. En este punto, resulta oportuno recordar que la norma ANSI/AWS QC1, en su prólogo declara que “el propósito de la inspección de soldadura es determinar si los ensambles soldados cumplen los criterios de aceptación de un código, norma u otro documento específico”.

En relación con los exámenes no destructivos, esta misma norma establece, en su párrafo 4.2.7.2,

Que el inspector de soldadura “verifica que el examen visual y otros exámenes no destructivos requeridos han sido realizados por personal calificado de la manera especificada...”, y en su párrafo 4.2.7.3, indica que el inspector de soldadura “realiza los exámenes no destructivos adicionales que sean requeridos, siempre y cuando sus calificaciones cumplan con los requisitos especificados”.

La participación del inspector de soldaduras en materias relacionadas con los exámenes no destructivos, en la práctica, puede estar limitada por una serie de factores que dificultan o impiden que intervenga de manera directa en la ejecución de una o más de las pruebas especificadas. Entre estos factores se pueden citar los siguientes:

- Los exámenes no destructivos son actividades especializadas que, a fin de que resulten efectivas, deben ser realizadas por personal debidamente entrenado, calificado y certificado en la técnica o método no destructivo particular de que se trate y al nivel de calificación requerido.
- Las normas sobre cada aplicación o producto especifican, o bien, hacen referencia a una serie de requisitos relacionados con el entrenamiento, calificación y certificación con que debe cumplir el personal destinado a llevar a cabo las diferentes actividades relacionadas con los exámenes no destructivos especificados.
- Cada uno de los tres niveles de calificación de todas las técnicas no destructivas existentes involucra periodos más o menos extensos de entrenamiento y experiencia, por lo que no es común la disponibilidad de

inspectores de soldaduras que también estén certificados para realizar uno o más de los exámenes no destructivos que comúnmente se especifican.

- El inspector de soldadura, como tal, solo está calificado para realizar la inspección visual de los ensambles soldados, y aun en el caso de que estuviera calificado para realizar otro tipo de prueba no destructiva, la ejecución de tales pruebas consumiría parte del tiempo vital necesario para realizar de manera efectiva su función global de inspección.

Debido a lo anterior y también a causa de que los cursos de entrenamiento para cada nivel y técnico no destructiva son extensos, no es posible cubrir las materias correspondientes en un texto como el presente, por lo que este capítulo se limitará a considerar los aspectos fundamentales de las técnicas más comúnmente empleadas y sus alcances y limitaciones, asuntos que si está obligado a conocer el inspector de soldadura, que en todo caso debe determinar si los ensambles soldados involucrados en sus asignaciones de trabajo cumplen o no los requisitos especificados, incluidos los relativos a los exámenes no destructivos.

Ensayos no destructivos

Los exámenes no destructivos –END- son definidos, por la norma ANSI/AWS A3.0, como el acto de determinar la adecuación de algún componente o material para su propósito previsto, empleando técnicas que no afectan su utilidad.

Estos exámenes también son conocidos con otros nombres, tales como pruebas o ensayos no destructivos o inspección y evaluación no destructiva. El documento AWS referido considera que los dos últimos citados no son términos estándar, pero en algunas normas los términos anteriores se emplean de manera específica; por ejemplo, en el contexto del código ASME para calderas y recipientes a presión, se estipula que las actividades de control de calidad, incluidas las pruebas no destructivas, deben referirse como exámenes si estas son realizadas por parte del fabricante contratista que produce los bienes, y que el término inspección queda reservado para las actividades que realiza el inspector Autorizado ASME.

Los END, como su nombre lo indica, no utilizan las piezas sometidas a ensayos ni afectan de manera permanente sus propiedades; si finalidad es evaluar la sanidad de las piezas inspeccionadas, esto es, su homogeneidad y continuidad, y de esta manera, contribuyen al cumplimiento de los requisitos de calidad y por lo tanto, al aseguramiento de la integridad y con fiabilidad de las partes examinadas.

Al fin de asegurar la correcta aplicación de los END, es necesario tomar en cuenta ciertos factores que tienen influencia sobre su efectividad. Algunos de estos factores se mencionan a continuación:

- Los diferentes métodos de END no son de aplicación general sino más bien específica, y no existe ningún método en particular que pueda cubrir los objetivos de la aplicación de los END para todas las situaciones o casos. Por lo general cada método se complementa con otro u otros y aun con pruebas destructivas.
- Cada método tiene un ámbito específico de aplicación determinando por el tipo de información que se desea obtener de la pieza a examinar, sus condiciones superficiales, el tipo de material, el método de fabricación, su configuración geométrica, sus requisitos de diseño y por aspectos económicos o por una combinación de dos o más de estos factores.

- Cada método no destructivo tiene sus ventajas y limitaciones, y su empleo debe estar asociado con los requisitos de las normas y los documentos contractuales aplicables, los cuales contienen los criterios de aceptación correspondientes.

Los métodos de examen no destructivo que se utilizan en la actualidad son los siguientes:

- Inspección visual (VT)
- Líquidos penetrantes (PT)
- Radiografía (RT)
- Ultrasonido (UT)
- Electromagnetismo (Corrientes parasitas o Corrientes de Eddy) (ET)
- Detección de fugas (LT)
- Radiografía neutrónica (NRT)
- Emisión acústica (AET)
- Análisis de vibraciones (VA)
- Pruebas térmicas e infrarrojas (TIR)
- Comprobación (Proof testing) (PRT)
- Métodos de prueba con Laser

Los primeros seis métodos de examen de la lista anterior son los mas ampliamente empleados, estando en primer lugar la inspección visual. Los “ensayos de comprobación” no son considerados en todas las situaciones y normas como técnicas no destructivas propiamente dichas; los propósitos de este tipo de ensayos son los de asegurar la operación segura de las partes probadas, detectar debilidades en su diseño, identificar cualquier deficiencia de calidad o evitar fallas durante servicio. Algunos métodos clasificativos dentro de esta categoría son: prueba de carga, algunos tipos de pruebas hidrostática o neumática y pruebas de giro o rotatorias.

Adicionalmente, algunas fuentes y autores clasifican a los END, de acuerdo con su aplicación, en técnicas o métodos de inspecciones superficiales, volumétricas o internas y de integridad o hermeticidad.

Las técnicas superficiales se usan para detectar y evaluar las discontinuidades que afloran a la superficie o aquellas clasificadas como sub superficiales, esto es, que están muy cerca de la superficie pero no afloran a esta. Una regla practica para diferenciar a las discontinuidades internas de las subsuperficiales es que las ultimas se encuentran a una distancia no mayor de 3.2 mm (1/8”) de la superficie. Dentro de esta categoría de métodos se encuentran los exámenes visuales, por líquidos penetrantes, electromagnético y por partículas magnéticas.

Las técnicas volumétricas se emplean para detectar discontinuidades internas que no afloran a la superficie o que no están cerca de esta. Los métodos incluidos dentro de esta clasificación son la radiografía, el ultrasonido, la emisión acústica y la radiografía neutrónica.

Los métodos de prueba de integridad o de hermeticidad se emplean para comprobar características tales como la capacidad de un componente para resistir cargas sin sufrir fallas o deformaciones permanentes, o bien la capacidad de un recipiente para contener un fluido, a presiones superiores, iguales o inferiores a la atmosférica, sin que existan pérdidas de presiones o volumen del fluido de prueba por periodos previamente establecidos. A esta categoría de técnicas no destructivas pertenecen las pruebas de detección de fugas, las cuales incluyen métodos como las pruebas por presión (hidrostática y neumática), por detector de halógeno, por espectrómetro de masas, medición de cambios de presión, o pruebas de burbujeo, de descarga de voltaje o por ultrasonido, entre otros.

Antes de considerar los aspectos más relevantes de algunas técnicas no destructivas, conviene hacer el recuento de algunos términos de uso común en este campo. En primer lugar, hay que tener presente los significados precisos de **discontinuidad y defecto**, que ya fueron establecidos en la introducción del Capítulo 6; otros términos de interés son los siguientes:

- *Caracterización*: Es el proceso de determinar el tamaño, orientación, forma y localización de una o más indicaciones; establecer la naturaleza de la discontinuidad que la causa.
- *Evaluación*: El hecho de determinar si una indicación relevante cumple o no el criterio de aceptación especificado. Consiste en comparar las dimensiones y características de la indicación contra los estándares aplicables; se lleva a cabo después de que la indicación ha sido interpretada.
- *Imperfección (flaw)*: Discontinuidad no intencional que puede detectarse por medio de algún método de examen no destructivo. La norma AWS A3.0 la define como una discontinuidad indeseable.
- *Indicación*: Es la respuesta, evidencia o información obtenida, sobre la superficie de la pieza examinada, en la pantalla de un instrumento electrónico o sobre una película radiográfica, que requieren de interpretación, a fin de determinar su significación. Una indicación es el resultado o evidencia de la aplicación de un examen no destructivo.
- *Indicación falsa*: Es la indicación de una discontinuidad inexistente. Este tipo de indicaciones son causadas por la aplicación incorrecta de la técnica de examen, por la configuración geométrica de la pieza examinada o por su acabado superficial, o por equipo de inspección en mal estado.
- *Indicación no relevante*: Se trata de la indicación de una discontinuidad que por su naturaleza, distribución o tamaño no tiene significación con respecto a los criterios de aceptación especificados.
- *Indicación redondeada*: Aquella cuya relación longitud / ancho es igual o menor de un valor de 3.
- *Indicación alargada o no redondeada*: Aquella indicación cuya relación longitud / ancho es mayor de un valor de 3.
- *Interpretación*: Consiste en determinar si la indicación detectada es falsa, relevante o no relevante; es la determinación de su origen o causa.

A continuación se describe de manera breve los principios de los métodos más comúnmente empleados y sus principales aplicaciones, ventajas y limitaciones. Adicionalmente, al fin de este capítulo se ofrecen tablas que resumen algunas aplicaciones y limitaciones de varios métodos de examen.

Inspección visual

La inspección o examen visual es el método no destructivo más ampliamente usado en la industria; aproximadamente un 80% de las discontinuidades, defectos y deficiencias identificadas por medio de exámenes no destructivos se detectan con esta técnica.

Las normas sobre la capacitación, calificación y certificación del personal de END por lo general se refieren a la inspección visual en un sentido amplio que involucran diferentes tipos de materiales y procesos de fabricación, y no solamente los relacionados con la soldadura y otros métodos de unión. En esta sección se describe esta técnica de examen en tal sentido, pero en el capítulo “Inspección de soldadura” se hace énfasis en la inspección visual desde el punto de vista del inspector de soldadura.

El examen o inspección visual se define como el método de prueba no destructiva que emplea la radiación electromagnética en las frecuencias visibles. Los cambios en las propiedades de la luz después de su contacto con el objeto inspeccionado pueden ser detectados por la visión humana o por medios mecanizados.

La inspección visual se emplea principalmente para dos propósitos:

- Examen de superficies accesibles o expuestas de objetivos opacos, lo que incluye la mayoría de materiales y de productos terminados y parcialmente ensamblados.
- Examen del interior de objetos transparentes, tales como el vidrio, el cuarzo y algunos plásticos, líquidos y gases.

Para muchos objetos a examinarse, la inspección visual puede emplearse para determinar aspectos como la cantidad y forma, el tamaño, el acabado superficial, la reflectividad, características de color, adecuación, características funcionales y la detección de discontinuidades e imperfecciones superficiales.

Desde el punto de vista práctico, la mayoría de los END involucran una o más de sus etapas a la inspección visual. Para corroborar esta afirmación, a manera de ejemplo, considérese la interpretación de una placa radiográfica o la evaluación de las indicaciones producidas por las partículas magnéticas que se acumulan sobre una grieta, o por el líquido penetrante extraído de una discontinuidad por el revelador.

Principios y descripción de la técnica

En términos, la inspección visual consiste en la observación cuidadosa de las partes sujetas a examen durante las diferentes etapas de sus procesos de su producción, desde la recepción de las materias primas hasta el producto terminado. La mayor parte de las veces, esta inspección se hace a simple vista, pero puede ser reforzada o hacerse posible mediante el uso de espejos, lupas, endoscopios y otros accesorios.

Para que el examen visual resulte efectivo, es necesario que el personal encargado en su ejecución posea ciertos conocimientos, habilidades y atributos, entre estos, estar familiarizado con los materiales y procesos de fabricación involucrados, con las características, discontinuidades o deficiencias posibles o típicas del producto bajo inspección y los criterios de aceptación aplicables o típicas del producto bajo inspección y los criterios de

aceptación aplicables; también debe tener conocimientos sobre las características y propiedades de la luz, la iluminación y la visión y los factores que afectan a esta última durante la inspección. Otros requisitos que deben cumplir los individuos que realizan los END se describen en la sección correspondiente a la calificación y certificación de personal.

