



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN

"CALIFICACION DE PROCEDIMIENTOS DE SOLDADURA PARA LAS
INDUSTRIAS PETROQUIMICAS Y GENERACION DE ENERGIA"

T E S I S

PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERO MECANICO ELECTRICO

P R E S E N T A:

ERIC DAVID ZENIL OTERO

ASESOR: ING. MARCOS BELISARIO GONZALEZ LORIA

CUAUTITLAN IZCALLI, EDO. DE MEX.

SEPTIEMBRE 2010



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas

Tesis Digitales

Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©

PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN
UNIDAD DE ADMINISTRACION ESCOLAR
DEPARTAMENTO DE EXAMENES PROFESIONALES

DEPARTAMENTO DE
EXAMENES PROFESIONALES
SUPERIORES CUAUTITLAN

ASUNTO: VOTOS APROBATORIOS

DRA. SUEMI RODRIGUEZ ROMO
DIRECTORA DE LA FES CUAUTITLAN
PRESENTE



DEPARTAMENTO DE
EXAMENES PROFESIONALES

ATN:L.A. ARACELI HERRERA HERNANDEZ
Jefa del Departamento de Exámenes
Profesionales de la FES Cuautitlán.

Que presenta el pasante Eric David Zenil Otero

Con número de cuenta: 405031632 para obtener el título de:

Ingeniero Mecanico Electrico

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO.

ATENTAMENTE

"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"

Cuautitlan Izcalli, Mex. a 18 de agosto del 2010.

PRESIDENTE Ing. Gabriel Vazquez Castillo

VOCAL Ing. Marcos Belisario Gonzalez Loria

SECRETARIO Ing. Fernando Fierro Tellez

1er SUPLENTE Ing. Cesar Sinhue Moreno Varela

2do SUPLENTE Ing. Gilberto Chavarria Ortiz

Con base en el Art. 28 del Reglamento General de Exámenes, nos permitimos comunicar a usted que revisamos la Tesis:

Calificación de procedimientos de soldadura para las
industrias petroquímicas y generación de energía.



DEDICATORIA:

Esta obra esta dedicada

A mi padre; Florencio Zenil Morales... Quien es la persona más grandiosa de la tierra, que junto a mamá Laura Otero Trejo, supieron estar a mi lado. Gracias por su comprensión y ayuda en momentos malos y menos malos. Me han enseñado a encarar las adversidades sin perder nunca la dignidad ni desfallecer en el intento. Me han dado todo lo que soy como persona, mis valores, mis principios, mi perseverancia y mi empeño, y todo ello con una gran dosis de amor y sin pedir nunca nada a cambio.

Eric Zenil Otero

AGRADECIMIENTOS

A mis PADRES:

Por haberme brindado la oportunidad de estudiar esta carrera, por su esfuerzo, dedicación y entera confianza. GRACIAS por su apoyo y orientación que me han dado, agradezco los consejos sabios que en el momento exacto han sabido darme para no dejarme caer y enfrentar los momentos difíciles. Gracias por los regaños que finalmente eran para guiarme en mi camino, por obligarme a terminar mi tarea antes de salir a jugar, y muchas cosas más que no terminaría de mencionar, gracias por los esfuerzos realizados para que yo lograra terminar mi carrera profesional siendo para mi la mejor herencia y sobre todo gracia por el amor que me han dado.

Sabiendo que jamás encontraré la forma de agradecer su constante apoyo y confianza, sólo espero que comprendan que mis ideales, esfuerzos y logros han sido también suyos e inspirados en ustedes

A mis COMPAÑEROS Y AMIGOS:

Gracias a los compañeros y amigos que logre dentro de esta gran escuela, por las grandes lecciones de vida que aprendí, gracias a su compañía, a sus buenos consejos y por esos malos y buenos momentos, recordare siempre todos los momentos felices y llenos de risas, todos los lugares recorridos, tantas aventuras, experiencias, desveladas y triunfos en el futbol (aunque hayan sido pocos), también en los momentos de presión y angustia en los cuales siempre siendo audaces logramos salir adelante, gracias amigos ustedes saben quienes son!!, también gracias a gabriela por siempre acompañarme con una palabra de aliento.

Agradezco sinceramente a mi asesor de tesis el Ing. Marcos Belisario, por su disposición, apoyo y confianza para la realización de este trabajo para llegar a la meta y obtener el título.

A la FES CUAUTITLAN:

Agradezco a esta noble institución por darme los conocimientos necesarios para el óptimo desempeño de mi profesión. Doy GRACIAS a mi segunda casa por todas las experiencias vividas tanto personales como educativas

A la UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO:

Por darme el honor de pertenecer a esta que es la máxima casa de estudios del país, donde se forjan sueños y obtienes la visión de ser mejor cada día, y así por su gran tradición me comprometo a demostrar que los profesionistas egresados de la UNAM somos personas capaces de ocupar los mas altos puestos dentro del ámbito profesional dentro de cualquier empresa. GRACIAS por ser la institución que me permitió lograr uno de mis más grandes sueños en la vida. Finalmente orgulloso al ser un hijo de esta gran institución tendré siempre presente este lema en mi mente y corazón.

“POR MI RAZA HABLARA EL ESPÍRITU”

Eric Zenil Otero



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN

INGENIERIA MECANICA ELECTRICA

TESIS: CALIFICACION DE PROCEDIMIENTOS DE SOLDADURA PARA LAS INDUSTRIAS
PETROQUIMICAS Y GENERACION DE ENERGIA



PRESENTA:

ERIC DAVID ZENIL OTERO

INTRODUCCIÓN

Los voceros de las entidades y organismos encargados de planear y dirigir el desarrollo industrial, científico y tecnológico en los países desarrollados económicamente, en sus discursos, planteamientos y publicaciones, cada vez con mayor frecuencia se refieren al hecho de que la sociedad tecnológica de la actualidad depende críticamente de disciplinas avanzadas de ingeniería en áreas tales como la generación y distribución de energía, la construcción de edificios y el transporte; y que la ingeniería, a su vez depende de la soldadura como un proceso clave para la fabricación y construcción de los bienes que satisfacen estas necesidades de la sociedad.

Asimismo, tales entidades reconocen: que la mayoría de las uniones se sueldan manualmente y que la calidad de estas uniones soldadas está determinada, en gran medida, por la habilidad del soldador; que es difícil controlar y asegurar la calidad de las mismas y que la seguridad y confiabilidad de los bienes soldados es una consecuencia de la integridad de las soldaduras. Así pues, esta situación compleja y crítica impone los retos de asegurar que todos los bienes soldados cumplan con los requisitos de calidad especificados, pero particularmente aquellos tales como reactores nucleares, estructuras de plataformas marinas y tuberías que conducen gas combustible- que representan riesgos para la seguridad de empleados y la población en general.

Los organismos y autoridades que regulan las actividades relacionadas con la soldadura han resuelto esta situación de la manera más práctica posible, y ésta, en términos generales, consiste en la preparación y calificación de los procedimientos de soldadura adecuados, el entrenamiento y calificación de la habilidad de los soldadores y en verificar de que todas las actividades

relacionadas con la fabricación y construcción cumplan con los requisitos especificados. Esta verificación debe ser realizada por inspectores de soldadura altamente calificados.

Los países desarrollados disponen de los recursos para preparar y publicar las regulaciones y normas necesarias, así como para establecer esquemas de entrenamiento, calificación y certificación del personal requerido a fin de desplegar e implantar efectivamente las disposiciones acordadas. En los Estados Unidos de América, tales actividades son coordinadas o conducidas por la Sociedad Americana de Soldadura, y en Europa, cada país cuenta con los institutos y sociedades técnicas correspondientes, además de organizaciones internacionales, tales como la Federación Europea para la Soldadura, Unión y Corte.

En México, al igual que en otros países en vías de desarrollo, los recursos económicos, tecnológicos y humanos han sido insuficientes para encarar los retos descritos anteriormente, y aunque se han realizado varios esfuerzos por integrar organizaciones que se aboquen a resolver las situaciones asociadas con esta problemática, tales intentos, debido a deficiencias de liderazgo, consenso, planeación y recursos, no han tenido los resultados previstos, de manera que persisten los problemas y vacíos que han impedido la formulación de directrices efectivas y la preparación y emisión de las normas y regulaciones apropiadas, por lo que el desarrollo e implantación de los programas de entrenamiento, calificación y certificación de personal de inspección aún se encuentra en proceso de maduración.

Debido a que los procedimientos y especificaciones del proceso de soldadura son una parte esencial en la calidad de una soldadura. Este trabajo permite

introducirse en el campo de la calificación de soldaduras para comprender la utilización de los códigos y estándares (ASME, AWS, ANSI, API...) que intervienen directamente en el proceso de fabricación y aplicación de soldadura. Los códigos también disponen de parámetros de calificación para distintos procesos de soldadura, así como para distintos tipos de soldadura (ranura, filete, etc.) por tal motivo, esta obra se centrará en analizar los correspondientes y más usuales dentro del área petroquímica y generación de energía esperando sea una herramienta de gran ayuda para comprender y dirigir la calificación de procedimientos de soldadura.

OBJETIVO

Antes de efectuar una soldadura, se deben calificar las especificaciones de su procedimiento, con el fin de comprobar la calidad requerida para dicha soldadura dentro de la producción. La calificación de un procedimiento de soldadura, consiste en ejecutar una muestra de él, realizarle los ensayos determinados por el código de soldadura correspondiente y analizar si es apto o no para una aplicación en particular.

El objetivo de esta obra es presentar conceptos básicos de la aplicación del Código ASME ANSI y AWS y servir como herramienta en la calificación de procedimientos de soldaduras, operadores y soldadores, enfocándose a los distintos procesos de Soldadura como lo son SMAW, GMAW, FCAW, GTAW, PAW y SAW que son los mas habituales dentro de las industrias petroquímicas y de generación de energía.

MARCO TEORICO

En esta tesis se hablara de los procesos de soldadura más usuales dada la efectividad y factibilidad, específicamente, el proceso de Soldadura de Arco con Electrodo Revestido, SMAW (Shielded Metal ArcWelding), Soldadura de Arco con Gas Protector, GMAW (Gas Metal ArcWelding), Soldadura por arco con núcleo de fundente FCAW (flux coredarcwelding), soldadura por arco con electrodo de tungsteno GTAW (gas tungstenarcwelding), proceso de soldadura por arco plasma PAW (plasma arcwelding) y Soldadura de arco sumergido SAW (sumergedarcwelding).

Los principales códigos de calificación de soldadura utilizados en nuestro país son: el AWS (American Welding Society), el ASME (American Society of Mechanical Engineers) y el API (American Petroleum Institute) aparte de algunas normas mexicanas. Se elige el código de acuerdo al tipo de servicio que ofrecerá la soldadura; es decir, las características de los esfuerzos y el metal base usado.

Para tal efecto, se plantean primeramente conceptos básicos de soldadura así como sus diferencias y su teoría metalúrgica, avanzando así hasta llegar a la sección donde se definen las especificaciones de los procedimientos de soldadura (WPS) que se designan a los soldadores que ejecutarán los procedimientos elegidos; y luego, se determinan los tipos de ensayos de calificación por aplicar en las soldaduras y el número de probetas a fabricar. Así se realizan las pruebas de calificación y finalmente son analizados sus resultados.

Los procedimientos de soldadura que aprueben todos los ensayos recibirán el correspondiente Certificado de Calificación del Procedimiento (PQR), y el soldador u operador que lo efectuó obtendrá el respectivo Registro de Calificación de Operadores y Soldadores (WQR).

El personal que lleve a cabo el procedimiento de soldadura sometido a calificación estará constituido por soldadores expertos; es decir, que estén facultados para soldar en todo tipo de posición y con los procesos de soldadura más empleados; deberán poseer certificados de calificación o probar su experiencia laboral.