Para identificar algunas de tales características y habilidades se ha acumulado el término “ojo entrenado”. A continuación se consideran algunos aspectos que ilustran el significado de tal término: Una persona con ojo entrenado es aquella que verdaderamente ha aprendido a observar y juzgar con detalles lo que examina, a tal punto que un inspector hábil en este sentido es capaz de detectar discontinuidades y deficiencias que pasan desapercibidas por otras personas, puede identificar las etapas de la fabricación o las partes del producto en las que hay mayor probabilidad de ocurrencia de defectos y toma las medidas necesarias para evitarlos o minimizarlos; o tiene la habilidad de detectar aspectos tales como el empleo de una técnica inadecuada por el soldador con solo examinar las soldaduras que deposita.

Aplicaciones

La inspección visual se emplea ampliamente en diversos campos y sectores de la industria: A manera de ejemplo pueden citarse las aplicaciones de este método en la siderurgia, en la industria eléctrica, automotriz, aeronáutica y las relacionadas con cerámicas, plásticos, materiales compuestos y componentes microelectrónicos. Se usa para examinar productos fabricados por procesos como laminación, fundición, soldadura, forja, maquinado, extrusión, embutido y otros más. Entre los productos sujetos a inspección visual están componentes estructurales, tanques, tubos y accesorios y sistemas de tubería, recipientes a presión, calderas, embarcaciones, bombas, válvulas, tornillos y otros productos roscados y partes y carrocerías de automóviles.

Además de emplearse durante la fabricación de productos nuevos, también se usa en la evaluación de equipos e instalaciones en servicio, para evaluar las condiciones en que se encuentran y determinar si pueden seguir operando de manera segura. En estas aplicaciones, los inspectores pueden detectar condiciones como agrietamiento, desgaste y corrosión, así como los probables mecanismos específicos y causas por los que se originaron tales condiciones.

En el campo de la inspección de soldadura, las discontinuidades típicas que se detectan con este método son: socavados, faltas de llenados, porosidad superficial, grietas abiertas a la superficie, traslapes, tamaños y gargantas de soldadura menor a los especificados, convexidades y alturas de refuerzo excesivo, distorsión y falta de alineación.

Es importante destacar que además de ser el método de examen no destructivo más barato, la inspección visual tiene la ventaja de poder ayudar a reducir grandemente los costos de fabricación: Una inspección visual adecuada antes y durante el depósito de metal de soldadura ayuda a evitar que se suelden juntas mal preparadas (apertura de raíz, Angulo de ranura o cara de raíz de tamaño menores o mayores a los especificados, por ejemplo), o permite detectar discontinuidades y defectos en un cordón de soldadura (y repararlos) antes de depositar el siguiente paso; en ambos casos, la inspección visual permite identificar y evitar condiciones que pueden causar defectos y problemas, o identificarlos en el momento en que ocurren y solucionarlos antes de que siga en curso el proceso de fabricación. De no efectuarse tal inspección visual, los problemas y los defectos potenciales ocurrirán y podrían no ser detectados si esta posteriormente, o bien, detectados si esta especificado algún otro

método de examen no destructivo (radiografía por ejemplo), y entonces proceder a realizar las reparaciones y reinspecciones necesarias, con los consecuentes incrementos de tiempo y costos de fabricación.

Esta posibilidad de poder eliminar muchas discontinuidades y problemas antes de terminar los trabajos es quizás la característica más importante de la inspección visual.

Una vez que se termina el trabajo de soldadura, tiene lugar la inspección de aceptación, que incluye la detección de discontinuidades y condiciones tales como la distorsión, la verificación de dimensiones y la conformidad con respecto a los planos, así como la apariencia de la soldadura (chisporroteo y rugosidad, por ejemplo). La minuciosidad de esta revisión se debe apoyar con otros métodos de END, según el juicio del inspector o las especificaciones fijadas.

Equipo

La mayor parte de las aplicaciones de inspección visual se hace a simple vista y por lo tanto no requiere de equipo alguno, aunque a veces se hace necesario o conveniente el empleo de espejos, lupas, endoscopios y métodos de registro fotográfico o en video.

Ventajas

Las principales ventajas de la inspección visual son las siguientes:

- La Inspección visual puede realizarse antes, durante y después de la fabricación.
- Mediante la inspección visual se detectan la mayor parte de las discontinuidades y generalmente se obtienen indiciones de otras posibles discontinuidades, que de existir, se detectarían más fácilmente con otros métodos.
- Con este método se pueden detectar y eliminar discontinuidades que de otra manera podrían convertirse en defectos una vez que se ha terminado de depositar la soldadura, y se pueden identificar y evitar condiciones que podrían convertirse en problemas críticos.
- El costo de la inspección visual es menor que el de cualquiera de los otros métodos de END.
- Posibilita la reducción de costos y tiempos de fabricación.

Limitaciones

Las mayores limitaciones de este método se enumeran a continuación:

- Los beneficios que se pueden obtener de la inspección visual dependen grandemente de la experiencia y los conocimientos sobre soldadura e inspección que posea el inspector.
- Para que la inspección visual resulte efectiva, el inspector debe estar completamente familiarizado con los materiales, productos, requisitos, normas, procesos y procedimientos de soldadura involucrados con cada asignación específica de trabajo.
- Este método esta limitado a la detección de discontinuidades que afloran a la superficie.

- Si la inspección visual se inicia demasiado tarde en los trabajos de producción y montaje (una vez que ya empezó la aplicación de soldadura, por ejemplo), no es posible llegar a determinar si los productos soldados realmente cumplen con todos los requisitos especificados, ya que el inspector de soldadura se llevaron a cabo de acuerdo con los procedimientos correctos y calificados y por soldadores u operadores calificados, ni si las propiedades de las juntas soldadas, aunque no presenten defectos, tienen las propiedades (resistencia a la tensión, al impacto o a la corrosión) requeridas, como tampoco si los metales base fueron los especificados y tampoco si los electrodos de bajo hidrogeno fueron manejados adecuadamente, de manera que no se presenten riesgos de agrietamientos durante servicio.

Líquidos penetrantes

El examen por líquidos penetrantes es uno de los más antiguos métodos empleados de ensayos no destructivos. Consiste en aplicar un líquido sobre la superficie a examinar, dejarlo a un tiempo sobre esta-tiempo de penetración- para permitir que se introduzca dentro de las posibles discontinuidades superficiales, eliminar de la superficie el exceso de líquido para luego extraerlo, por medio de un polvo absorbente, mismo que revelara la presencia de las discontinuidades, si las hay, sobre un fondo de contraste que intensifica la visibilidad de las indicaciones. La siguiente figura ilustra el modelo en que trabaja esta técnica

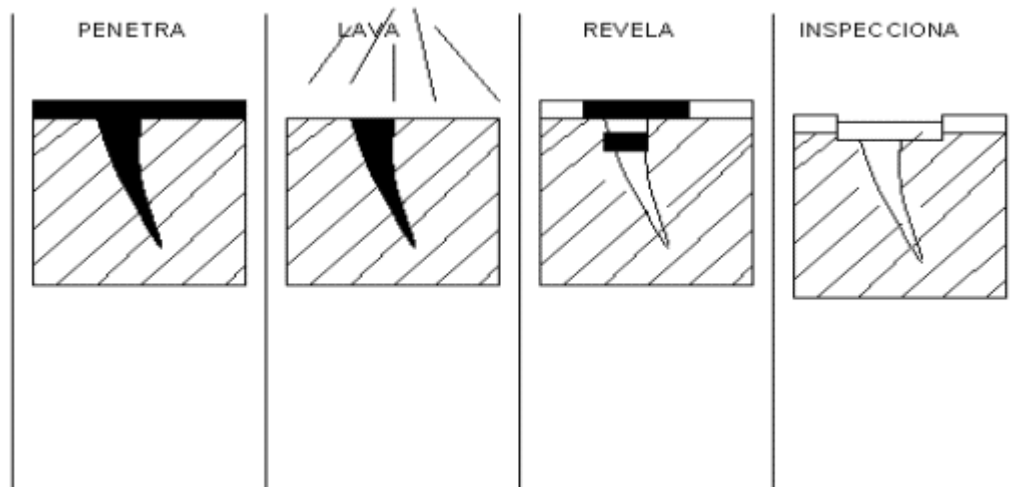


Figura 10.1-Examen por líquidos penetrantes

El examen por líquidos penetrantes permite la detección de discontinuidades en piezas de geometría complicada de una variedad de materiales metálicos (ferrosos y no ferrosos) y no metálicos, como plásticos, cerámicas, vidrios, etc., siempre y cuando no sean porosos; pueden usarse independientemente de las propiedades físicas de los materiales, siempre y cuando la superficie no sea absorbente o porosa y resulte compatible con el procedimiento, método y técnica específicos a emplear.

Existe el método de examen con penetrantes coloreados o de contraste por color (los cuales son visibles bajo luz blanca) y métodos de examen con penetrantes fluorescentes (visibles bajo luz ultravioleta); ambos métodos

pueden aplicarse con cada uno de los tres tipos de materiales penetrantes: los lavables con agua, los post-emulsificables y los removibles con solvente.

Cada método y tipo de examen se desarrollo para aplicaciones y niveles de sensibilidad específicos. Por ejemplo, si se necesita detectar discontinuidades muy finas (de un método medio milímetro o menos) lo recomendable es un liquido fluorescente pos-emulsificable y revelador seco, pero si son lo relativamente gruesas, lo mas conveniente es emplear un liquido visible, lavable con agua y un revelador en suspensión acuosa.

Antes de realizar un examen con este método, es necesario tener en cuenta los siguientes factores:

- Características de las discontinuidades a detectar y el nivel de sensibilidad requerido.
- Condición de la superficie a examinar.
- Los materiales a inspeccionar, ya que las propiedades de los aceros inoxidables austeníticos y las aleaciones de níquel y titanio pueden afectarse adversamente si son inspeccionados con materiales penetrantes con contenidos no controlados de azufre y compuestos de halógenos (flúor, cloro, yodo y bromo). Cuando se examinan estas aleaciones deben usarse penetrantes cuyos contenidos de tales contaminantes cumplan los requisitos especificados.

Principios y descripción de la técnica

Como su nombre lo indica, esta técnica esta basada en la propiedad que tiene algunos líquidos de penetrar (capilaridad) en discontinuidades superficiales como porosidad, grietas, traslapes, pliegues y costuras.

Las propiedades que tienen los líquidos penetrantes para servir de manera efectiva para el examen son, principalmente capilaridad, baja tensión superficial y baja viscosidad, cohesión, adherencia, poder humectante, densidad y actividad química adecuados.

La secuencia de la inspección de líquidos penetrantes, misma que varía un tanto dependiendo del método y tipo de examen a realizar, consta de las seis etapas o actividades básicas siguientes:

- limpieza previamente
- Aplicaciones del penetrantes
- Eliminación del exceso de penetrantes
- aplicación del revelador
- Interpretación y evaluación
- Limpieza final.

A continuación se describe de manera breve cada una de estas actividades.

Limpieza previa

La superficie de las partes a inspeccionar debe prepararse mediante una adecuada limpieza previa. Siempre debe tenerse en cuenta que cualquier contaminación o producto que impida la entrada del líquido penetrante a las discontinuidades impedirán su detección.

Se pueden emplear métodos de limpieza químicos, mecánicos y por solventes, y diferentes agentes limpiadores, por lo que para seleccionarlos hay que considerar factores como el acabado de la superficie a limpiar y los tipos de contaminación a remover, como pueden ser grasas, aceites, pinturas, herrumbre, escoria, escamas pesadas de óxido o arena de fundición. Además, los agentes limpiadores no deben ser tóxicos ni altamente inflamables y no deben atacar al material a limpiar; y cuando se trata de aceros de alta resistencia, se deben evitar limpiadores que provoquen la absorción de hidrógeno, hecho que podría provocar fallas por agrietamiento o fatiga.

Aplicación del penetrante

Esta puede realizarse por aspersión, inmersión o por brocha, cubriendo por completo la superficie a examinar; se debe depositar una película uniforme en la superficie a inspeccionar y se debe asegurar que antes de aplicar el líquido penetrante, las superficies estén por completo libres de agentes limpiador.

También debe asegurarse que el penetrante se introduzca a las posibles discontinuidades. Esto se logra mediante la selección adecuada del método y tipo de examen a emplear y de las propiedades particulares del líquido, así como del tiempo de penetración, que es una variable crítica. En cuanto al tipo de penetrante, este debe tener la capacidad de penetrar en discontinuidades muy finas y permanecer en las gruesas, y no debe evaporarse fácilmente. Con respecto al tiempo de penetración, las normas establecen los periodos mínimos recomendados y los fabricantes de los penetrantes también lo establecen, pero para una aplicación específica, este tiempo debe determinarse de manera experimental, y debe estar documentado en los procedimientos de examen correspondiente. Los tiempos de penetración típicos, dependiendo del material o parte a examinar, su condición superficial, el método de fabricación, la naturaleza de las discontinuidades a detectar y el método y tipo de examen, oscilan de 5 a 45 minutos.

Otra variable a tener en cuenta es la temperatura a la que se encuentran las piezas a examinar, mismas que, para las técnicas estándar, no debe ser menor de 16°C (60°F) ni mayor de 52°C (125°F).

Eliminación del exceso del penetrante

Después de transcurrido el tiempo de penetración, se debe eliminar o lavar el penetrante que haya quedado sobre la superficie y no se haya introducido en las discontinuidades.