INDICE

TEMAS	PAG.
RECONOCIMIENTOS	
INTRODUCCION	
OBJETIVO	
MARCO TEORICO	
1 ANTECEDENTES	1
1.01 Historia y evolución de la soldadura	1
2 TERMINOS Y DEFINICIONES DE SOLDADURA	
2.01 Tipos de juntas y tipos de soldaduras	6
2.02 Parte de las juntas	7
3 SIMBOLOS DE SOLDADURA Y EXAMENES NO DESTRUCTIVOS	15
3.01 Símbolo de soldadura	16
3.02 Disposiciones generales	20
3.03 Soldadura en filete	24
3.04 Soldadura de ranura	27
3.05 Símbolo de exámenes no destructivos	29
3.06 Símbolos suplementarios	33
3.07 Extensión y localización de exámenes no destructivos	34
4 METALURGIA DE SOLDADURA	36
4.01 Estructura cristalina	36
4.02 Aleaciones	41
4.03 Difusión	43
4.04 Propiedades de los metales y aleaciones	44
4.05 Factores que determinan las propiedades de las aleaciones	44
4.06 Metalurgia básica de los aceros	47
4.07 Clasificación de los aceros	60
4.08 Tratamientos térmicos de los aceros	69
4.09 Metalurgia de la soldadura	72
4.10 Transformaciones del acero durante la soldadura	78
4.11 Soldabilidad y carbono equivalente	80
4.12 Control de las propiedades de las juntas soldadas	82
4.13 Agrietamiento por hidrogeno	84
4.14 Soldadura de aceros inoxidables	86
5 CODIGOS NORMAS Y ESPECIFICACIONES.	91
5.01 Origen de las normas	92
5.02 códigos normas y especificaciones	96
5.03 Aplicabilidad de las normas y claves para su interpretación	97

5.04	Algunas normas sobre equipos y estructuras soldadas	99
5.05	Código ANSI/ASME para calderas y recipientes a presión	102
5.06	Código ANSI/ASME B31 para tuberías sujetas a presión	105
5.07	Norma API1104 para líneas de tubería e instalaciones relacionadas	110
5.08	Requisitos de las normas para los materiales y su control	112
5.09	Las especificaciones ASTM	112
5.10	Requisitos sobre inspección y pruebas	118
5.11	Normas para equipos y tuberías en servicio	121
6	PROCESOS DE SOLDADURA	124
6.01	Procesos de soldadura y métodos de aplicación	125
6.02	Naturaleza del arco eléctrico	133
6.03	Proceso de soldadura por arco metálico protegido con electrodo recubierto(shield metal arcwelding- SMAW)	142
6.04	Variables específicas	146
6.05	Condiciones de alineamiento y secado de electrodos	147
6.06	Consumibles, especificaciones y clasificaciones.	148
6.07	Proceso de soldadura por arco con alambre continuo protegido con gas (gas metal arcwelding-GMAW)	157
6.08	Variables específicas	159
6.09	Consumibles, especificaciones y clasificaciones.	167
6.10	Proceso de soldadura por arco con electrodo tubular con núcleo de fundente (flux coredarcwelding- FCAW)	170
6.11	Variables específicas	174
6.12	Consumibles, especificaciones y clasificaciones.	178
6.13	Proceso de soldadura por arco de tungsteno protegido con gas (gas tungstenarcwelding-GTAW)	181
6.14	Variables específicas	185
6.15	Consumibles, especificaciones y clasificaciones.	192
6.16	Proceso de soldadura por arco plasma (plasma arcwelding- PAW)	196
6.17	Variables específicas	201
6.18	Consumibles, especificaciones y clasificaciones.	203
6.19	Proceso de soldadura por arco sumergido (submergedarcwelding-SAW)	210
6.20	Variables específicas	215
6.21	Consumibles, especificaciones y clasificaciones.	215
7	CALIFICACION DE PROCEDIMIENTOS Y PERSONAL DE SOLDADURA	221
7.01	Variables de soldadura	222
7.02	Requisitos de calificación de procedimientos y personal de soldadura	222
7.03	Especificación de procedimientos de soldadura - EPS (weldingprocedurespecification-WPS)	223
7.04	Calificación de procedimientos de soldadura	225
7.05	Especificación del procedimiento de soldadura precalificado	227
7.06	Especificaciones estándar de procedimientos de soldadura	228
7.07	Calificación de la habilidad del personal de soldadura	228
7.08	Variables de soldadura a incluir en los documentos de calificación	231
7.09	Responsabilidades con respecto a la calificación de procedimientos y personal de	243

soldadura

8	PRUEBAS DESTRUCTIVAS	244
8.01	Pruebas destructivas aplicables a la soldadura	246
8.02	Pruebas mecánicas	246
8.03	Pruebas químicas	256
8.04	Pruebas metalografías	258
9	EXAMENES NO DESTRUCTIVOS	261
9.01	Exámenes no destructivos	263
9.02	Inspección visual	267
9.03	Líquidos penetrantes	271
9.04	Partículas magnéticas	278
9.06	Radiografía	285
9.05	Ultrasonido	292
9.06	Requisitos para calificación de personal END	299
9.07	Requisitos para la conducción del END	303
10	INSPECCION DE SOLDADURA	304
10.01	Secuencia de las actividades de inspección	305
10.02	Discontinuidades de las juntas soldadas	308
10.03	Discontinuidades relacionadas con requisitos dimensionales	327
10.04	Discontinuidades en la estructura y propiedades en las juntas soldadas	330
10.05	Discontinuidades del metal base	331
10.06	Uso de calibradores de soldadura	333
10.07	Comparación de criterios de aceptación de algunas normas para las discontinuidades más comunes	336
	Anexo 1, especificaciones estándar ASTM	340
	Anexo2, tabla comparativa de durezas	350
	Anexo 3, precalentamiento	352
	Anexo 4, factores de conversión	355
	BIBLLIOGRAFIA	358

TEMA I

ANTECEDENTES DE LA SOLDADURA

1.01 HISTORIA Y EVOLUCION DE LA SOLDADURA

La **soldadura** es un proceso de fabricación en donde se realiza la unión de dos materiales, (generalmente metales o termoplásticos), usualmente logrado a través de la coalescencia (fusión), en la cual las piezas son soldadas fundiendo ambas y agregando un material de relleno fundido (metal o plástico), el cual tiene un punto de fusión menor al de la pieza a soldar, para conseguir un baño de material fundido (el *baño de soldadura*) que, al enfriarse, se convierte en una unión fija. A veces la presión es usada conjuntamente con el calor, o por sí misma, para producir la soldadura. Esto *está en contraste con la soldadura blanda (en inglés soldering) y la soldadura fuerte (en inglés brazing), que implican el derretimiento de un material de bajo punto de fusión entre piezas de trabajo para formar un enlace entre ellos, sin fundir las piezas de trabajo.*

Muchas fuentes de energía diferentes pueden ser usadas para la soldadura, incluyendo una llama de gas, un arco eléctrico, un láser, un rayo de electrones, procesos de fricción o ultrasonido. La energía necesaria para formar la unión entre dos piezas de metal generalmente proviene de un arco eléctrico. La energía para soldaduras de fusión o termoplásticos generalmente proviene del contacto directo con una herramienta o un gas caliente. Mientras que con frecuencia es un proceso industrial, la soldadura puede ser hecha en muchos ambientes diferentes, incluyendo al aire libre, debajo del agua y en el espacio. Sin importar la localización, sin embargo, la soldadura sigue siendo peligrosa, y se deben tomar precauciones para evitar quemaduras, descarga eléctrica, humos venenosos, y la sobreexposición a la luz ultravioleta.

Hasta el final del siglo XIX, el único proceso de soldadura era la soldadura de fragua, que los herreros han usado por siglos para juntar metales calentándolos y golpeándolos. La soldadura por arco y la soldadura a gas estaban entre los primeros procesos en desarrollarse tardíamente en el siglo, siguiendo poco después la soldadura por resistencia. La tecnología de la soldadura avanzó rápidamente durante el principio del siglo XX mientras que la Primera Guerra Mundial y la Segunda Guerra Mundial condujeron la demanda de



métodos de junta confiables y baratos. Después de las guerras, fueron desarrolladas varias técnicas modernas de soldadura, incluyendo métodos manuales como la Soldadura manual de metal por arco, ahora uno de los más populares métodos de soldadura, así como procesos semiautomáticos y automáticos tales como Soldadura GMAW, soldadura de arco sumergido, soldadura de arco con núcleo de fundente y soldadura por electroescoria. Los progresos continuaron con la invención de la soldadura por rayo láser y la soldadura con rayo de electrones a mediados del siglo XX. Hoy en día, la ciencia continúa avanzando. La soldadura robotizada está llegando a ser más corriente en las instalaciones industriales, y los investigadores continúan desarrollando nuevos métodos de soldadura y ganando mayor comprensión de la calidad y las propiedades de la soldadura. Se dice que es un sistema porque intervienen los elementos propios de este, es decir, las 5 M: mano de obra, materiales, máquinas, medio ambiente y medios escritos (procedimientos). La unión satisfactoria implica que debe pasar las pruebas mecánicas (tensión y doblez). Las técnicas son los diferentes procesos (SMAW, SAW, GTAW, etc.) utilizados para la situación más conveniente y favorable, lo que hace que sea lo más económico, sin dejar de lado la seguridad.

La historia de la unión de metales se remonta a varios milenios, con los primeros ejemplos de soldadura desde la edad de bronce y la edad de hierro en Europa y el Oriente Medio. La soldadura fue usada en la construcción del Pilar de hierro de Delhi, en la India, erigido cerca del año 310 y pesando 5.4 toneladas métricas.¹ La Edad Media trajo avances en la soldadura de fragua, con la que los herreros repetidamente golpeaban y calentaban el metal hasta que ocurría la unión. En 1540, Vannoccio Biringuccio publicó a *De la pirotechnia*, que incluye descripciones de la operación de forjado. Los artesanos del Renacimiento eran habilidosos en el proceso, y la industria continuó creciendo durante los siglos siguientes. Sin embargo, la soldadura fue transformada durante el el siglo XIX. En 1800, Sir Humphry Davy descubrió el arco eléctrico, y los avances en la soldadura por arco continuaron con las invenciones de los electrodos de metal por un ruso, Nikolai Slavyanov, y un americano, C. L. Coffin a finales de los años 1800, incluso como la soldadura por arco de carbón, que usaba un electrodo de carbón, ganó popularidad. Alrededor de 1900, A. P. Strohmenger lanzó un electrodo de metal recubierto en Gran Bretaña, que dio un arco más estable, y en 1919, la soldadura de corriente alterna fue inventada por C. J. Holslag, pero no llegó a ser popular por otra década. La soldadura por resistencia también fue desarrollada durante las décadas finales del siglo XIX, con las primeras patentes yendo a Elihu Thomson en 1885, quien



produjo posteriores avances durante los siguientes 15 años. La soldadura de termita fue inventada en 1893, y alrededor de ese tiempo, se estableció otro proceso, la soldadura a gas. El acetileno fue descubierto en 1836 por Edmund Davy, pero su uso en la soldadura no fue práctico hasta cerca de 1900, cuando fue desarrollado un soplete conveniente.⁴ Al principio, la soldadura de gas fue uno de los más populares métodos de soldadura debido a su portabilidad y costo relativamente bajo. Sin embargo, a medida que progresaba el siglo 20, bajó en las preferencias para las aplicaciones industriales. En gran parte fue sustituida por la soldadura de arco, en la medida que continuaron siendo desarrolladas las cubiertas de metal para el electrodo (conocidas como fundente), que estabilizan el arco y blindaban el material base de las impurezas.

La Primera Guerra Mundial causó un repunte importante en el uso de los procesos de soldadura, con las diferentes fuerzas militares procurando determinar cuáles de los varios procesos nuevos de soldadura serían los mejores. Los británicos usaron primariamente la soldadura por arco, incluso construyendo una nave, el Fulagar, con un casco enteramente soldado. Los estadounidenses eran más vacilantes, pero comenzaron a reconocer los beneficios de la soldadura de arco cuando el proceso les permitió reparar rápidamente sus naves después de los ataques alemanes en el puerto de Nueva York al principio de la guerra. También la soldadura de arco fue aplicada primero a los aviones durante la guerra, pues algunos fuselajes de aeroplanos alemanes fueron contruidos usando el proceso. Durante los años 1920, importantes avances fueron hechos en la tecnología de la soldadura, incluyendo la introducción de la soldadura automática en 1920, en la que el alambre del electrodo era alimentado continuamente. El gas de protección se convirtió en un tema recibiendo mucha atención, mientras que los científicos procuraban proteger las soldaduras contra los efectos del oxígeno y el nitrógeno en la atmósfera. La porosidad y la fragilidad eran los problemas primarios, y las soluciones que desarrollaron incluyeron el uso del hidrógeno, argón, y helio como atmósferas de soldadura.

Durante la siguiente década, posteriores avances permitieron la soldadura de metales reactivos como el aluminio y el magnesio. Esto, conjuntamente con desarrollos en la soldadura automática, la corriente alterna, y los fundentes alimentaron una importante extensión de la soldadura de arco durante los años 1930 y entonces durante la Segunda Guerra Mundial.



A mediados del siglo XX, fueron inventados muchos métodos nuevos de soldadura. 1930 vio el lanzamiento de la soldadura de perno, que pronto llegó a ser popular en la fabricación de naves y la construcción. La soldadura de arco sumergido fue inventada el mismo año, y continúa siendo popular hoy en día. En 1941, después de décadas de desarrollo, la soldadura de arco de gas tungsteno fue finalmente perfeccionada, seguida en 1948 por la soldadura por arco metálico con gas, permitiendo la soldadura rápida de materiales no ferrosos pero requiriendo costosos gases de blindaje. La soldadura de arco metálico blindado fue desarrollada durante los años 1950, usando un fundente de electrodo consumible cubierto, y se convirtió rápidamente en el más popular proceso de soldadura de arco metálico. En 1957, debutó el proceso de soldadura por arco con núcleo fundente, en el que el electrodo de alambre auto blindado podía ser usado con un equipo automático, resultando en velocidades de soldadura altamente incrementadas, y ése mismo año fue inventada la soldadura de arco de plasma. La soldadura por electroescoria fue introducida en 1958, y fue seguida en 1961 por su prima, la soldadura por electrogas.

Otros desarrollos recientes en la soldadura incluyen en 1958 el importante logro de la soldadura con rayo de electrones, haciendo posible la soldadura profunda y estrecha por medio de la fuente de calor concentrada. Siguiendo la invención del láser en 1960, la soldadura por rayo láser debutó varias décadas más tarde, y ha demostrado ser especialmente útil en la soldadura automatizada de alta velocidad,. Sin embargo, ambos procesos continúan siendo altamente costosos debido al alto costo del equipo necesario, y esto ha limitado sus aplicaciones.



TEMA 2

TERMINOS Y DEFINICIONES DE SOLDADURA

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 ANSI/AWS 3.O, "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. La Norma Mexicana correspondiente es la NMX-H-93 "Soldadura - términos y definiciones", y fue preparada por el Comité Técnico de Normalización de la Industria Siderúrgica (CTNIS) de la Cámara Nacional de la Industria del Hierro y el Acero (CANACERO).

El Ingeniero en soldadura, dada la relevancia que su participación tiene en la fabricación y construcción de bienes que se 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, 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 clarificar su significado



2.01 TIPOS DE JUNTAS Y TIPOS DE SOLDADURAS junta (joint)

Es la unión de los miembros, o de sus extremos, que van a ser unidos o que han sido unidos. Existen cinco tipos básicos de junta: junta a tope (butt joint), junta en esquina (corner joint), junta en "T" (T-joint), junta de traslape (lap joint) y junta de borde o de 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 2.0 muestra de manera gráfica las características de cada tipo. Existen otros tipos de junta, tales como las juntas abocinadas o de pestaña (flanged joints) y juntas empalmadas a tope (spliced butt joints), pero éstas son formas o variantes de los cinco tipos ya mencionados

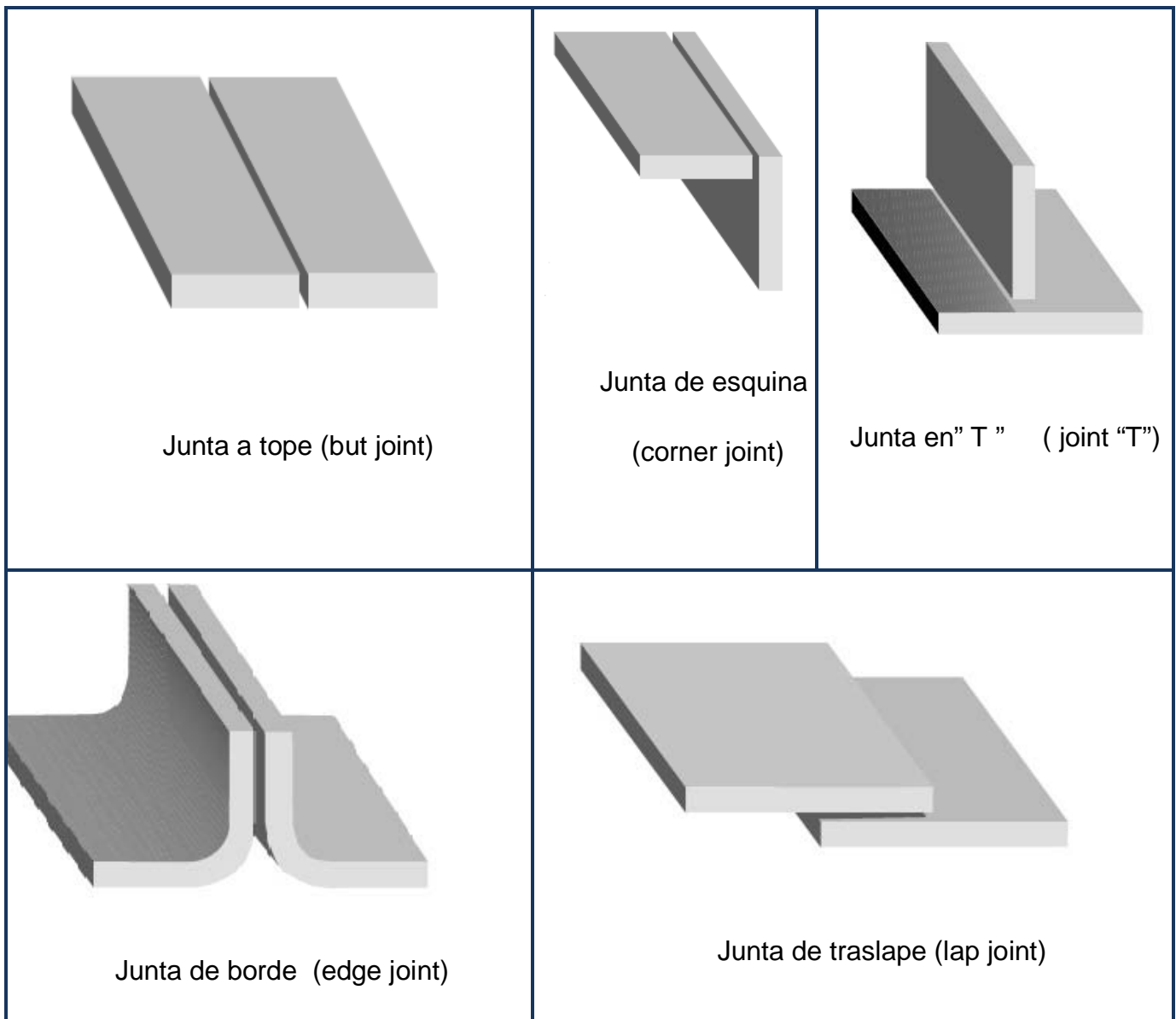
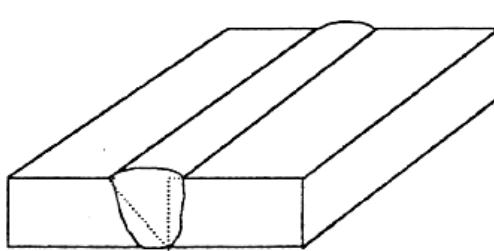


Fig. 2.0 TIPOS DE JUNTAS

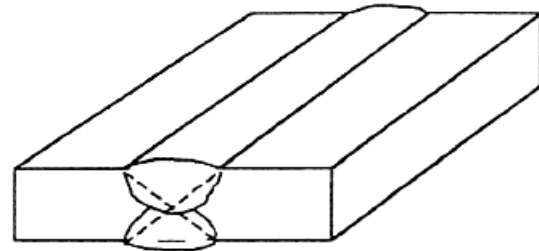


Tipos de soldadura

Según la forma, la sección transversal del metal de soldadura y otras características, existen los siguientes tipos de soldadura: de ranura (groove), de filete (fillet), de tapón (plug), de botón (slot), de pernos (stud), de puntos o proyección (spot or projection), de respaldo (backing weld), en el respaldo (back weld), de costura (seam), de recubrimiento (surfacing) y de borde o 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: a escuadra o cuadrada (square), de bisel (bevel), en "V" (V-groove weld), en "J" (J-groove weld), en "U" (U-groove weld), abocinado en bisel (flare-bevel-groove weld) y abocinado en "V" (flare-V-groove weld). Adicionalmente, las soldaduras antes mencionadas pueden ser dobles o sencillas.



Soldadura de ranura en bisel sencillo



Soldadura de ranura en doble "V"

Fig. 2.1 EJEMPLOS DE SOLDADURAS DE RANURA

Los tipos específicos de soldadura aplicables a cada junta están definidos en las normas sobre términos.

2.02 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 2.2 indica algunos de estos elementos en una junta aún sin soldarse.