Esta es quizás la etapa más crítica del examen, por lo que debe realizarse con los cuidados necesarios: Se debe evitar que el penetrante se seque sobre la superficie, ya que de ocurrir esto, se impediría que el penetrante emergiera de las discontinuidades al aplicar el revelador; también se debe impedir que el líquido penetrante sea removido de las discontinuidades.

La remoción de los penetrantes removibles con agua se realiza, como su nombre lo indica, por medio de lavado con agua (la temperatura no debe exceder los 45°C), por medio de gotas gruesas o una mezcla de agua y aire a presión, y en tal caso, la presión no debe ser mayor de 30 PSI. La remoción de los penetrantes post-emulsificables se realiza después de que se aplicó el post-emulsificante (que provoca que el penetrante se haga soluble en agua) y transcurrió el tiempo de emulsificación, y el lavado se lleva a cabo en forma similar al de los líquidos removibles con agua. Para las dos técnicas anteriores, las superficies pueden ser secadas con tela o trapo o con aire en circulación, siempre y cuando las superficies no se calienten a temperaturas mayores a 52°C. Los penetrantes removibles con solventes se retiran de la superficie con un material absorbente, tela o papel, primero seco y después ligeramente húmedo con removedor. En este caso se debe evitar aplicar el removedor directamente a la región a limpiar, ya que esto podría ocasionar que el penetrante fuera removido de las discontinuidades.

Aplicación del removedor

Tan pronto como sea posible después de la capa anterior, una vez secas las superficies, sobre estas se aplica una capa uniforme de revelador, que “absorbe” el líquido penetrante retenido en las discontinuidades y delinea su contorno.

El revelador es un polvo blanco que se deposita en forma de una película uniforme sobre el área a inspeccionar, y no deben depositarse capas demasiado delgadas ni gruesas.

Hay reveladores secos y húmedos, y estos últimos pueden aplicarse suspensión acuosa o no acuosa. Los reveladores secos y los húmedos se pueden aplicar a penetrantes fluorescentes, mientras que para los visibles solo se debe usar reveladores húmedos. La aplicación, dependiendo del tipo de revelador, puede ser por inmersión, aspersion o por medio de brocha.

El tiempo de revelado, como una regla práctica, es aproximadamente el mismo que el tiempo de penetración.

Interpretación y evaluación

Una vez transcurrido el tiempo de revelado, las discontinuidades existentes deben interpretarse y evaluarse. El tiempo de revelado inicia desde que se aplica el revelador seco o a partir del momento en que se seca el revelador húmedo, y aunque la interpretación y evaluación no deben realizarse antes de transcurridos 7 minutos de revelado ni después de 30, es aconsejable observar como se desarrollan las indicaciones del revelador.

Otro factor importante a considerar en esta etapa es que debe realizarse con una iluminación adecuada, ya sea con luz blanca, natural o artificial, o con luz negra, cumpliendo con los requisitos especificados en las normas aplicables.

Limpieza final

Terminado el examen es necesario remover de las superficies todas las trazas de materiales penetrantes, ya que estas provocan mala apariencia de las partes examinadas y, en algunas circunstancias pueden resultar perjudiciales, por ejemplo, en situaciones en las que la parte va a operar a altas temperaturas, a las cuales los residuos pueden reaccionar con el material.

Aplicaciones

Este método se emplea en el examen de metales ferrosos y en no metales. Pueden aplicarse en cualquier etapa de fabricación y para una gran variedad de procesos de manufactura, (soldadura, forja, tratamientos térmicos y maquinados, entre otros), así como para inspeccionar partes en servicio. Se usa para el examen de una variedad de productos, desde vajillas de cerámica de uso domestico hasta componentes críticos empleados en la industria aeronáutica.

En inspección de soldadura se usa para principalmente para detectar porosidad, grietas, traslapes en las juntas soldadas y pliegues, costuras, grietas y laminaciones abiertas a la superficie en metales base.

Equipo

El equipo requerido varía desde únicamente los materiales penetrantes (una lata de líquido penetrante, una de removedor y una de revelador) hasta unidades fijas o trenes de inspección que consta de estaciones para realizar cada etapa del examen, e incluir fuentes de luz negra y cámaras oscuras.

Ventajas

Las principales ventajas de esta técnica son las siguientes:

- Proporciona un nivel de sensibilidad muy alto.
- Sirve para inspeccionar partes de configuraciones intrincadas.
- Es relevante fácil de emplear.
- Es barata, razonable rápida y puede ser portátil.
- Se requiere de poco tiempo de entrenamiento para los inspectores.

Limitaciones

La prueba por líquidos penetrantes es aplicable únicamente a la detección de discontinuidades que afloran a las superficies y a materiales no porosos, requiere de una limpieza previa efectiva, no proporciona un registro permanente de los resultados de examen, requiere de inspectores con experiencia amplia, y si se hace una selección incorrecta del método de prueba o de los materiales penetrantes puede ocasionar resultados no confiables o niveles de sensibilidad inferiores a los requeridos.

Partículas magnéticas

Este método no destructivo permite la detección de discontinuidades superficiales y subsuperficiales en materiales ferromagnéticos, por lo tanto, esta limitado a metales ferrosos (con excepción de los aceros inoxidables austeníticos) y algunas aleaciones de níquel y cobalto.

Existe una cantidad relativamente grande de variantes de este método, cada una de las cuales es adecuada para diferentes aplicaciones y niveles de sensibilidad, y antes de seleccionar la variante de la técnica de examen apropiada para una aplicación específica, deben considerarse factores como el tipo, cantidad, peso, forma, condición superficial y propiedades metalúrgica de las piezas a examinar, así como el tipo y localización de las discontinuidades a detectar y el nivel de sensibilidad que se requiere. Las principales variantes de las técnicas tienen que ver con el tipo y forma de aplicaciones de las partículas, la secuencia de operación y con el método de magnetización.

Principios y descripción de la técnica

La pieza a inspeccionarse se magnetiza induciendo en ella un campo magnético y se aplica partículas ferromagnéticas (medio de examen) a la superficie sometida a ensayo, si esta contiene discontinuidades perpendiculares a las líneas del campo magnético, este se distorsiona formando polos que atraen a las partículas, mismas que delinear el contorno de las discontinuidades. La siguiente figura ilustra este principio.

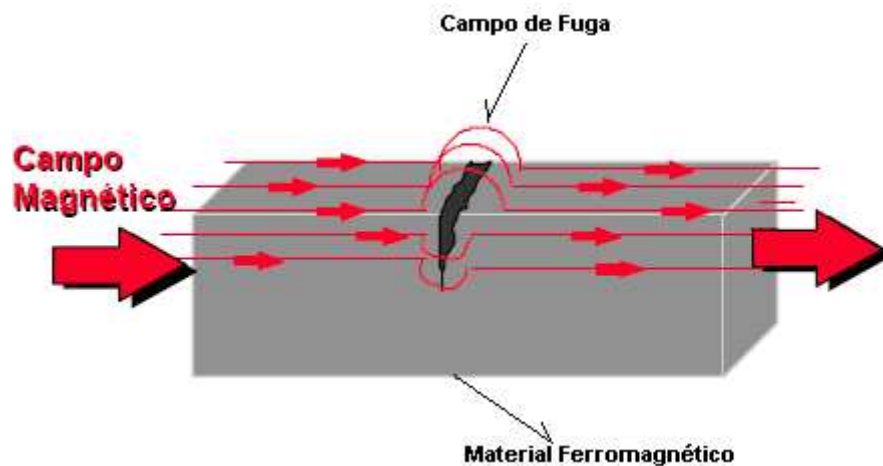


Figura 10.2-indicación producida durante un examen por partículas magnéticas

Las variantes de esta técnica que tienen que ver con las partículas son:

- Formas y colores de las partículas. Hay partículas de color blanco, rojo, negro, amarillo y fluorescente. La selección de partículas adecuadas debe estar basada en el tipo de superficie a examinar y el contraste de estas y la superficie, así como el tipo de discontinuidades a detectar
- Aplicación por vía seca
- Aplicación por vía húmeda. Las partículas se aplican suspendidas en un baño de agua o de un destilado ligero de petróleo.

Las partículas magnéticas secas son más apropiadas para revelar discontinuidades superficiales y subsuperficiales sobre las partes con acabados rugosos, mientras que las partículas más húmedas dan resultados más satisfactorios cuando se trata de detectar discontinuidades superficiales sobre partes finas con acabados tersos. Por su parte, las partículas fluorescentes (visibles bajo luz negra o ultravioleta) incrementan la sensibilidad de la prueba, permiten detectar discontinuidades muy pequeñas o finas y ayudan a inspeccionar de manera rápida superficies irregulares u oscuras.

Con respecto del tiempo y aplicación de las partículas y las corrientes de magnetización, se emplean las dos siguientes secuencias de operación básicas:

- Magnetización continua. Es el método o secuencia empleado para la mayoría de las aplicaciones y puede usarse con partículas secas o húmedas. El medio de examen (partículas) se aplica mientras la parte a inspeccionarse está magnetizada. En el caso de las partículas secas, estas se aplican mientras fluye la corriente de magnetización, mientras que en el caso de las húmedas, el líquido se dispersa en el área a examinar e inmediatamente se aplica la corriente de magnetización durante medio segundo aproximadamente.
- Magnetización residual. Las partículas se aplican una vez que hayan cesado la corriente de magnetización. Este método depende del campo magnético remanente y solo se debe utilizar en materiales de retentividad magnética relativamente alta.

La orientación del campo magnético tiene una gran influencia sobre la confiabilidad de los exámenes, ya que si las discontinuidades están alineadas con dirección del flujo magnético, se corre el riesgo de no detectarlas. Los mejores resultados se obtienen cuando las líneas de flujo del campo magnético son perpendiculares al eje longitudinal de las discontinuidades existentes, por lo que, para detectar las discontinuidades, sea cual sea su orientación con respecto del campo, debe procederse (cuando se emplea magnetización con puntas o yugo), a realizar el examen primero con el campo orientado en una dirección y después reorientado unos 90°, o bien a usar más de un método de magnetización, a fin de que el flujo magnético producido sea perpendicular al del primer examen, los campos magnéticos pueden inducirse de manera directa (si la corriente eléctrica atraviesa la parte a inspeccionar) o indirecta (si la parte se coloca dentro del campo generado) por medio de corrientes eléctricas y de imanes permanentes o electroimanes, y pueden ser circulares, longitudinales y localizados. Los equipos empleados para producir campos magnéticos con diferentes orientaciones son:

- Imán permanente
- Yugo (electroimán)
- Por puntas
- Grapas o pinzas de contacto
- Bobinas
- Conductor central
- Entre cabezales

Las siguientes figuras muestran algunos tipos de magnetización.

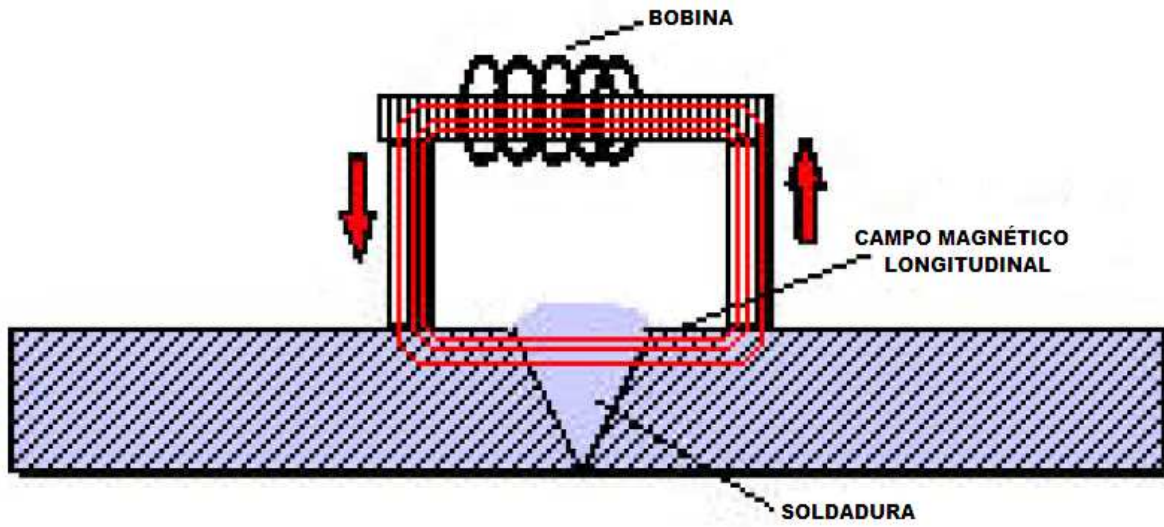


Figura 10.3- Magnetización local por medio de yugo (Yoke)