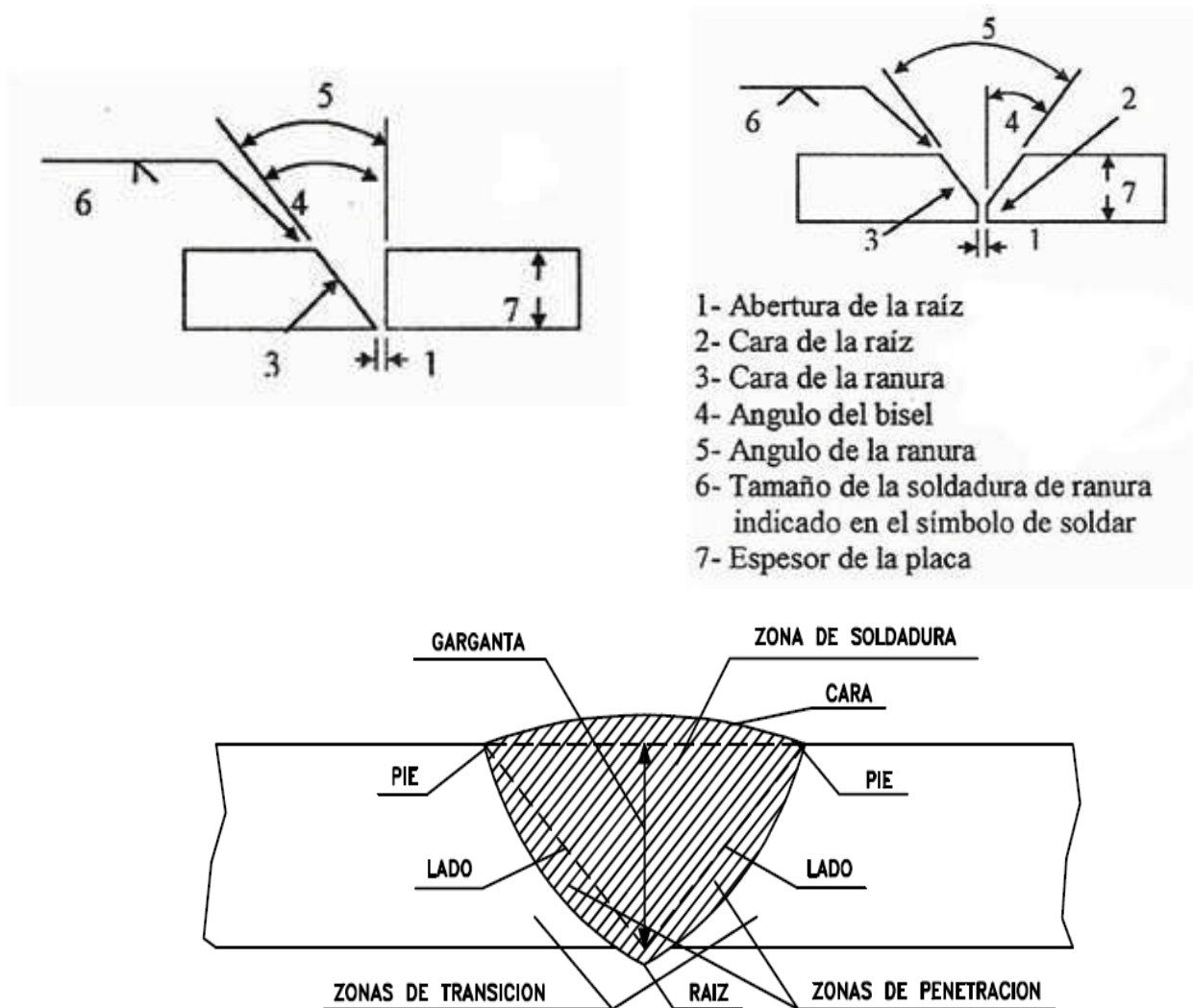
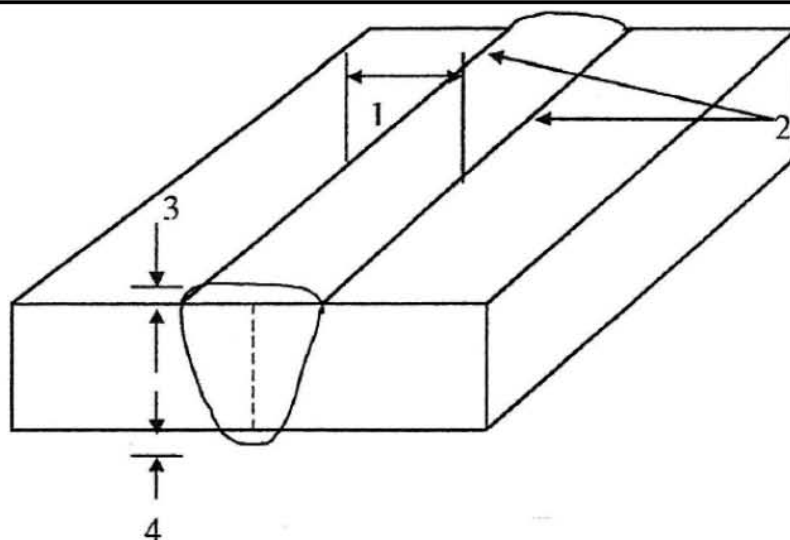


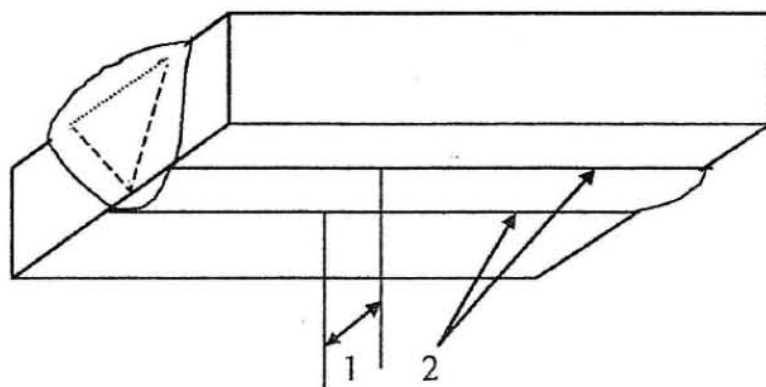
Fig. 2.2 PARTES DE LAS JUNTAS A TOPE

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 y rasgos a fin de describir e interpretar toda la información relativa a las juntas ya soldada. En las soldaduras de ranura, algunas de estas partes son el pie, la cara y el refuerzo de la soldadura y la superficie de la raíz; y en las soldaduras de filete, algunas de estas partes son: la pierna, el tamaño y la garganta teórica. Las figuras 2.3 a 2.5 ilustran la ubicación, nombre y características de algunos componentes de las juntas soldadas, pero se hace énfasis en el sentido de que se debe remitirse a las normas referidas a fin de conocer con precisión el significado de los términos incluidos en tales figuras.

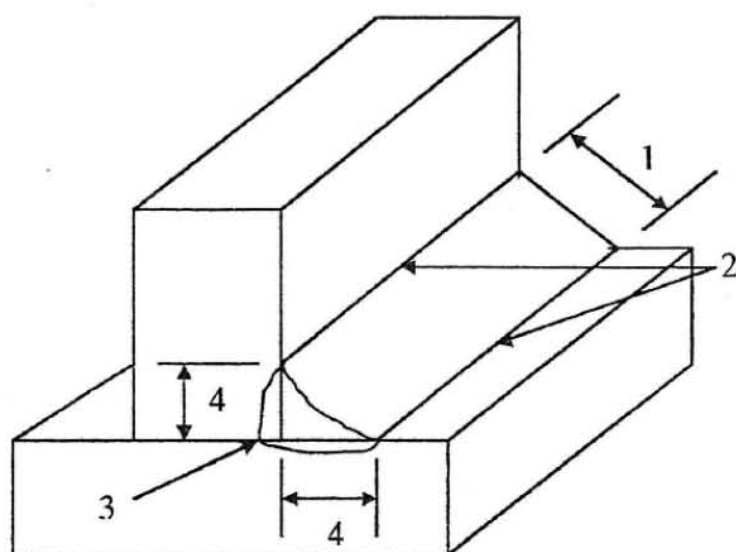




- 1.- Cara de la soldadura
- 2.- Pie de la soldadura
- 3.- Refuerzo de la cara
- 4.- Refuerzo de la raíz



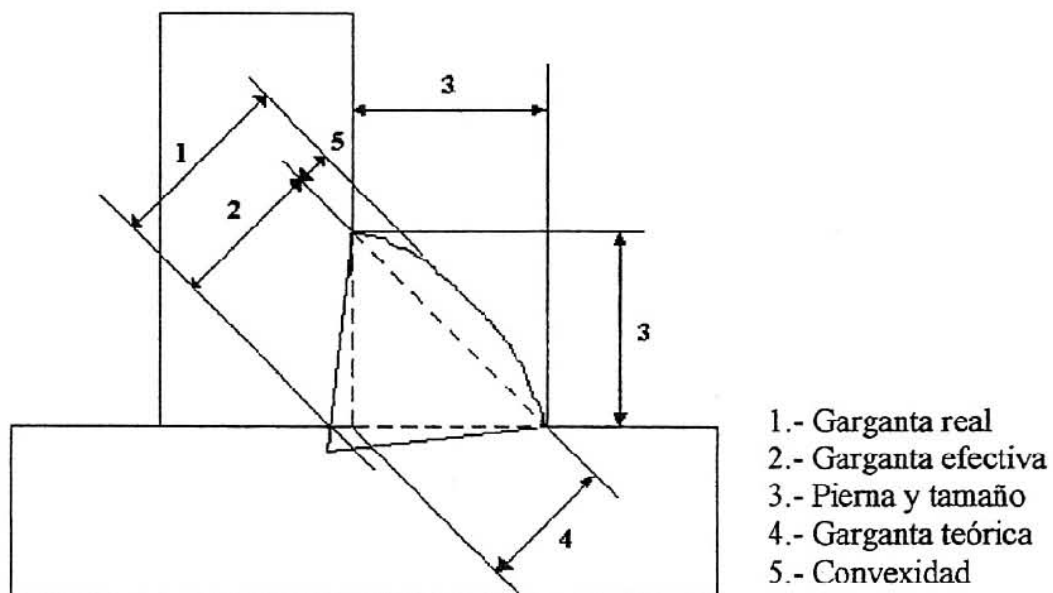
- 1.- Superficie de la raíz
- 2.- Raíz de la soldadura



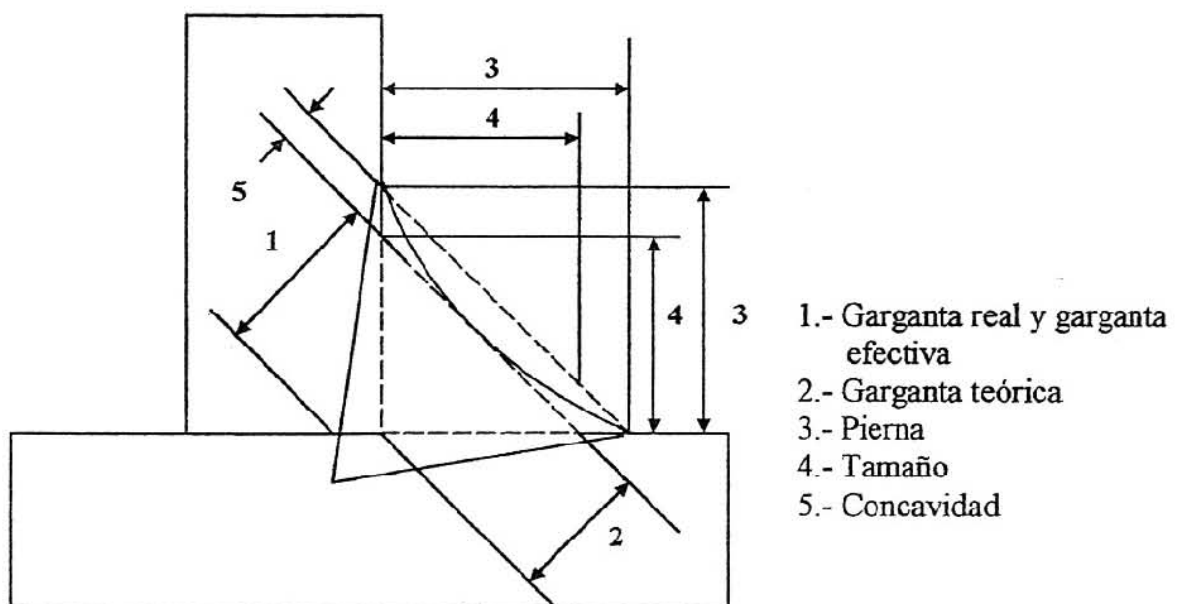
- 1.- Cara de la soldadura
- 2.- Pie de la soldadura
- 3.- Raíz de la soldadura
- 4.- Pierna de la soldadura

FIG. 2.3 PARTES DE LA SOLDADURA





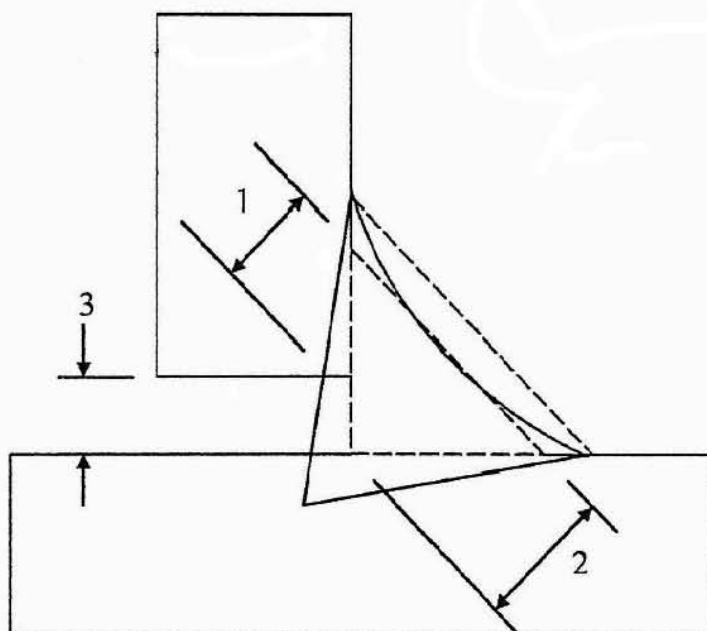
Soldadura de filete convexo



Soldadura de filete cóncavo

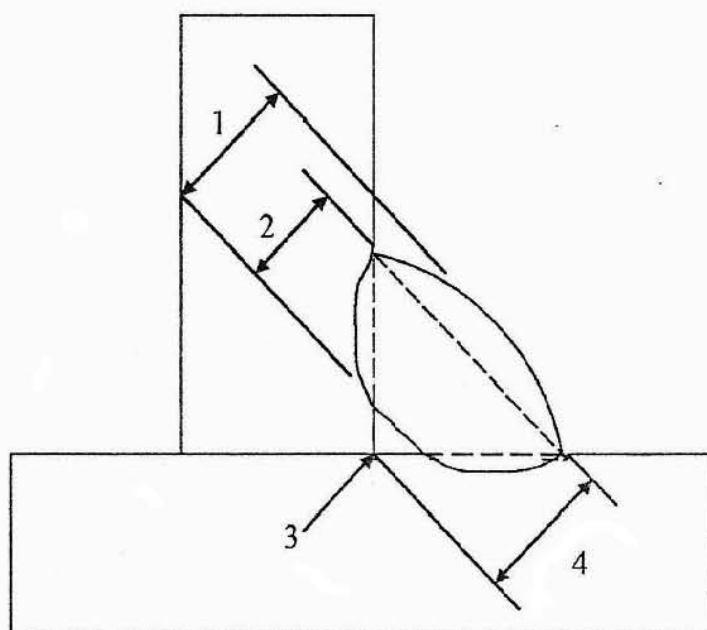
FIG 2.4 TAMAÑOS DE LAS SOLDADURAS DE FILETE





- 1.- Garganta real y garganta efectiva
- 2.- Garganta teórica
- 3.- Abertura de raíz

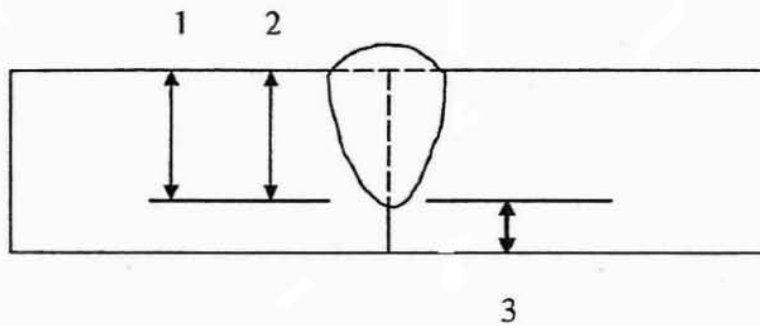
Soldadura de filete con abertura de raíz



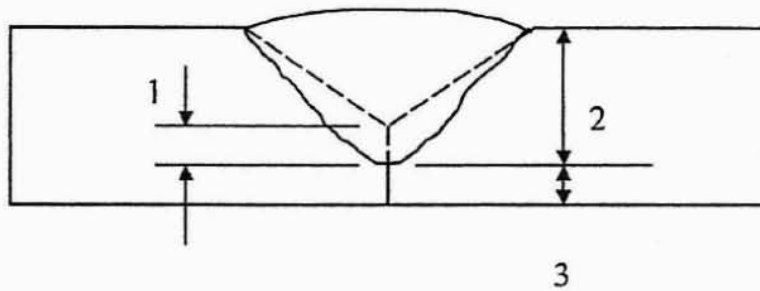
- 1.- Garganta real
- 2.- Garganta efectiva
- 3.- Fusión incompleta
- 4.- Garganta teórica

Soldadura de filete con fusión incompleta

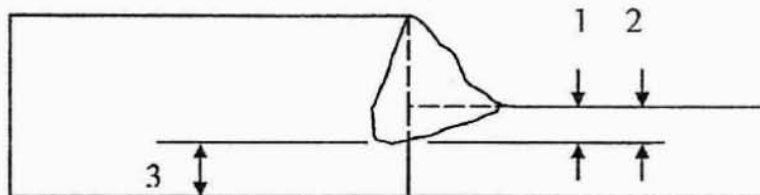




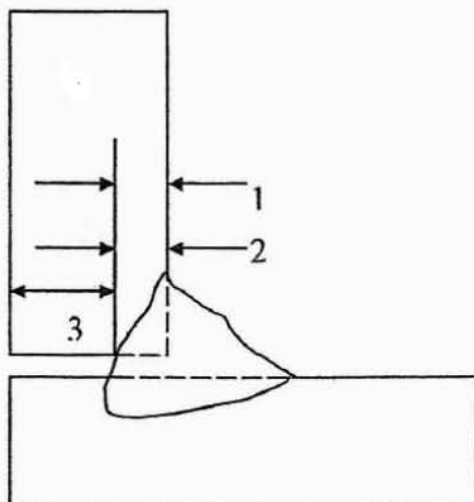
- 1.-Penetración de la raíz
- 2.-Penetración de la junta, tamaño de la soldadura de ranura (garganta efectiva)
- 3.-Penetración incompleta en la junta



- 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 en la junta



- 1.-Penetración de la junta, tamaño de la soldadura de ranura (garganta efectiva)
- 2.-Penetración de a raíz.
- 3.-Penetración incompleta en la junta

FIG. 2.5 PENETRACION EN LA JUNTA Y EN LA RAIZ Y PENETRACION INCOMPLETA DE LA JUNTA



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 lo 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 con 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 un solo lado.

Junta doble o soldada por los dos lados (double-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 la 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 sencilla (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).



TEMA 3

SÍMBOLOS DE SOLDADURA Y EXÁMENES NO DESTRUCTIVOS

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 complicadas que para describirlos seria 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 la soldadura, soldadura fuerte y exámenes no destructivos revisión 2009.

La norma mexicana correspondiente es la NMX-H-111 "símbolos para la soldadura y pruebas no destructivas"

Los documentos antes mencionados son compatibles en lo fundamental, y también lo son con sus similares "de otros países americanos, pero tienen "algunas diferencias relevantes en relación con las normas de países europeos. Debido a este hecho, se recomienda , a fin de evitar errores costosos, asegurarse de consultar la norma adecuada para los trabajos que está inspeccionando, particularmente si los diseños proceden de países que no sean americanos.



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

Los símbolos de soldadura y exámenes 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 símbolo 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, Las normas americana y mexicana hacen una distinción entre los términos ***símbolo de soldadura (weld symbol)*** y ***símbolo de soldar (welding symbol)***.

3.01 EL SÍMBOLO DE SOLDADURA

es un grafico que indica el tipo de soldadura y forma parte del símbolo de soldar. El símbolo de soldar es una representación grafica de una soldadura y esta construido por 8 elementos

Línea de referencia, flecha, símbolo básico de soldadura, dimensiones y otros datos, símbolos suplementarios, símbolo de acabado," cola y especificación del proceso o de otras referencias:



Ranura							
Cuadrada	Inclinada o de empalme	V	Bisel	U	J	Abocinado en V	Abocinado en bisel
Filete	Tapón o botón	Pernos	Puntos o Proyección	Costura	De o en el respaldo	Recubrimiento	Borde o pestaña





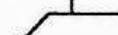



Fig. 3.1 SIMBOLOS BASICOS DE SOLDADURA

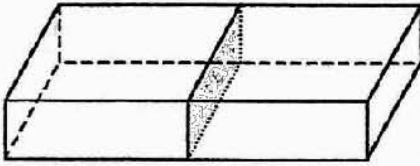
No es necesario usar todos estos elementos, a no ser que se requieran para clarificar algún detalle particular, pero cuando se utilice cada uno de ellos debe estar en la posición específica que se indica en la figura 3.1

Los símbolos de soldadura básicos deben dibujarse como se indica en la figura 3.2 y sobre la línea de referencia.



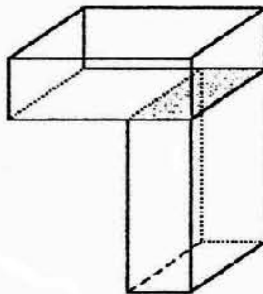


Soldadura todo alrededor	Soldadura de campo	Penetra- ción completa	Inserto consumible (cuadrado)	Respaldo o separador (rectangular)	Contorno		
					A ras o plano	Convexo	Cóncavo
							



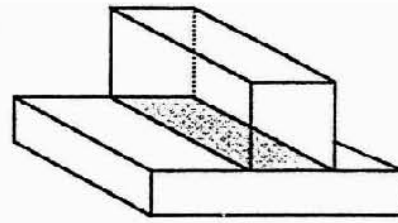
Soldaduras aplicables
Ranura cuadrada
Ranura en V
Ranura en bisel
Ranura en U
Ranura en J
Ranura en V-abocardada
Ranura de bisel-abocardada
Extremo doblado
Fuerte

Junta a tope



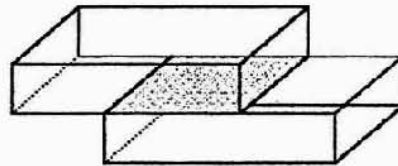
Soldaduras aplicables	
Filete	Ranura de bisel
Ranura cuadrada	abocardada
Ranura en V	Extremo doblado
Ranura en bisel	Esquina doblada
Ranura en U	Punto
Ranura en J	Proyección
Ranura en V-	Costura
abocardada	Fuerte

Junta en esquina



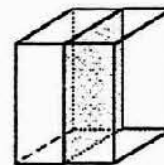
Soldaduras aplicables	
Filete	Ranura en J
Tapón	Ranura de bisel abocardada
Agujero	Punto
Ranura cuadrada	Proyección
Ranura en bisel	Costura
	Fuerte

Junta en T



Soldaduras aplicables	
Filete	Ranura en J
Tapón	Ranura de bisel abocardada
Ranura	Punto
Ranura en	Proyección
bisel	Costura
	Fuerte

Junta de traslape



Soldaduras aplicables	
Ranura Cuadrada	Extremo doblado
Ranura en bisel	Esquina doblada
Ranura en V	Costura
Ranura en U	Borde
Ranura en J	

Junta de borde

FIG. 3.4 TIPOS BÁSICOS DE JUNTAS Y SOLDADURAS APLICABLES



3.02 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 de referencia, como se indica en las siguientes figuras 3.5 a 3.7.