Figura 10.4- Magnetización local producida con puntas

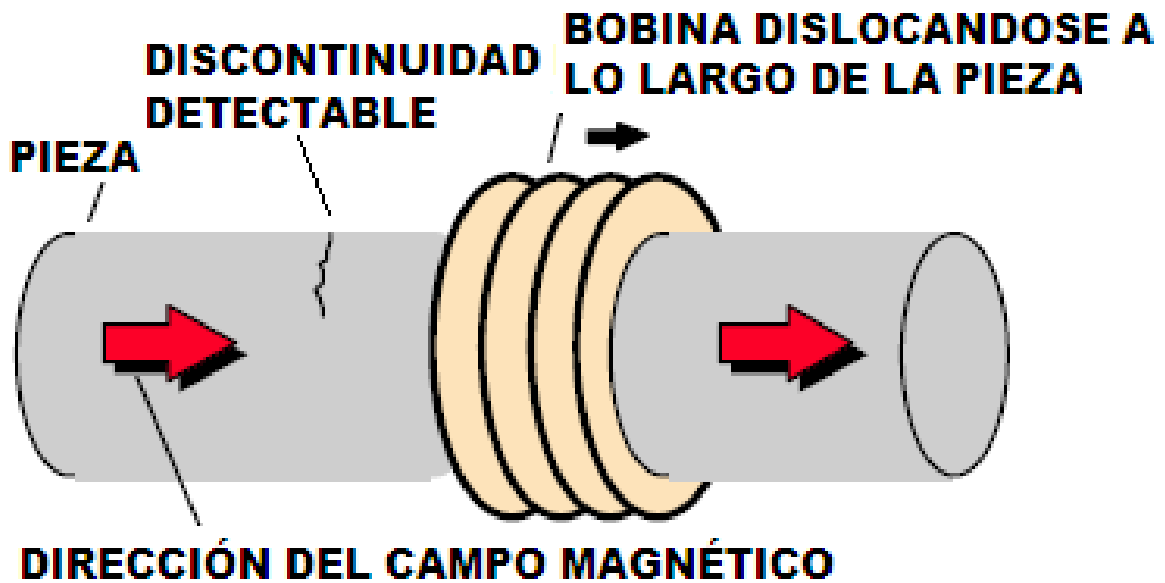


Figura 10.5-- Magnetización longitudinal producida con bobina

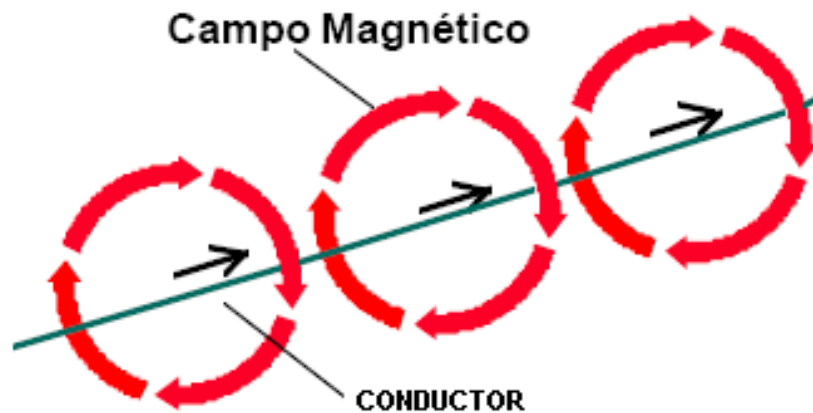


Figura 10.6- - Magnetización circular por medio de conductor central

Las corrientes usadas para magnetizar las piezas pueden ser alternas o directas, de alto amperaje y bajo voltaje.

La corriente alterna proporciona una mayor densidad de flujo en la superficie, por lo que da más sensibilidad para detectar discontinuidades superficiales. Puede ser usada de manera satisfactoria cuando no se requiere de evaluación subsuperficial. Es recomendada para la detección de grietas, pero no de fallas de fusión.

La corriente directa produce un campo magnético que penetra mayormente las piezas, por lo que es adecuada para localizar discontinuidades subsuperficiales. La corriente directa trifásica de onda completa produce resultados comparables a los producidos por los generadores o baterías de corriente directa uniforme, mientras que la corriente

monofásica rectificada de media onda ofrece la máxima sensibilidad, dado que el campo pulsante aumenta la movilidad de las partículas, lo que permiten que estas pueden alinearse más fácilmente en fugas de campo débiles.

Por su parte, los electroimanes o yugos pueden alimentarse con corriente alterna o directa y, al igual que los imanes permanentes, solo resultan satisfactorios para detectar grietas superficiales.

La intensidad de la corriente de magnetización debe ser lo suficientemente fuerte para revelar las discontinuidades, pero corrientes excesivas pueden producir patrones no relevantes.

Las corrientes de magnetización deben estar especificadas en los procedimientos o normas de prueba, aunque también pueden ser detectadas de manera experimental. A continuación se recomiendan los intervalos de corriente aproximados para varios métodos de magnetización:

- Longitudinal: de 3,333 a 10,000 amperios vuelta, dependiendo de la relación de los diámetros de la bobina y la parte bajo inspección.
- Circular: de 100 a 1000 amperios por pulgada de diámetro de la parte.
- Por puntas: de 0 a 125 amperios por pulgada de separación entre puntas, dependiendo del espesor de la pieza.
- Por yugo: la intensidad de corriente debe ser suficiente para levantar peso de 4.5kg. (10 libras) para un yugo de corriente alterna, y de 18 kg. (40 libras) para uno de corriente directa.

Las cuatro etapas básicas involucradas en una realización de inspección por este método son:

Limpieza y preparación de la superficie

Cada parte a inspeccionar debe estar libre de grasa, aceite, óxidos, arena u otra contaminación que pueda interferir con el examen.

Magnetización

Debe hacerse por el método que resulte más adecuado para cada aplicación particular.

Aplicación de las partículas

Interpretación de las indicaciones

Consiste en observar las indicaciones de las discontinuidades reveladas. Se realiza durante la magnetización y continúa el tiempo necesario para que el medio de examen (partículas) se haya estabilizado, o después de que ha cesado la corriente, dependiendo de si se uso secuencia de magnetización continua o residual. En esta etapa se determina la forma, tamaño, localización y distribución de las discontinuidades, si las hay, y se procede a su evaluación.

Con frecuencia es un requisito que las partes materiales que presentan magnetismo residual se desmagneticen una vez determinada la inspección. La desmagnetización puede usarse por una variedad de métodos, y consiste en la

aplicación de un campo magnético cuya dirección cambia periódicamente y cuya intensidad disminuye de manera progresiva hasta que el magnetismo residual queda dentro de los límites especificados.

Algunas de las razones para desmagnetizar las piezas son: evitar adherencia de partículas metálicas en partes sujetas a rozamiento (cojines y dientes de engranes), evitar soplos de arco de piezas que van a ser soldadas y evitar interferencias en los instrumentos de navegación.

Adicionalmente, puede ser necesario o conveniente limpiar las partes después de realizada la inspección.

Aplicaciones

Este método se emplea para inspeccionar productos intermedios y finales en la industria siderúrgica, la aeroespacial y en productos fabricados por medio de procesos de fundición, forja, laminado, extrusión, maquinado, tratamientos térmicos y soldadura.

Equipo

El equipo necesario para realizar estos exámenes varía según las necesidades que cada aplicación, y algunas situaciones puede bastar con el yugo o un equipo móvil, pero en otras puede requerirse equipo de corriente directa para trabajo pesado, y para inspeccionar piezas producidas en serie, por lo general es necesario contar con estaciones fijas de examen con partículas fluorescentes aplicadas por vía húmeda que operan con varios tipos de corrientes y controles.

Ventajas

Este método presenta las siguientes ventajas con respecto al método de líquidos penetrantes:

- Requiere de un menor grado de limpieza.
- Generalmente es más rápido y económico
- Puede revelar discontinuidades que no afloran a la superficie

Limitaciones

- Este método solo es aplicable a materiales ferromagnéticos
- No tiene gran capacidad de penetración
- Por lo general requiere del empleo de energía eléctrica
- El manejo del equipo en campo puede ser lento y caro
- Es satisfactorio solo para detectar discontinuidades perpendiculares al campo magnético

- No proporciona registro permanente de los resultados de examen
- Los recubrimientos relativamente gruesos pueden enmascarar defectos.

Radiografía

Este método se emplea para detectar discontinuidades internas y superficiales en juntas soldadas y piezas forjadas o fundidas, además de usarse en otro tipo de industrias y aplicaciones, tales como las médicas y de investigación.

Principios y descripción de la técnica

En radiografía se emplea radiación para penetrar los objetos a examinar y producir una imagen de su interior, misma que se fija en algún medio de registro (película fotográfica y papel sensitivo) o puede ser desplegada en una pantalla fluorescente o en detectores electrónicos de radiación.

La mayoría de los procesos radiográficos convencionales que se usan en la actualidad involucran el empleo de radiación electromagnética y el registro de la imagen en película radiográfica. En términos generales, este proceso es similar a la radiografía, con la defenecía principal que en radiografía se emplean rayos x o rayos gamma, cuya naturaleza es similar a la luz visible pero poseen mayor longitud de onda y mayor energía, el registro final de las imágenes en la película es el “negativo”.

Los rayos x se generan por medio de dispositivos electrónicos de alto voltaje y los rayos gamma por fuente radioactivas naturales o por isótopos radioactivos artificiales productos para fines específicos de radiografía industrial, tales como iridio 192, cobalto 60, cesio 137 y tulio 170 (los dos últimos ya en desuso) .

Los cuerpos sólidos opacos a la luz visible permiten el paso de cierta cantidad de radiación x o gama, absorben parte de ella y dispersan otra; la radiación que se trasmite a través de los cuerpos sirve para registrar la imagen en el medio apropiado. La cantidad de radiación absorbida y transmitida dependen del espesor del material y de su densidad, así como las características de la radiación misma, por lo que existen discontinuidades en las partes radiografiadas, al ser de diferente densidad que la del material, las zonas discontinuidades absorben y transmiten mayor o menor cantidad de radiación, y las variaciones en la radiación transmitida producen áreas de contraste óptico sobre los medio de registro.

La inspección básica por medio de radiografía requiere de los siguientes elementos esenciales:

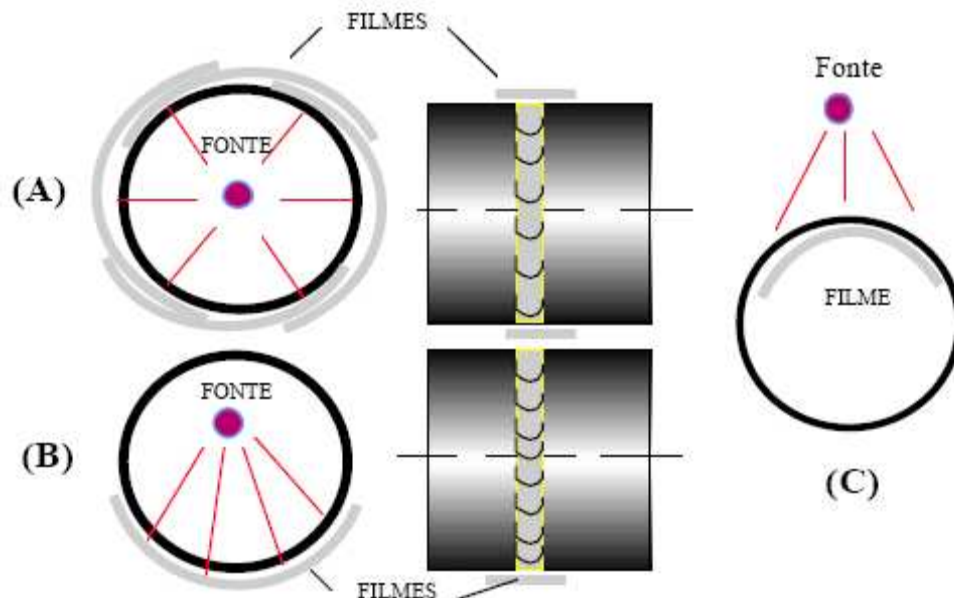
- Una fuente de radiación (la mayoría de las veces de rayos x o gamma)
- El objeto a ser radiografiado
- El medio de registro o dispositivo para desplegar las imágenes. La mayor parte de las veces se usa película radiográfica empaquetada en un soporte a prueba de luz.

- El personal calificado capaz de hacer la toma radiográfica (explosión) de manera satisfactoria y segura
- Los recursos para procesar la película expuesta o de operar otros medio de registro
- El personal capacitado para realizar de manera adecuada la interpretación de las imágenes radiográficas.

En relación con la fuente de radiación, es conveniente señalar que hay ciertas limitaciones para el empleo de rayos x o gamma y también para isótopo radioactivo a emplear. Estas limitaciones están afectadas por el espesor y tipo de material a inspeccionar. Así, para los aceros, que son las aleaciones que con mayor frecuencia se radiografían, se tiene que hasta espesores de 12.7mm (1/2") debieran emplearse rayos- x (con limites básicos de voltaje para diferentes espesores). Para espesores de 12.7 a 64 mm (de 0.5 a2.5 pulg.) lo recomendable es usar rayos gamma generados por iridio 192, mientras que el cobalto 60 es útil para radiografiar espesores de 51 a 229 mm (de 2 a 9 pulgadas).