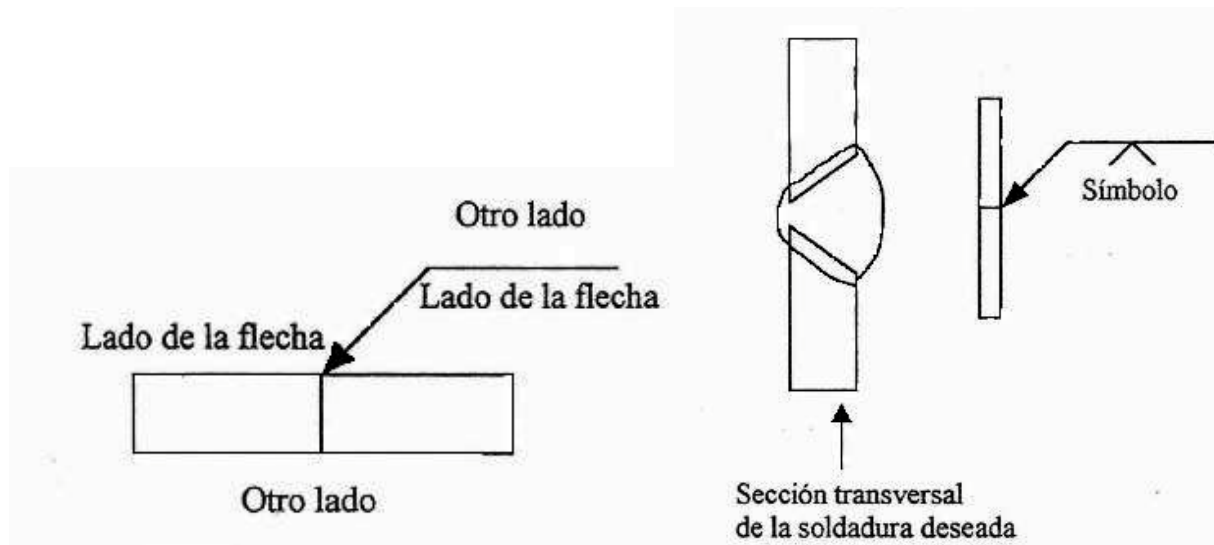


Fig.3.5 SÍMBOLO PARA UNA SOLDADURA DE RANURA EN "V" AL LADO DE LA FLECHA

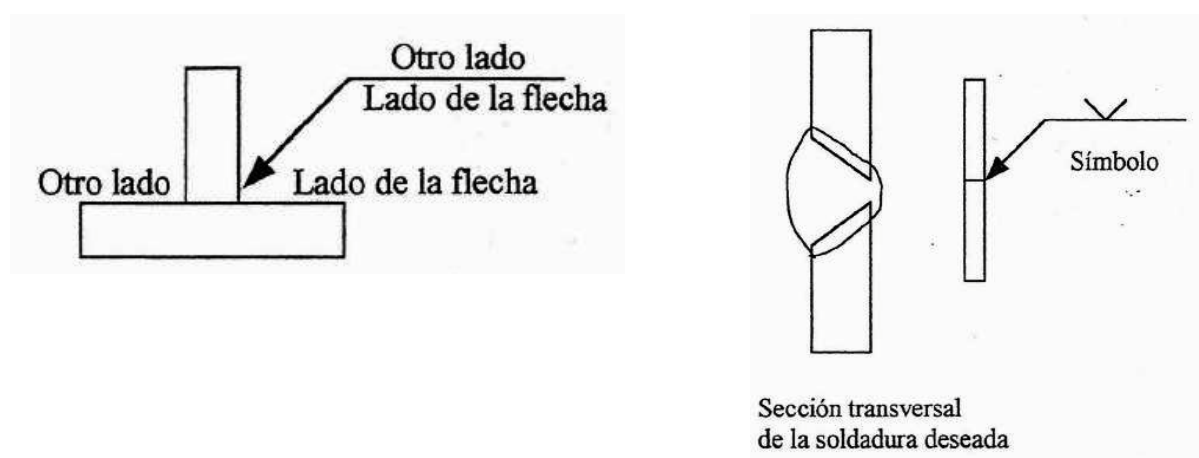


Fig. 3.6 SÍMBOLO PARA UNA SOLDADURA DE RANURA EN "V" DEL OTRO LADO DE LA FLECHA



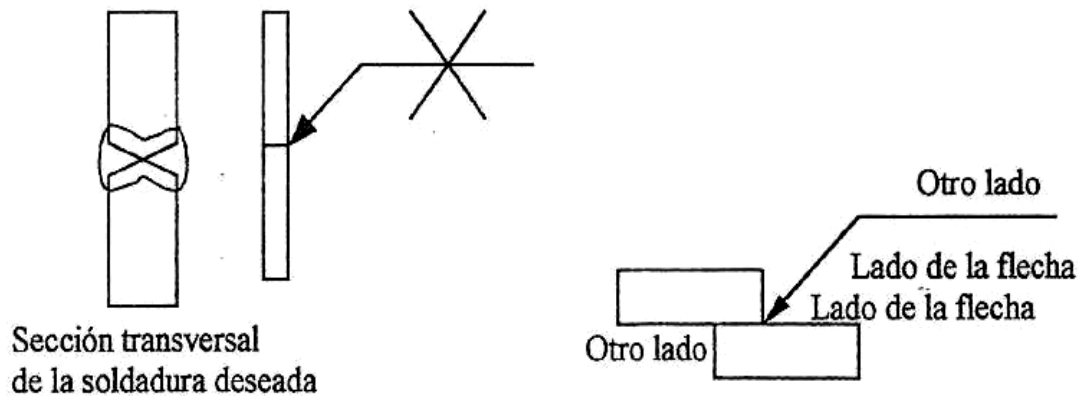


Fig. 3.7 Símbolo para una soldadura de ranura en "V" por ambos lados de la flecha

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 3.8 ejemplifica el empleo de la flecha quebrada.

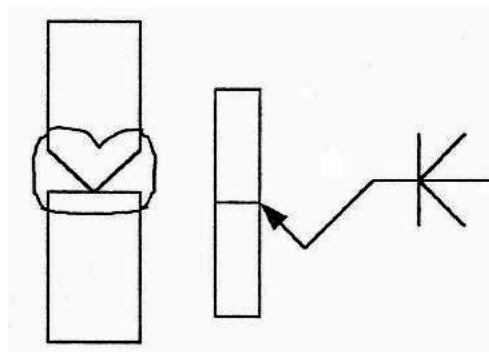


Fig.3.8 APLICACIÓN DE LA FLECHA QUEBRADA PARA UNA SOLDADURA DE RANURA DE DOBLE BISEL.

Símbolo de penetración completa (melt-thru symbol).

El símbolo de penetración completa debe emplearse únicamente donde se requiera cien por ciento de penetración 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.

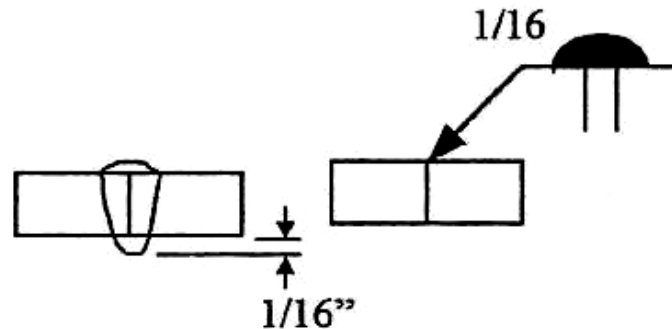


Fig. 3.9 SÍMBOLO DE PENETRACIÓN COMPLETA.

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, tal 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 (Harnmering)



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.

Uso de los símbolos de contorno y acabado.

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 figuras 3.10 y 3.11 ilustran el empleo de los símbolos de perfil y acabado.

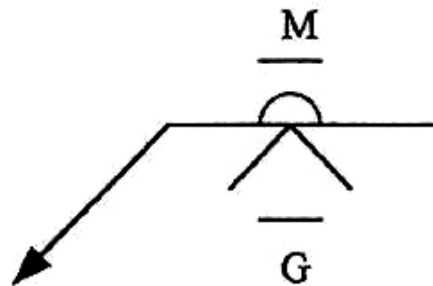


FIG. 3.10 SÍMBOLOS DE PERFIL ENRASADO POR MEDIO DE ESMERILADO POR EL LADO FLECHA, Y MAQUINADO POR EL OTRO LADO DE LA FLECHA, EN LA SOLDADURA DE RESPALDO.

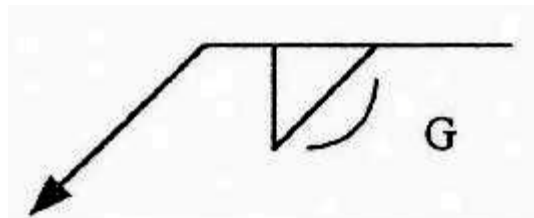


Fig. 3.11 SÍMBOLO DE CONTORNO CONVEXO POR MEDIO DE ESMERILADO EN UNA SOLDADURA DE FILETE

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 3.12.



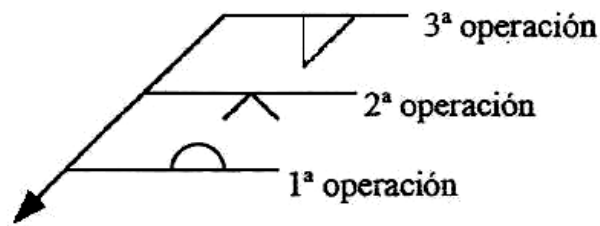


FIG. 3.12 SÍMBOLO DE SOLDAR CON LÍNEAS DE REFERENCIA MÚLTIPLES.

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 exámenes no destructivos. Para conocer estas disposiciones, el lector tiene que remitirse a las normas sobre símbolos.

3.03 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 la figura 3.13 y 3.14.

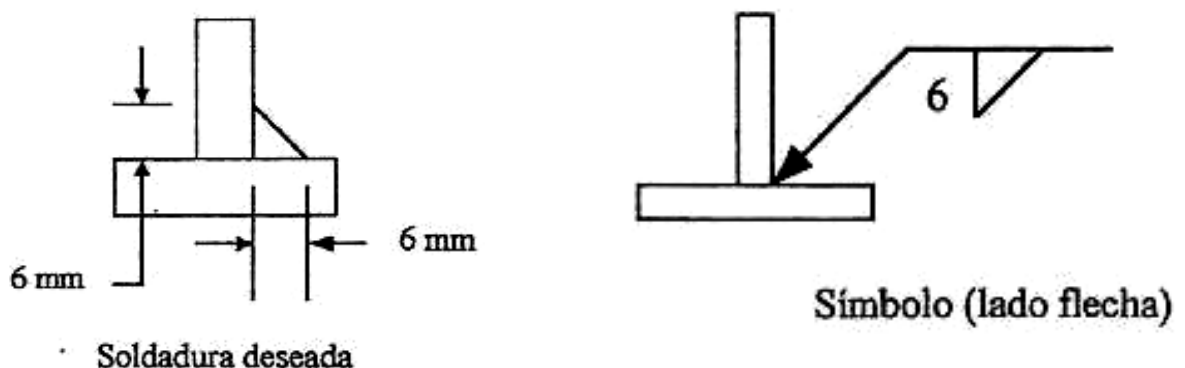


FIG. 3.13 SOLDADURAS DE FILETE DEL LADO DE LA FLECHA.



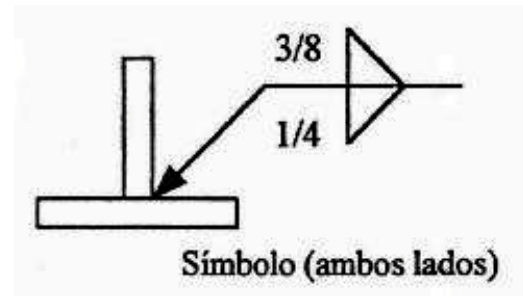
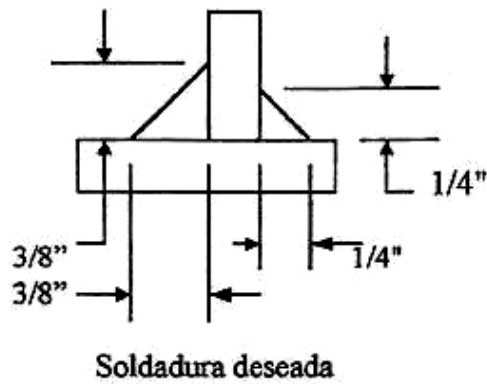


FIG. 3.14 SOLDADURA DE FILETE POR AMBOS LADOS

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 3.15.

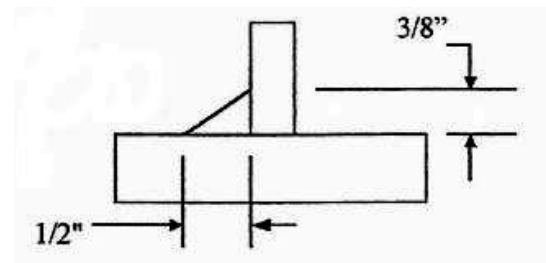
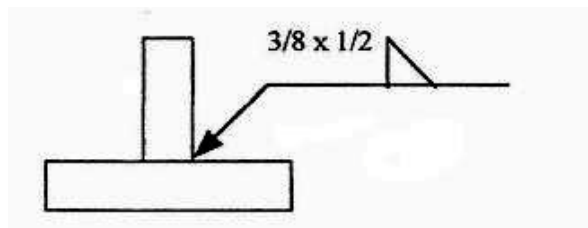


FIG. 3.15 SOLDADURA DE FILETE CON PIERNAS DESIGUALES POR EL OTRO LADO DE LA FLECHA.

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 3.16.



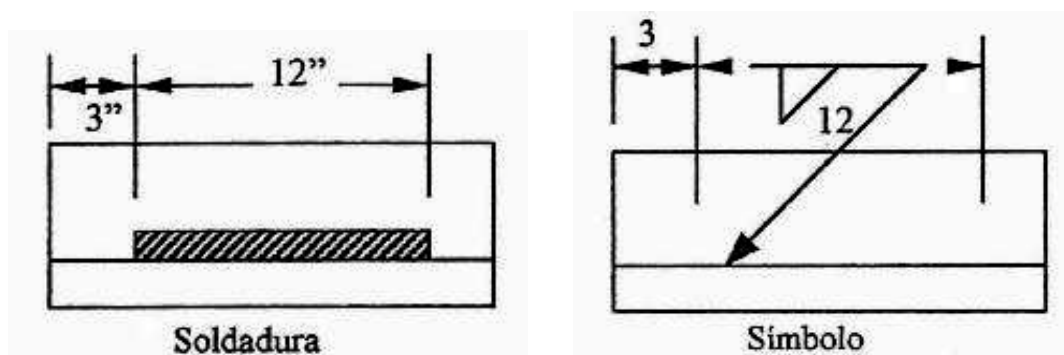


FIG. 3.16 SOLDADURA DE FILETE CON LONGITUD ESPECIFICADA.

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. Si están 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 siguientes figuras 3.17 a 3.19 ilustran el uso de estos símbolos.

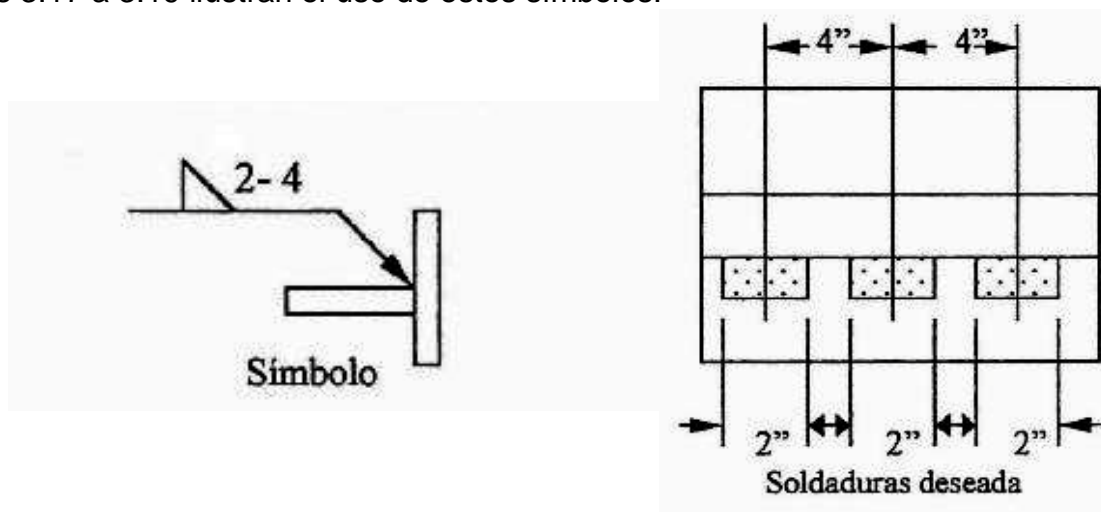


FIG.3.17 LONGITUD Y PASO DE UNA SOLDADURA DE FILETE INTERMITENTE



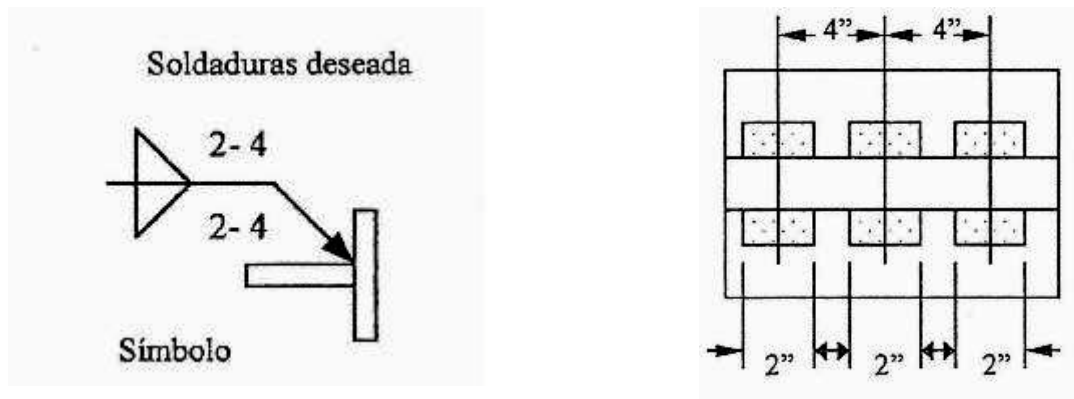


FIG. 3.18 SOLDADURAS DE FILETE INTERMITENTE EN CADENA.

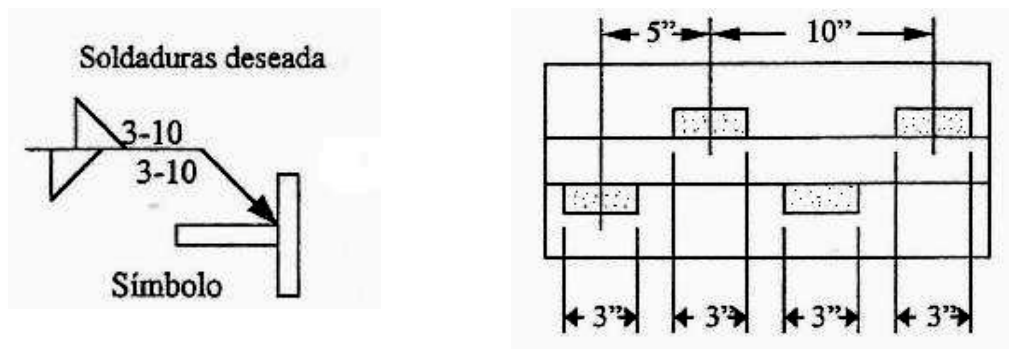


FIG. 3.19 SOLDADURAS DE FILETE INTERMITENTE ALTERNADAS.

3.04 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 se muestran en la figura 3.20.

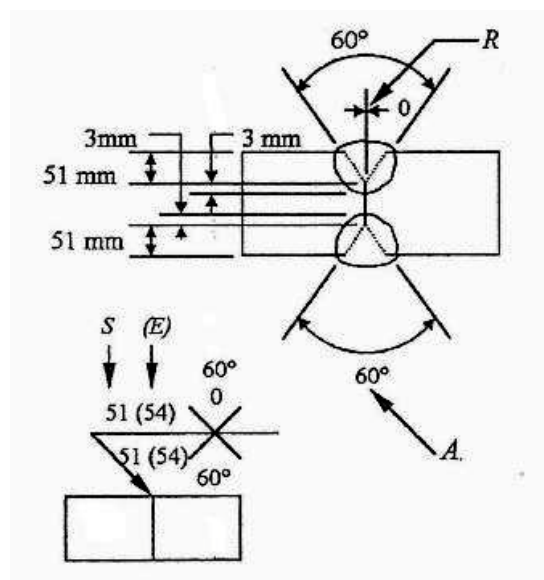


Fig. 3.20 Dimensiones en los símbolos de soldadura de ranura.



En la figura anterior, 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

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 gargantas efectivas (E) especificadas y no especificadas. Las reglas y aplicaciones de estas combinaciones están establecidas en las normas. Las figuras 3.21 a 3.24 muestran algunos usos frecuentes de los símbolos para soldaduras de ranura

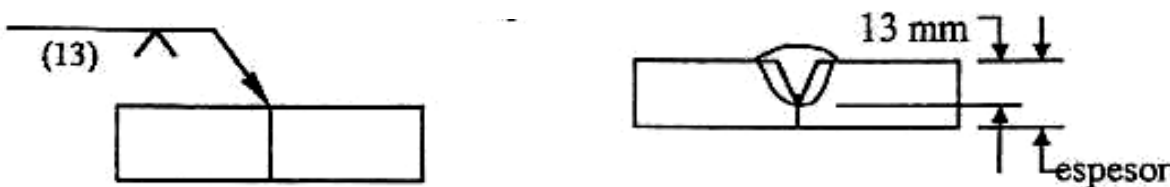


FIG.3.21 DESIGNACIÓN DE GARGANTA EFECTIVA SIN ESPECIFICAR PROFUNDIDAD DE LA PREPARACIÓN

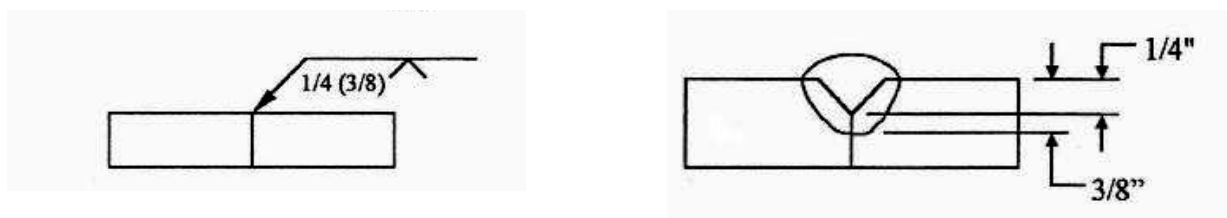


FIG. 3.22 PROFUNDIDAD DE PREPARACIÓN "S" MENOR QUE LA GARGANTA EFECTIVA (E).



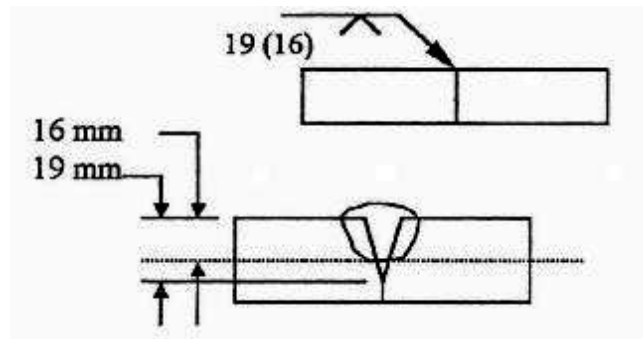


FIG. 3.23 PROFUNDIDAD DE PREPARACIÓN "S" MAYOR QUE LA GARGANTA EFECTIVA (E).