Con respecto a la explosión y procesamiento de la película es necesario hacer énfasis en el sentido de que estos elementos juegan un papel decisivo en la realización efectiva de la inspección, ya que una película radiográfica es tan buena como el proceso de revelado, y una explosión correcta depende de una serie de factores como la posición de la fuente y la película con respecto del objeto de película, de pantallas intensificadoras y filtros, entre muchos otros.

Existen varios arreglos posibles para la exposición de películas radiográficas, algunos de los cuales se ilustran en las siguientes figuras. Cada arreglo resulta apropiado para condiciones y aplicaciones específicas, y el personal encargado de realizar las tomas, debe elegir el arreglo más adecuado en cada situación.



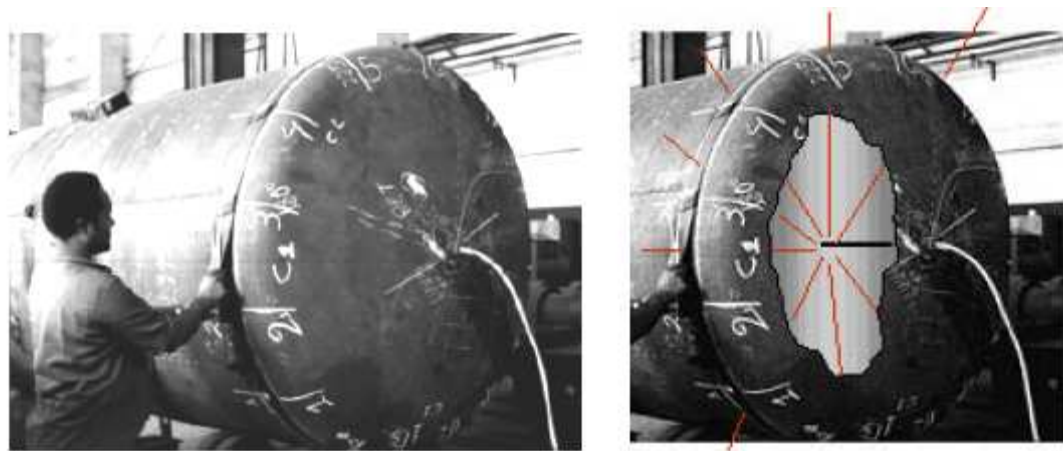
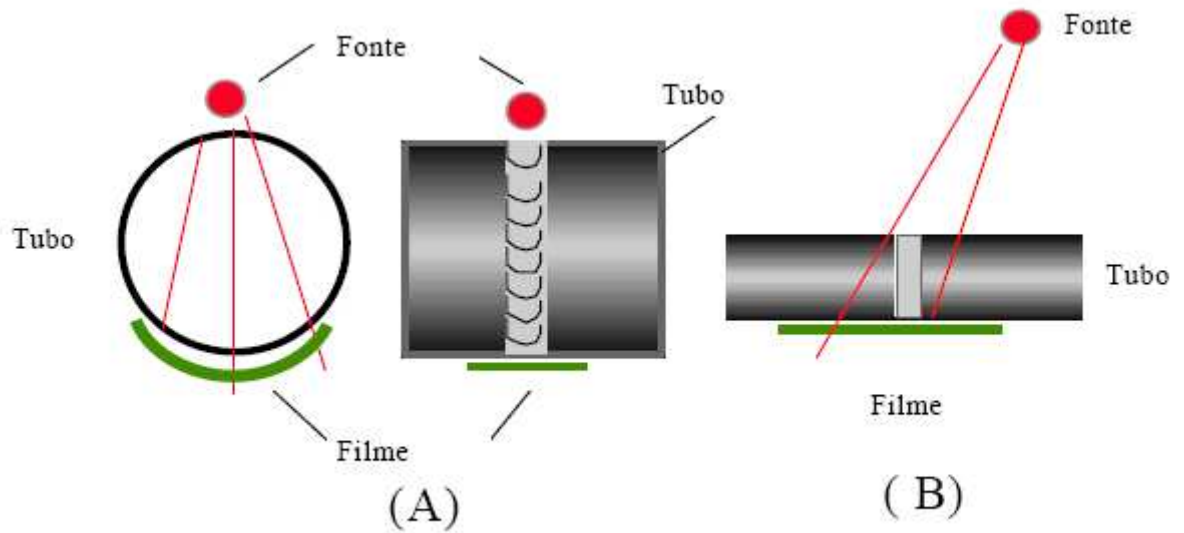


Figura 10.6-Arreglos de exposición radiográfica típicos

Por otra parte, los riesgos inherentes al uso y manejo de las fuentes de radiación, por lo que durante las tomas deben seguirse practicas y procedimientos seguros a fin de evitar que los individuos que toman radiografías y el personal en general estén expuestos a niveles peligrosos de radiación.

Después de las consideraciones anteriores, resulta evidente que el personal encargado de realizar la explosión debe estar debidamente calificado para realizar de manera correcta y segura estas actividades. Los requisitos relacionados con este tipo de calificaciones es tratado en una sección posterior de este capítulo.

En cuanto a la interpretación de las imágenes radiográficas, es igualmente valido que tal tarea deba ser realizada por personal debidamente calificado para “leerlas” y evaluarlas. Durante esta actividad se determina la calidad de la explosión, el tipo y numero de discontinuidades reveladas y si estas son toleradas o no por los criterios de aceptación especificados.

Calidad de una imagen radiográfica

Las imágenes radiográficas deben proveer información útil del interior de las partes examinadas a fin de determinar si estas contienen defectos, y la utilidad de información esta determinada por el contraste y definición radiográficos, los cuales son afectados, respectivamente, por dos categorías de variables, las de exposición y las geométricas, mismas que deben ser controladas rigurosamente, ya que si no son, los resultados de la inspección no son confiables, por lo que antes de poder evaluar de manera efectiva las discontinuidades reveladas en las imágenes, primero debe determinarse que la calidad de estas ultimas es satisfactoria. A continuación se describen algunos aspectos clave y requisitos básicos útiles para estimar la calidad de las imágenes radiográficas.

Indicadores de calidad de imagen

La herramienta empleada para asegurar si se empleo la técnica adecuada para controlar la variable que afectan la calidad de las radiografías es el indicador de calidad de imagen (ICI) o penetramiento.

Los indicadores de calidad de imagen se fabrican en tamaños e incrementos de espesor estandarizados, y las normas especifican los requisitos relacionados con su uso. Uno de estos requisitos establece que los indicadores empleados deben ser de un material cuyas propiedades radiográficas sean similares aquellas de las partes de examinar.

Los indicadores de calidad de imagen convencionales que se emplean con mayor frecuencia son los ASTM. Estos están identificados con números de plomo en uno de sus extremos y el número corresponde a su espesor en milésimas de pulgada o en milímetros. Tienen tres barrenos cuyos diámetros son de 1,2 y 4 veces su espesor "T", es decir 1t, 2t, 4t; sus características básicas se muestra en la figura 10.7.

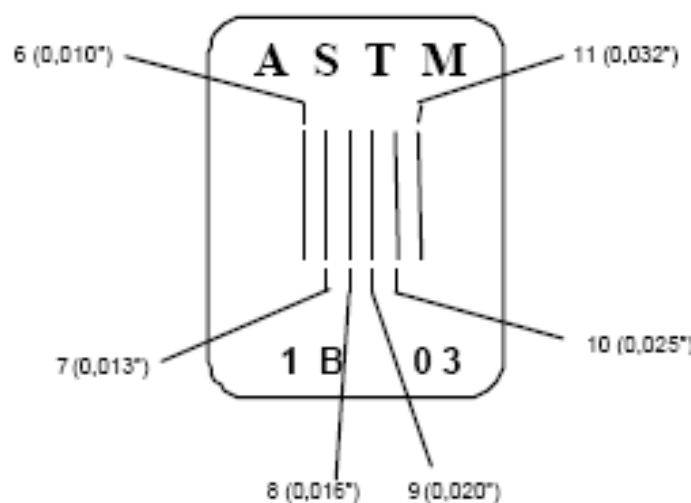


Figura 10.7- Diseño típico de un indicador de calidad de imagen ASTM

Al radiografiar juntas soldadas, se selecciona indicadores de un espesor igual (o aproximadamente igual, las normas especifican los indicadores requeridos para intervalos nominales de espesores de material) al 2% del material a

radiografiar. La mayoría de los requisitos de calidad de imagen radiográfica se expresan en términos del espesor del penetramiento y el tamaño barreno deseado. Por ejemplo, si el requisito establece un nivel de sensibilidad 2-2t, el primer 2 establece que el penetrámetro sea del 2% del espesor del espécimen a radiografiar, 2t indica que el barreno que tiene un diámetro del doble del espesor del penetrámetro debe ser visible en la radiografía.

Las afirmaciones anteriores sugieren que si en una película se puede apreciar el barreno 2t en un indicador del 2% del espesor de la junta radiografiada, también podrán apreciarse discontinuidades de un espesor del 2% del espesor de la junta, y de un tamaño igual o mayor que el 4% de tal espesor, pero la apariencia de la imagen del penetrámetro en la película radiográfica indica la calidad de la técnica empleada, y el hecho que determinado barreno sea visible en la radiografía no significa que una discontinuidad de tales dimensiones aproximadas puede ser detectado, ya que los barrenos de los penetrámetros tienen límites definidos y cambios abruptos en sus dimensiones, mientras que las discontinuidades por lo general tienen cambios graduales de forma y dimensiones. Por lo tanto, un indicador de calidad de imagen no debe ser usado para estimar el tamaño mínimo de las discontinuidades que pueden ser detectadas.

Densidad radiográfica

La densidad radiográfica de una película en su grado de “ennegrecimiento”, es decir, la cantidad de luz que permite pasar a través de ella. La expresión matemática de la densidad es la siguiente:

$$D = \log\left(\frac{I_i}{I_e}\right)$$

Donde:

D es la densidad,

“ I_i ” es la intensidad de la luz incidente en la película, e

“ I_e ” es la intensidad de la luz emergente

Es un requisito de la densidad transmitida por la película a través de la imagen radiográfica del inspector de calidad de imagen y de área de interés, debe tener valores mínimos de 1.8 para radiografías tomadas con rayos x, y de 2.0 para películas tomadas con rayos gamma, y un valor máximo de 4.0 para ambos casos.

Asimismo, de manera general, tampoco debe haber variaciones de densidad mayores de menos 15% ni más de 30% entre el área de interés de la película y el penetrámetro.

Aplicaciones

La radiografía industrial en la fabricación de partes y estructuras metálicas se emplea principalmente en la inspección de ensambles soldados y piezas obtenidas por diferentes procesos de fundición. En juntas soldadas se emplea para detectar socavados, penetración incompleta en la junta, inclusiones de tungsteno y escoria, así como grietas y fusión incompleta, estas últimas con confiabilidad marginal.

Equipo

Dependiendo de las necesidades particulares de cada aplicación, son necesarias fuentes de rayos x o rayos gamma, accesorios para la toma y manejo de las películas e instalaciones para el procesamiento de las películas y para su interpretación; o bien, el equipo de examen radioscópico en tiempo real. El equipo de detección de radiación y el de seguridad y dosimetría del personal también debe ser considerado.

Ventajas

Las principales ventajas de este método son las siguientes:

- Proporciona un registro permanente de los resultados
- Las imágenes radiográficas ayudan a caracterizar las discontinuidades
- Puede aplicarse a diversos materiales
- Puede detectar discontinuidades internas y superficiales
- No está restringido por la estructura de grano de los metales
- Equipo para radiografía con rayos x puede ajustarse a diferentes niveles de energía, y las imágenes radiográficas son de calidad superior a las obtenidas con rayos gamma.

Limitaciones

Una limitante de consideración es que las discontinuidades aplanadas (desgarre laminar, con cierta medida grietas y fusión incompleta) puede no ser detectadas, o detectadas con confiabilidad marginal si estas no están alineadas con el haz de radiación; no es un método que debe aplicarse para detectar laminaciones o traslapos. Otras limitaciones son:

- Se requiere tener acceso por dos lados opuestos del objeto a inspeccionar;
- El equipo es costoso
- El equipo de rayos x generalmente no es portátil
- La actividad de las fuentes de rayos gamma decae y su nivel de energía constante (longitud de onda) no puede ser ajustado

- La radiación representa un alto riesgo para la seguridad del personal, por lo que el almacenamiento y el manejo de las fuentes requiere de las instalaciones, cuidados y entrenamiento riguroso
- Requiere del personal altamente entrenado, capacitado y con experiencia
- No indican la profundidad en la que se encuentran las discontinuidades, a menos de que se empleen técnicas especiales.
- No se recomienda su uso para la inspección de partes de geometría complicada, ya que los resultados podrían ser pocos confiables
- La operación del equipo representa riesgos de salud si no se observan las normas de seguridad pertinentes.

Ultrasonido

Este método se emplea para detectar y localizar discontinuidades superficiales e internas por medio de haces de ondas sonoras de alta frecuencia que se introducen a las partes a inspeccionar. Los haces sonoros se dirigen por una trayectoria previsible dentro de la pieza y son reflejados por las superficies que los interceptan, y los ecos o reflexiones del sonido se detectan y su señal es amplificada y llevada a un tubo de rayos catódicos, en el cual es desplegada como un desplazamiento vertical.

Principios y descripción de la técnica

La detección, localización y evaluación de las discontinuidades es posible debido a dos hechos: la velocidad del sonido a través de un metal es casi constante, por lo que pueden medirse las distancias recorridas; la amplitud de los pulsos de sonidos reflejados es más o menos proporcional al tamaño del reflector. El grado de reflexión (y refracción) que sufre un haz ultrasónico cuando pasa de un medio a otro depende de la diferencia entre las resistencias que cada medio ofrece a su paso (impedancia acústica).

Las ondas sonoras que se emplean en los exámenes por este método son similares a las ondas audibles para el oído humano, pero de una frecuencia mayor, por lo que les denomina ultrasonidos. Las frecuencias útiles para la inspección oscilan entre 0.25 y 25 Mega Hertzio, y las empleadas para examinar soldaduras varían de 1 a 6 MHz, aunque la mayoría de las inspecciones se realiza con frecuencias aproximadas de 2.25 MHz

El ultrasonido es generado a través de materiales transductores como el cuarzo o el titanato de bario, que transforman la energía eléctrica por la mecánica y viceversa.

Un transductor es un cristal polarizado que aumenta sus dimensiones cuando se aplica el pulso eléctrico, y cuando se le deja aplicar, el cristal recupera sus dimensiones originales. Cuando el transductor es conectado a un generador de pulsos de alta frecuencia, las dimensiones de cristal aumentan y disminuyen simultáneamente con los pulsos eléctricos, esto es, el cristal vibra a alta frecuencia y genera ultrasonido. Esto se conoce como efecto piezoeléctrico inverso. También se produce este efecto en sentido opuesto (efecto piezoeléctrico directo): las variaciones de alta frecuencia (energía mecánica) recibidas por el transductor son transformadas en pulsos eléctricos.

Para propósitos de inspección, los transductores se alojan, junto con un material amortiguante, en una carcasa con una zapata y las conexiones necesarias. A este conjunto se les denomina palpador.

Hay tres métodos básicos de propagación del sonido a través de los metales:

- Ondas longitudinales, rectas o de compresión, mismas que se propagan por el desplazamiento de átomos o moléculas sucesivas del metal. Los movimientos de las partículas son paralelos a la propagación del haz sonoro. Estas ondas tienen velocidades relativamente altas y longitudes de onda relativamente cortas, por lo que la energía puede ser enfocada dentro de un haz cuya divergencia es mínima. Su uso generalmente está limitado a la detección de inclusiones y discontinuidades de tipo laminar en metales base.
- Ondas transversales o de corte. Estas también se propagan por el desplazamiento de átomos o moléculas, pero el movimiento es perpendicular a la dirección de propagación del haz. La velocidad de estas ondas es de más o menos de la mitad de aquella de las ondas longitudinales. Esta velocidad menor permite que la regulación electrónica sea más fácil, y mayor sensibilidad para indicaciones pequeñas. Las ondas de corte son más útiles en la detección de discontinuidades de soldadura debido a que permiten fijar la localización, orientación y características de las discontinuidades en coordenadas de tres dimensiones.
- Ondas superficiales o de Rayleigh. Se propagan a lo largo de la superficie del metal de manera similar a las ondas sobre la superficie del agua. Debido a que estas ondas tienen poco movimiento bajo la superficie del metal, no se emplean en el examen de juntas soldadas.

Las características principales del ultrasonido son las siguientes:

- viaja a gran velocidad (en relación con el desplazamiento del sonido en el aire) a través de materiales sólidos
- se transmite a través de los sólidos en línea recta
- se atenúa ligeramente al desplazarse a través de los sólidos (su atenuación varía de manera proporcional con su frecuencia) y se acentúa altamente en el aire.
- Su comportamiento es similar al de la luz visible en los siguientes sentidos: la divergencia de los haces puede controlarse por medio de enfoque, los haces se reflejan de manera predecible en superficies de diferentes densidades y se refractan entre-cara de materiales de diferente densidad.
- Su comportamiento difiere de aquel de la luz en que el mismo medio pueden ocurrir diferentes modos de vibración y velocidades.

Debido a que el ultrasonido se acentúa severamente en el aire y este tiene una impedancia acústica muy alta comparada con la de los sólidos, si se aplica un transductor a la superficie a inspeccionar, el ultrasonido no se transmitirá al sólido no que se verá reflejado completamente. Para evitar este efecto, se aplica una sustancia *acoplante* (aceite, agua, grasa o glicerina) entre el transductor y la superficie del material, y de esta forma se elimina la barrera de aire y se permite la propagación del sonido a través del sólido.

Los métodos empleados para realizar inspecciones por ultrasonido son:

-Pulso-eco

-Transmisión-recepción

-Resonancia

-Inmersión

El método más comúnmente usado para la exploración manual de soldaduras es el de pulso-eco, mismo que se describe a continuación.

Una vez que el transductor se acopla a la superficie del material a ensayar, el sonido viaja a través de este hasta que encuentre un obstáculo, que puede ser la superficie de la pared posterior de la pieza de inspección. El sonido se refleja y regresa al transductor, mismo que produce pulsos de voltaje cuando recibe la energía del sonido. El impulso del voltaje es retro-alimentado al sistema del equipo y la señal correspondiente se muestra en un tubo de rayos catódicos.

En la pantalla del equipo de prueba (tubo de rayos catódicos) aparecen dos picos, uno a la izquierda que se conoce como eco principal y corresponde a la reflexión del ultrasonido al pasar del transductor a la pieza, y el pico de la derecha o eco de fondo corresponde a la superficie posterior de la pieza inspeccionada, misma que refleja el haz de ultrasonido incidente. Este pico es menor a la atenuación. Si existe una discontinuidad en la pieza, abra una reflexión intermedia, misma que se detecta con otro pico entre los ecos principales y de fondo. La anchura y amplitud de este pico depende del tamaño y su orientación de discontinuidad (una superficie de reflexión) la figura 10.8 ilustra de manera sencilla el método anteriormente descrito.

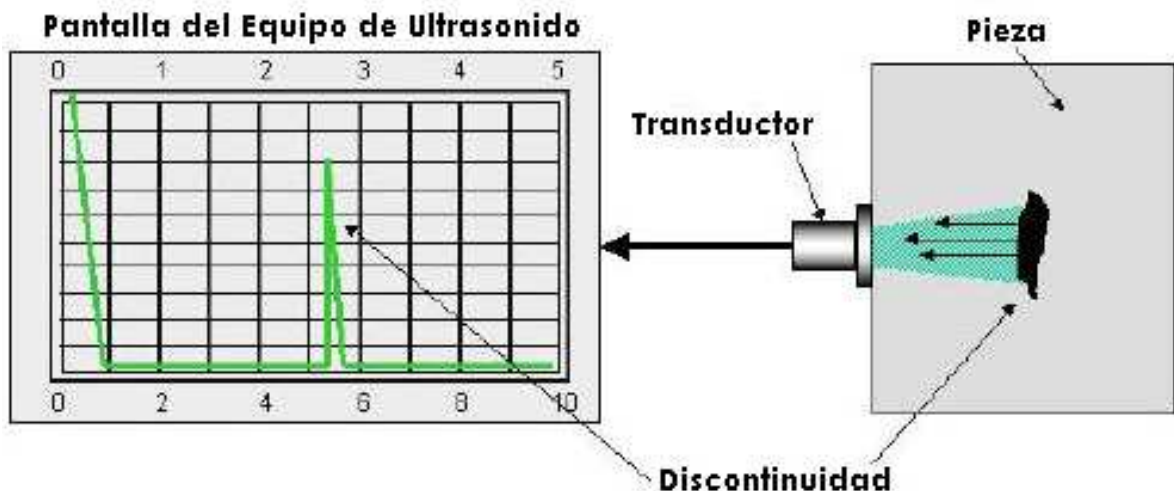


Figura 10.8-Detección de una discontinuidad en el método pulso-eco

Hay una gran variedad de palpadores y la selección del más adecuado depende de varios factores, entre los que pueden mencionarse el número de elementos piezoeléctricos, el tipo de inspección (contacto, inmersión, alta temperatura), el diámetro del elemento piezoeléctrico y la frecuencia de emisión, el ángulo de refracción, el tipo de banda y el tipo de protección contra el desgaste.

La forma en que se propagan los haces ultrasónicos a través de las piezas en inspección depende de la orientación del palpador con respecto de la superficie de inspección (de incidencia): si el palpador es perpendicular a la superficie, el sonido viajara preferentemente de forma longitudinal; si tiene cierta inclinación(entre el primero y segundo ángulos críticos de la ley de Snell), viajara predominantemente de forma transversal; y su orientación es tal

que el haz incida con un ángulo igual o mayor que el segundo ángulo crítico, se desplazará en forma de ondas superficiales.

El modo de propagación de los haces será el modo que se empleará durante la inspección. Como se mencionó anteriormente, las ondas de corte o transversales son las más adecuadas para la detección de discontinuidades de soldadura. Los ángulos de las ondas de corte se miden en el material de prueba a partir de la línea perpendicular a la superficie de prueba. Los tres ángulos más comúnmente empleados son 70°, 60° y 45°. Hay palpadores diseñados para emitir haces rectos (perpendiculares a la superficie), angulares y superficiales. La figura 10.9 ilustra en el palpador de haz recto, la figura 10.10 uno de haz angular.

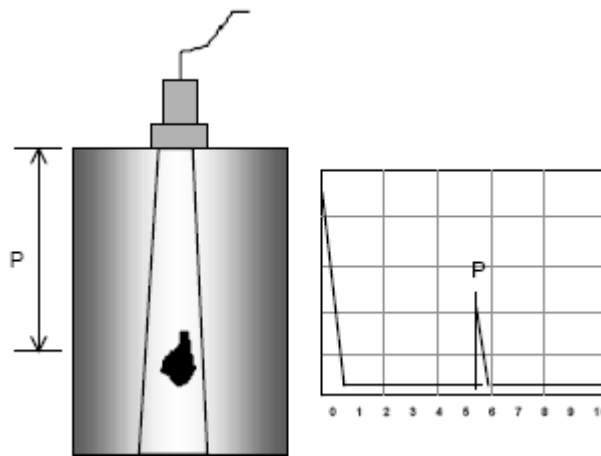


Figura 10.9-Inspección con palpador de haz recto

Discontinuidad ó Tipo de Junta	Aplicabilidad de varios métodos de END		
	Aplicables	Aplicables Marginalmente*	No aplicable
Porosidad	RT, PT(1), VT(1)	UT, MT(2), ET	
Inclusión de escoria ó tungsteno	RT, UT	MT(2), ET	VT, PT
Fusión incompleta	UT	RT, MT(2), ET	VT, PT
Penetración incompleta en la junta	RT, UT	MT, ET	VT, PT
Socavado	RT, VT	UT, PT, MT, ET	
Traslape (cordón traslapado)	PT, MT	UT, VT, ET	RT
Grietas	UT, PT(1), MT(2), VT, ET	RT	
Desgarre Laminar	UT	PT(1,3), MT(1,3), VT(1,3)	RT, ET
Laminaciones	UT, PT(1,3) MT(2,3), VT(1,3)		RT, ET
Junta a tope	RT, UT, PT, MT, VT, ET		
Junta en esquina	UT, PT, MT, VT	RT, ET	
Junta en "T"	UT, PT, MT, VT	RT, ET	
Junta en traslape	PT, MT, VT	RT, UT, ET	

* La confiabilidad de los resultados depende del tamaño, orientación y localización de la discontinuidad y del espesor, entre otros factores.

(1) Superficiales

(2) Superficiales y subsuperficiales

(3) Al preparar las juntas a soldar, durante el depósito de un cordón de soldadura y otro en soldaduras de pasos múltiples o en los bordes del metal base.

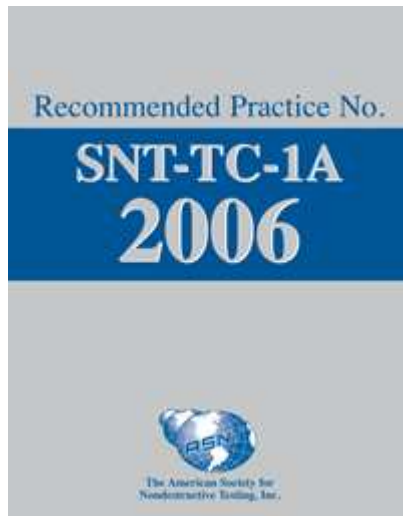
Tabla 10.1-Métodos de END aplicables en la detección de algunas discontinuidades y en cuatro tipos de juntas soldadas

Requisitos de calificación para el personal de END – NDT

Existen 3 niveles de clasificación de los inspectores de ensayos no destructivos:

- Nivel I: Un individuo nivel I en END esta certificado para calibrar y ejecutar el ensayo. No puede evaluar resultados. Debe recibir las instrucciones y supervisión de individuos certificados a niveles II o III.
- Nivel II: Un individuo de nivel II en END esta certificado para calibrar el equipo e interpretar y evaluar los resultados de acuerdo con las normas aplicables; también debe estar familiarizado por completo con el alcance y las limitaciones del método en el cual esta calificado, y ejercer sus responsabilidades asignadas con respecto al entrenamiento y guía, durante la ejecución del trabajo, de individuos de nivel I y personal en entrenamiento. Asimismo, debe ser capaz de organizar y reportar los resultados de END.
- Nivel III: Un individuo del nivel III en END debe ser capaz de establecer técnicas y procedimientos, interpretar normas y procedimientos y designar los procedimientos, métodos y técnicas de END a emplear, también debe ser responsable de las operaciones de END que se le asignaron y para las cuales esta calificado, y debe ser capaz de interpretar y evaluar los resultados en términos de las normas existentes. El individuo de nivel III en END debe tener suficientes conocimientos prácticos sobre la tecnología de los materiales, fabricación y productos para establecer las técnicas y asistir en el establecimiento de los criterios de aceptación cuando estos no están disponibles; Asimismo, debe estar familiarizado,

Aunque sea de manera general, con otros métodos apropiados de END; y debe ser capaz de entrenar y administrar exámenes, en el método en el cual está certificado, para la certificación del personal de niveles I y II.



Es conveniente señalar que entre las normas mencionadas hay algunas diferencias en cuanto a las habilidades señaladas para los individuos de los niveles de calificación descritos. Por ejemplo, la Norma Internacional ISO 9712, en relación con los resultados de prueba, establece que el personal de nivel I debe ser capaz de registrar y clasificar los resultados de END, pero no para su evaluación. Por su parte, la práctica recomendada SNT-TC-1A, establece que el personal de tal nivel deberá estar calificado para efectuar evaluaciones y determinaciones de aceptación o rechazo específicas de acuerdo con instrucciones escritas.

Otra figura que reconocen las normas anteriores es la de personal de entrenamiento (trainee), que es considerado como aquel individuo que esta en proceso de ser entrenado, calificado y certificado por primera vez.

Las consideraciones anteriores son solo algunos de los aspectos más relevantes tratados en las normas consideradas, y el lector debiera consultarlas a fin de familiarizarse con ellas en el alcance requerido para un inspector de soldadura.

Requisitos para la conducción de END

En relación con la ejecución de los exámenes no destructivos, las normas sobre bienes soldados establecen los requisitos pertinentes, algunos de los cuales ya fueron mencionados en el capítulo 7.

A fin de complementar la información sobre estos asuntos, conviene añadir otros requisitos asociados con la realización de los END, lo cuales pueden ser ilustrados por medio de algunas referencias al código ASME para calderas y recipientes a presión.

La sección VIII, división I, en su párrafo UW-51, "Examen Radiográfico y Radiográficos de juntas soldadas" indica que: "(a) todas las juntas soldadas a ser radiografiadas deben ser examinadas de acuerdo con el artículo 2 de la sección V..." (Del mismo código), y (a) (2) "El fabricante debe certificar que el personal que realiza y evalúa el examen radiográfico requerido por esta división ha sido calificado y certificado de acuerdo con su práctica escrita del empleador SNT-TC-1A debe ser usada como una guía para que los empleadores establezcan su práctica escrita para la calificación y certificación de su personal..."

En relación con esa sección V, esta contiene los requisitos y métodos de exámenes no destructivos a aplicarse durante la fabricación de los recipientes y calderas cubiertas por el código. Consta de las subsecciones, la A y la B.

La subsección A establece los requisitos (y los métodos a emplear) para la realización de tales exámenes, y en todos sus artículos especifica que cuando esta sección V es requerida, por referencia hechas en otras secciones del código, los fabricantes deben establecer por escrito y demostrar (calificar) los procedimientos de los END a usar, y que tales procedimientos y su demostración deben resultar a satisfacción del inspector (autorizado).

La subsección B es una colección de las normas adoptadas por la sección V del código, que cubren los métodos END estandarizados. Estas normas están incluidas con propósitos informativos y por lo tanto su empleo no es obligatorio, a menos de que estén específicamente referidas en la subsección A, o que sean especificadas por otras secciones del código.

Los documentos incluidos en la subsección B fueron adoptadas de ASTM, sociedad que publica todas sus normas sobre END en el volumen 03.03 de su sección 3, "Métodos de Prueba y Procedimientos Analíticos para Metales".

Comentarios Finales

Las consideraciones hechas a lo largo de este capítulo, en particular las relacionadas con los métodos de examen no destructivo que son con más frecuencia se emplean para evaluar juntas soldadas, no son, ni con mucho, suficientes para que el lector se familiarice con esta materia en el alcance que requieren sus funciones como inspector de soldadura, ya que solamente se trataron los aspectos básicos de cada método. Es evidente que el lector que desee profundizar sus conocimientos sobre el tema, debe consultar fuentes especializadas.

Capítulo 11

INSPECCIÓN DE SOLDADURA

Contenidos:

DESCRIPCIÓN

PÁGINA

Introducción

Secuencia de las actividades de inspección de soldadura

Uso de calibradores de soldadura

Comparación de los criterios de aceptación de algunas normas para las discontinuidades más comunes

Introducción

Los propósitos y alcances de la inspección de soldadura, así como los principios y conceptos fundamentales y otros aspectos asociados con esta disciplina ya fueron tratados, en la medida de lo posible, a lo largo de este texto, por lo que es conveniente, para finalizar hacer una recapitulación de las consideraciones más importantes que el inspector debe tener en mente al realizar sus funciones y cumplir efectivamente con sus responsabilidades.

Varias veces en algunos capítulos se cito, con mayor o menor énfasis, la siguiente declaración: El propósito de la inspección de soldadura es determinar si las ensambladuras soldadas (Weldments) satisfacen los criterios de aceptación de un código o norma específico, o los de algún otro documento. La insistencia en volver a citarla otra vez obedece al hecho que no es poco frecuente que el inspector se vea involucrado en situaciones en las que no están establecidos los requisitos con que deben cumplir los trabajos a inspeccionar, o bien, que tales requisitos son ambiguos o incompletos.

La falta de requisitos completamente definidos puede, en la práctica, ocurrir de varias formas, desde las situaciones en las que no se especifican (n) claramente la(s) norma(s) aplicable(s) a los trabajos a inspeccionar, hasta aquellas en las que los contratos establecen, además de las normas, exclusiones de uno o más requisitos o el establecimiento de otros adicionales, pero los dibujos de fabricación no tienen especificados, por medio de instrucciones o símbolos, los tamaños de cada soldadura, o no se establecen los tipos, alcances y frecuencias de las inspecciones y pruebas a aplicar.

En cualquiera de los casos, es de suma importancia que todos los requisitos a cumplir y los criterios de aceptación estén completamente definidos.

En algunos casos se especifica que la inspección se realiza en un cien por ciento de la producción, y en otros, que estas se lleve a cabo por medio de muestreo, es decir, a través de la inspección y de pruebas de muestras representativas de la producción, y por medio de estas, llegar a conclusiones válidas sobre la cantidad del lote muestreado.

Las técnicas de muestreo a emplear (parcial especificado o al azar, o bien estadístico), el tamaño de las muestras y los métodos de inspección debieran formar parte de los procedimientos formales de inspección, y también ser consistentes con los requisitos de norma y de contrato.

Por lo general se requiere que la inspección sea completa en los equipos o partes para servicio crítico, los cuales tienen especificados los requisitos de calidad más altos; para juntas críticas por lo común se especifica inspección visual conjuntamente con uno o más métodos de examen no destructivo, mientras que para los trabajos de soldadura típicos o promedio, la inspección a llevar a cabo normalmente involucra una combinación de inspección visual al cien por ciento y muestreo al azar por medio de uno o más métodos de examen no destructivo.

Por otra parte, la inspección a realizar también debe tomar en cuenta y ser compatible con los requisitos, objetivos y procedimientos del sistema de calidad implementado por las organizaciones involucradas en un trabajo de código.

Secuencia de las actividades de inspección de soldadura

En la gran mayoría de los casos, las actividades reales de inspección no están limitadas a la aceptación o rechazo del producto final, sino que deben cubrir sistemáticamente cada una de las etapas de fabricación o construcción. Si la inspección no se lleva a cabo desde las etapas iniciales del trabajo, es difícil o imposible determinar si las juntas soldadas tienen las propiedades requeridas, o si las soldaduras fueron aplicadas con procedimientos calificados y por el personal con la habilidad requerida, o si se emplearon los metales base especificados.

En general, la inspección debe realizarse en tres etapas de producción o construcción bien definidas: antes de la soldadura, durante y después de esta.

Las actividades que deben llevarse a cabo en cada una de estas etapas se indica a continuación, aunque debe tomarse en cuenta que esta es una guía, y en cada caso específico pudiera no ser aplicable una o más de tales actividades.

Inspección ante de la soldadura

- Revisar los dibujos, normas y contratos aplicables
- Identificar planes de fabricación y calidad (inspección y pruebas)
- Establecer puntos de verificación en los que debe realizarse un examen o prueba antes de que continúe la fabricación
- Verificar que están disponibles y calificadas las especificaciones de procedimiento de soldadura necesarias
- Asegurar que el personal de soldadura está disponible y calificado
- Revisar que los metales base cumplan con las especificación aplicable, están identificados, no representan defectos y que son almacenados y manejados de manera que se asegure que no se deterioren
- Asegurar que los metales de soldadura (electrodos, metales de aporte, gases, fundentes) especificados están disponibles y que existen las provisiones para almacenarlos y manejarlos de manera correcta
- Verificar que el ajuste y la alineación de los miembros de las juntas a soldar es el requerido por el diseño o procedimiento de soldadura
- Verificar la disponibilidad del equipo de soldadura necesario y su adecuación para aplicar los procedimientos aplicables
- Asegurar la disponibilidad de los procedimientos y secuencias de soldadura apropiados para minimizar la contracción y la distorsión (cuando esto resulte aplicable)

Inspección durante la soldadura

Las actividades que deben realizarse durante esta etapa son:

- En términos generales, asegurar que las operaciones de soldadura se llevan a cabo conforme a lo establecido por los procedimientos aplicables (tipo, tamaño de los electrodos; voltaje, amperaje y velocidad de soldadura; tipo de corriente y polaridad; tipo y flujo de los gases de protección)
- Verificar que la temperatura de precalentamiento y la temperatura entre pasos son las especificadas por el procedimiento de soldadura, y que se dispone de los medios para el control de estas
- En aplicaciones en las que es un requisito el control del calor aportado por paso, asegurarse de que este control sea efectivo
- Asegurar que los materiales de soldadura se manejan y almacenan apropiadamente
- Verificar la calidad del paso de raíz, este paso es una parte crítica de las soldaduras
- En soldaduras de ranuras soldadas por los dos lados, asegurar de que antes de que se suelde el segundo lado, se prepara adecuadamente la raíz de la junta.
- Verificar que la limpieza inicial, entre paso y el final es la adecuada
- Inspeccionar visualmente las capas o pasos subsecuentes
- Verificar la realización y los resultados de los exámenes no destructivos en proceso especificados

Inspección después de la soldadura

- Examinar la apariencia final de las soldaduras
- Medir el tamaño final de las soldaduras
- Determinar la longitud de las soldaduras. Al efectuar actividades indicadas en este inciso y con los anteriores, se deben detectar e indicar discontinuidades presentes en las uniones soldadas, así como evaluarlas y decidir, de acuerdo con los criterios aplicables, su aceptación o rechazo.
- Verificar las actividades de reparación y reinspección
- Asegurar que las estructuras completas (o las uniones soldadas, según sea aplicable) se sometan al tratamiento térmico posterior a la soldadura (revelado de esfuerzos la mayor parte de las veces) especificado
- Asegurar que se llevan a cabo las pruebas (destruyentes, no destruyentes, hidrostáticas, etc.) especificadas y sus resultados cumplen con los criterios de aceptación
- Recopilar, distribuir y archivar la documentación (reportes, certificados y registros) de fabricación e inspección requerida

- En términos generales, verificar el cumplimiento de las partes fabricadas con respecto a las normas y dibujos.

Uso de calibradores de soldadura

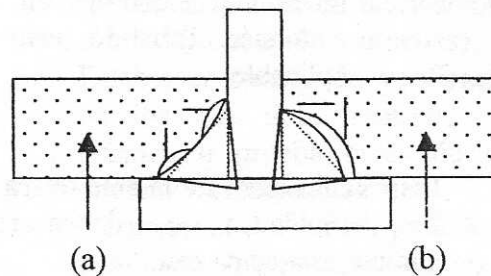
A continuación se ilustra el modo de que se deben emplear dos de los instrumentos más populares para la evacuación de tamaños y discontinuidades de soldadura.

Calibrador de soldadura de filete

Las soldaduras de filete pueden tener perfiles cóncavos, convexos o planos, y al determinar el tamaño de las soldaduras con cada tipo de perfil, es necesario tener en cuenta que, para soldaduras de filete de piernas iguales, el tamaño de la soldadura es la longitud de la pierna o cateto del triángulo rectángulo isósceles de mayor tamaño que puede ser escrito dentro de la sección transversal de las soldadura; para soldaduras de filete de piernas desiguales; en tamaño corresponde a las longitudes de piernas o catetos del mayor triángulo rectángulo que puede inscribirse en su sección transversal.

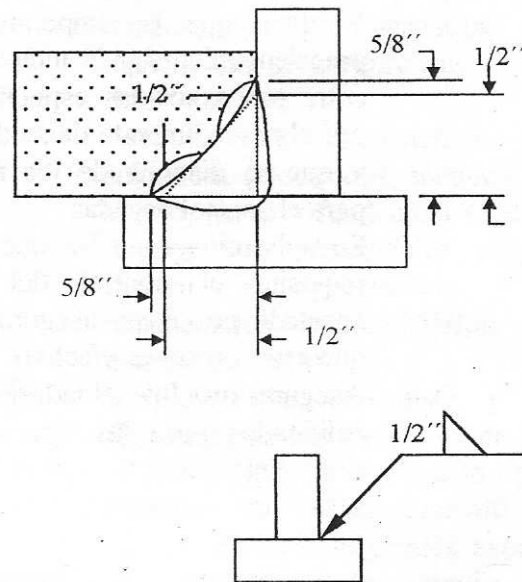
De acuerdo con lo anterior, al medir las soldaduras de filete, el inspector debe determinar la longitud de los catetos de los triángulos rectángulos que pueden inscribirse en sus secciones transversales.

Estas mediciones se realizan de manera práctica con calibradores de soldadura de filete, que son de dos tipos, uno para medir filetes cóncavos y otros para medir filetes convexos y planos. Las siguientes figuras ilustran el uso de cada tipo.



- (a) Calibrador de filetes cóncavos
- (b) Calibrador de filetes convexos y planos

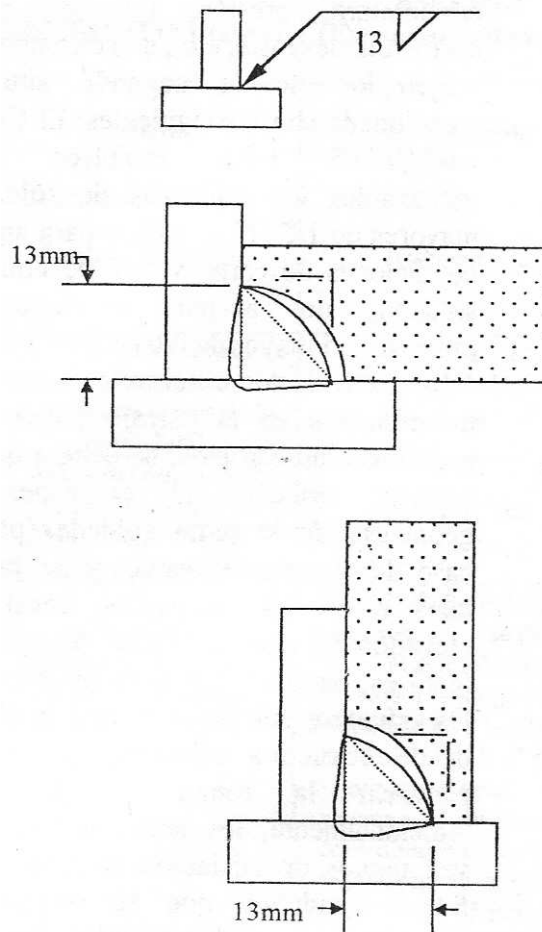
Figura 11.1-Calibradores de soldaduras de filete



Nota 1: Este es el tipo de calibrador que debe usarse para filetes cóncavos. Es incorrecto medir un filete cóncavo con calibrador para filetes convexos.

Nota 2: Este calibrador determina el tamaño real del filete (1/2"), es decir, el cateto del triángulo rectángulo de mayor tamaño que se puede inscribir en la sección transversal de la soldadura, no la longitud de la pierna (5/8").

Figura 11.2- Medición de una soldadura de filete cóncava



Nota1: Este es el tipo de calibrador que debe usarse para filetes convexos y planos. Es incorrecto medir un filete convexo con calibrador para filetes cóncavos.

Nota2: Para soldadura de filete de piernas iguales (por especificación), deben medirse las dos piernas del filete; el tamaño real es el del cateto menor.

Figura 11.3- Medición de una soldadura de filete convexa

Mediciones con calibrador de soldaduras “Bridge Cam”

Características como la profundidad de los socavados, la altura de los refuerzos y la desalineación o escalonamiento pueden ser evaluados con los calibradores adecuados para tales propósitos. Un instrumento ampliamente usado para cubrir estas y otras necesidades de inspección es el calibrador tipo “Bridge Cam”, cuyo uso se ilustra en las siguientes figuras.



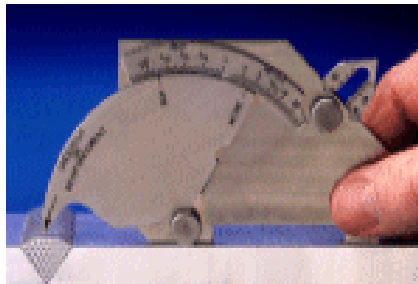


Figura 11.4 - Determinación de la Altura del Refuerzo de Soldadura

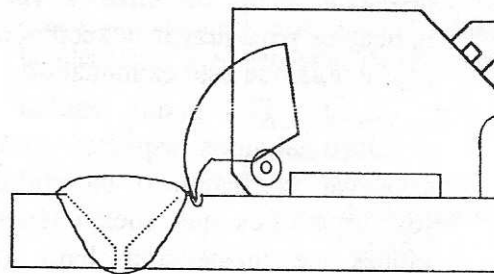


Figura 11.5- Medición de la profundidad de un socavado

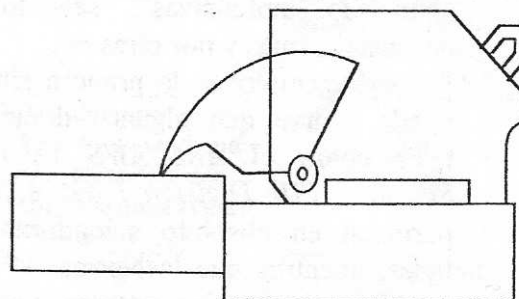


Figura 11.5-Evaluación del alineamiento en una junta a tope antes de ser soldada

Comparación de los criterios de aceptación de algunas normas para las discontinuidades más comunes

A fin de ofrecer al inspector de soldadura una visión de conjunto de los criterios de aceptación que algunas normas establecen para las discontinuidades más comunes que pueden detectarse por medio de inspección visual (o en combinación con otros métodos no destructivos), en la tabla 11.1 se incluye un “cuadro comparativo” de los respectivos criterios de aceptación.

Esta tabla tiene un carácter didáctico, cuyo propósito es mostrar las diferencias de los criterios de aceptación de algunos de los documentos más empleados en inspección de soldadura. Durante la realización de sus actividades, el inspector debe remitirse a las normas aplicables para juzgar la aceptación de las soldaduras que esté examinando.

La tabla 11.1 puede resultar útil para clarificar algunos aspectos que pueden provocar confusión o incertidumbre en los inspectores que suelen tener asignaciones de inspección bajo diferentes normas. Entre estos aspectos se puede mencionar el hecho de que entre un documento y otro, los criterios de aceptación para una misma discontinuidad sean diferentes, o que discontinuidades en apariencia “inofensivas”, sean toleradas por unas normas y por otras no.

Como ejemplo de la primera situación, puede citarse que algunos documentos tales como el AWS D1.1 y la Sección VIII División I del ASME, no permitan en absoluto soldaduras agrietadas, mientras que la norma API 1104 permite grietas en los cráteres si éstas son menores a $5/32''$ (3,96mm).

La justificación al hecho anterior reside en que cada norma está prevista para aplicaciones específicas, en las cuales, las condiciones de servicio, tales como temperatura, presión, tipo de carga, corrosión, desgaste, etc., son diferentes.

Ejemplos de la segunda situación mencionada son los siguientes: El código AWS D1.1 establece como rechazables los refuerzos de soldadura mayores a $1/8''$ (3,2mm), y para algunas condiciones de carga y tipo de conexión soldada, no acepta socavados de profundidad mayor a $0,010''$ (0,25mm).

La razón de los criterios de aceptación mencionados en el párrafo anterior, en apariencia tan estrictos, se debe a que los cambios bruscos en el espesor y geometría de la junta soldada (para el caso de refuerzos excesivos) y las ranuras tales como los socavados, constituyen elevadores o concentradores de esfuerzos (esto es, puntos localizados en los cuales los esfuerzos son mayores que en el resto de la estructura soldada), que pueden provocar la rotura de la pieza.

Adicionalmente, los socavados constituyen puntos de iniciación de fracturas de fatiga, condición que se presenta en conexiones cíclicamente cargadas (sometidas a esfuerzos que actúan periódica y alternativamente, tensión y compresión por ejemplo).

Debe tenerse en cuenta que las normas están preparadas por equipos numerosos de gente altamente calificada, con niveles académicos superiores y experiencia de muchos años en empresas e instituciones de tecnología de vanguardia, y que las normas tienen la madurez de muchos años y constantemente son revisadas, actualizadas y mejoradas, por lo que siempre debe tener confianza en que cada norma es razonablemente correcta y segura.

Teniendo en cuenta que el propósito de la inspección de soldadura es determinar si los bienes soldados cumplen los criterios de aceptación especificados, el inspector debe asegurarse de que todos los requisitos establecidos se cumplen, y siempre debe tener presente que él no tiene autoridad ni prerrogativa para aceptar soldaduras que no satisfacen tales requisitos. Su responsabilidad es la de aplicar los criterios especificados. Así, desde este punto de vista, se dice que el inspector, no tiene criterio, aplica los criterios de las normas especificadas.

Otra consideración que debe tenerse siempre en cuenta, es que cada trabajo o proyecto está regulado por la norma correspondiente. Nunca deben tomarse criterios de aceptación de una norma diferente a la específicamente aplicable al trabajo realizado e inspeccionado.

Las declaraciones anteriores (subrayadas) pueden parecer necias y exageradas, pero no es poco frecuente encontrar inspectores que durante sus asignaciones aplican criterios de aceptación diferentes a los que deben aplicar: por ejemplo, evalúan líneas de tuberías con requisitos de códigos estructurales o viceversa.

También es común encontrar inspectores que aceptan soldaduras con refuerzo excesivo (porque desconocen el criterio de aceptación, debido a presiones de los fabricantes, que suelen esgrimir argumentos como el siguiente: “un refuerzo mayor no es perjudicial, por el contrario, proporciona mayor resistencia a la junta”) o socavados que le parecen poco profundos.

Discontinuidad	AWS D1.1 (Estructuras de Acero)	ASME BPVC Sección VIII, División I Recipientes a Presión	API 1104 Líneas de tubería para gas y petróleo
Grietas	No aceptable	No aceptable	5/32" (4mm) para grietas en el cráter (detectadas con otro método de NDT)
Fusión incompleta	No aceptable	No aceptable	1" de longitud (detectada con ayuda de otro método NDT)
Convexidad en soldadura de filete ("para" se refiere al ancho de la cara de la soldadura)	1/16" para 5/16" 1/8" para > 5/16" < 1" 3/16" para > 1"	No establecido	No establecido
Altura del refuerzo de soldadura de ranura máximo permitido	1/8" (3,2mm)	De 1/32" (0,8mm) a 6/16" (8mm) dependiendo del tipo de junta (véase UW-35)	De 1/32" (0,8mm) a 1/16" (1,6mm)
Socavado: máxima profundidad y longitud permitidas	1/32" (0,8mm) para espesores <1" (se permite 1/16" (1,6mm) máximo para una longitud de 2" en 12" de soldadura); 1/16" para espesores iguales o mayores a 1". Todo esto en conexiones no tubulares estáticamente cargadas. 0,010" (0,25mm) en miembros primarios cuando la soldadura es transversal a los esfuerzos de tensión, para todas las condiciones de carga en conexiones tubulares y no tubulares; 1/32" para todos los otros casos.	En términos generales, 1/32" (0,8mm) ó 10% (lo que resulte menor) del espesor nominal de las superficies adyacentes de la soldadura.	1/32" (0,8mm) o 12,5% del espesor de pared 1/6" (0,4mm) o de 6,5 a 12,5% del espesor de pared, de un máximo de 2" en una longitud de soldadura de 12" continuas. Aceptable si tiene una profundidad de 1/64" o menos, o 6,5% o menos del espesor de pared.
Porosidad	Alguna porosidad visible es permitida (véase tabla 6.1)	No establecido para porosidad visible	Alguna porosidad visible (con ayuda de líquidos penetrantes y partículas) Véase 6.3.8.2 y 6.3.8.3.
Falta de alineación	Máximo el 10% del espesor de la parte más delgada de la junta, pero en ningún caso mayor a 1/8" (3,2mm)	De ¼ del espesor de pared a ¾", dependiendo de la categoría y del espesor de la junta (véase tabla UW-33)	1/16" (1,6mm)
Penetración incompleta de la junta	No aceptada en juntas de penetración completa.	No aceptable	1" de longitud (detectada con ayuda de radiografía)

Tabla 11.1 – Comparación de los criterios de aceptación de algunas normas para algunas discontinuidades