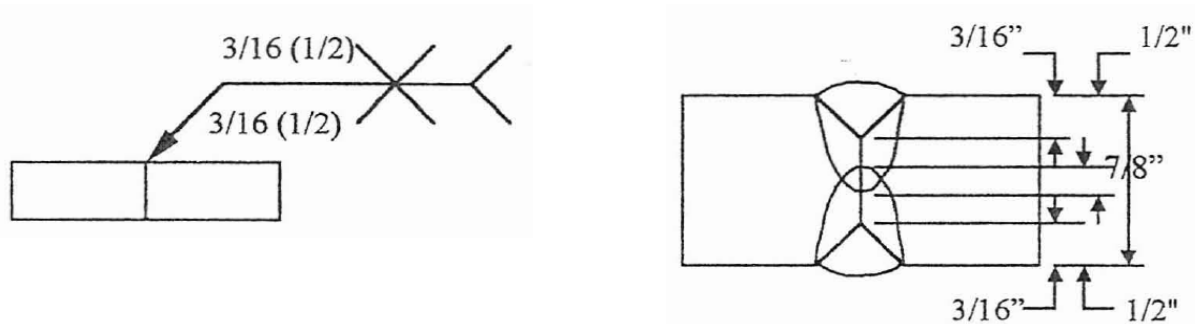
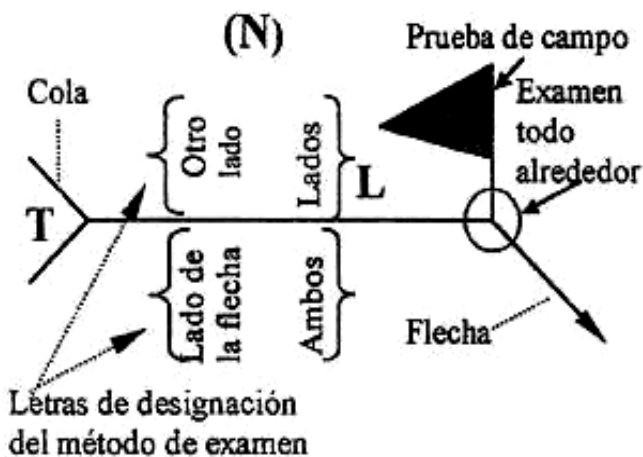


FIG. 3.24 PROFUNDIDAD DE LAS PREPARACIONES "S" MENOR QUE LAS GARGANTAS EFECTIVAS (E)

3.05 SÍMBOLOS PARA EXÁMENES NO DESTRUCTIVOS



N= Número de exámenes

T= Especificación u otra referencia

L= Longitud de sección a examinar

El símbolo de examen consta de línea de referencia, flecha, designación de método de examen, extensión y número de los exámenes, símbolos suplementarios y cola (donde se indican especificaciones u otras referencias). El orden en que se sitúan estos elementos en el símbolo de examen se indican en la siguiente figura 3.25.

Fig.3.25 Situación normalizada de los elementos del símbolo de exámenes no destructivos.



Designación del método de examen.

Los métodos de examen no destructivo se especifican con las letras de designación que se indican a continuación.

Método de examen	Símbolo
Emisión acústica	AET
Electromagnético (Eddy)	ET
Fuga (Leak testing)	LT
Líquidos penetrantes	PT
Partículas magnéticas	MI
Comprobación (Proof)	PRT
Radiografía neutrónica	NRT
Radiografía	RT
Térmico / infrarrojo	TIR
Ultrasonido	UT
Visual	VT

Símbolos Suplementarios

Los símbolos suplementarios aplicables a los exámenes no destructivos se ilustran en la figura 3.26.

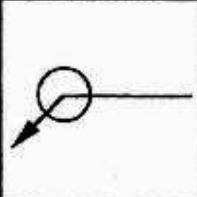
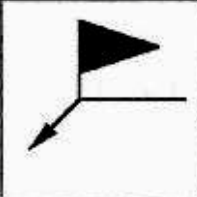
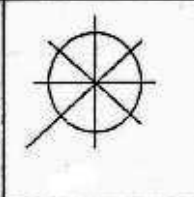
Examen todo alrededor	Examen en campo	Dirección de la Radiación
		

FIG. 3.26 UBICACIÓN NORMALIZADA DE LOS ELEMENTOS DEL SÍMBOLO DE EXAMEN NO DESTRUCTIVO

Consideraciones generales

De manera similar a la que se "emplea para los símbolos de soldadura, la flecha conecta la línea de referencia con la pieza a ser examinada. El lado al cual señala la flecha se



considera el lado de la flecha de la pieza y, en el símbolo de examen, 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 la línea de referencia. Las figuras 3.27 y 3.28 ilustran el empleo de exámenes por el lado de la flecha y por el lado opuesto.

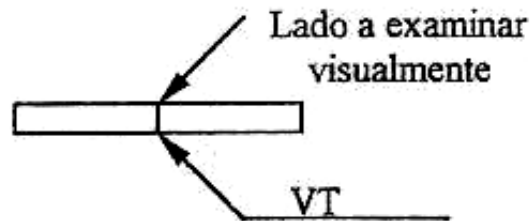


Fig. 3.27 APLICACIÓN DEL SÍMBOLO DE EXAMEN NO DESTRUCTIVO A APLICAR POR EL LADO OPUESTO A LA FLECHA.

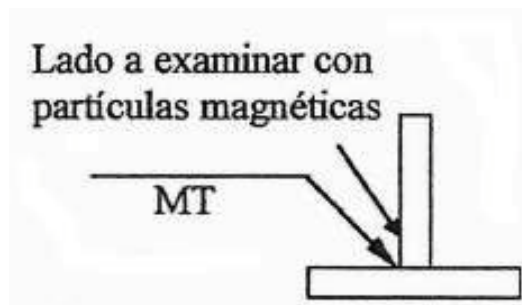


FIG. 3.28 APLICACIÓN DEL SÍMBOLO DE EXAMEN NO DESTRUCTIVO A APLICAR POR EL LADO DE LA FLECHA.

Símbolos en ambos lados

Los exámenes a efectuar sobre ambos lados de la pieza se deben indicarse situando las letras de designación para el método de examen especificado en ambos lados de la línea de referencia, fig. 3.29.



FIG. 3.29 SIMBOLOS EN AMBOS LADOS



Símbolos centrados en la línea de referencia

Cuando los símbolos de examen no tienen significado del lado flecha u otro lado, o no hay preferencia por cuál lado se va a efectuar el examen, los símbolos deben estar centrados en la línea de referencia fig. 3.30.

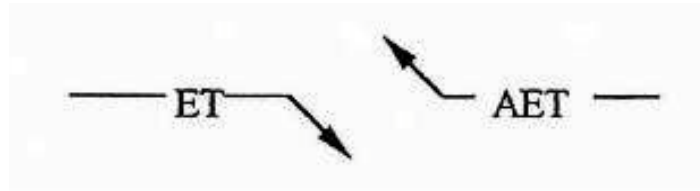


FIG. 3.30 SÍMBOLOS CENTRADOS EN LA LINEA

Combinaciones de exámenes

Para una 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 centrados en la línea de referencia, se deben separar con un signo "más" fig. 3.31.

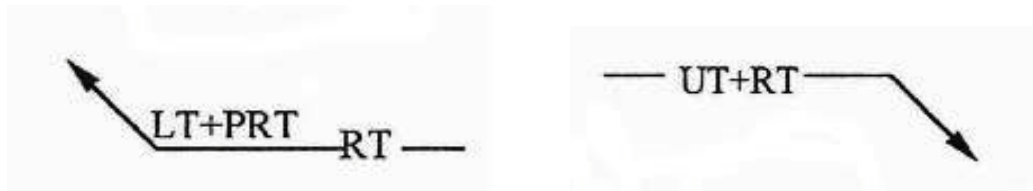


FIG. 3.31 COMBINACIONES DE EXAMENES

Combinación de símbolos de exámenes no destructivos y de soldar

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

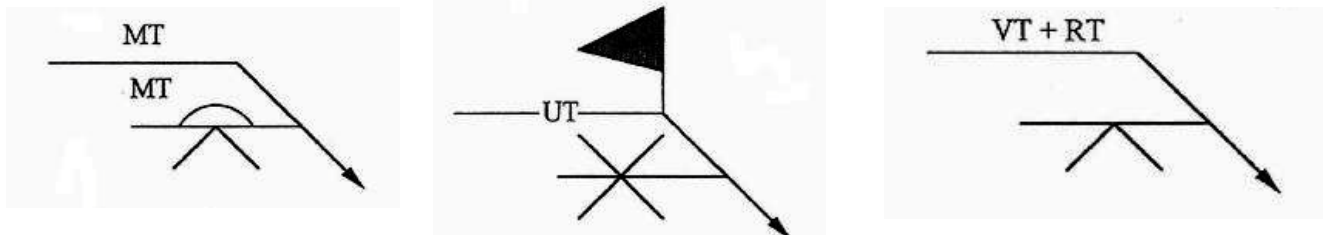


FIG. 3.32 COMBINACION DE SÍMBOLOS



3.06 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 fig. 3.33.

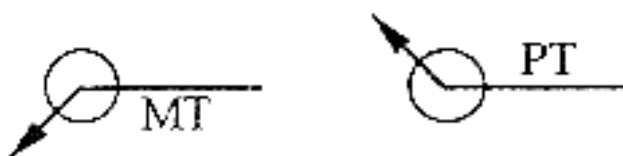


FIG. 3.33 EXAMEN TODO ALREDEDOR

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 fig. 3.34.

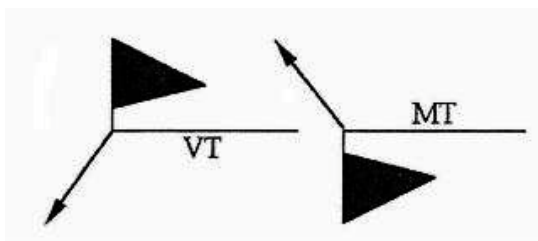


FIG. 3.34 EXAMEN EN CAMPO

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 dibujado en el plano con el ángulo requerido, indicado en grados. Fig. 3.35.



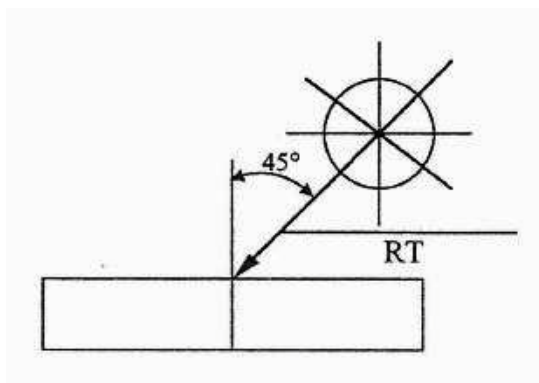


FIG.3.35 DIRECCIÓN DE LA RADIACIÓN

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. Fig. 3.36.

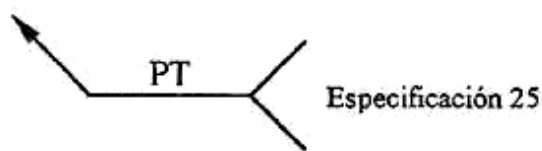


FIG. 3.36 ESPECIFICACIONES Y CODIGOS

3.07 EXTENSIÓN Y LOCALIZACIÓN DE LOS EXÁMENES NO DESTRUCTIVOS

Longitud de la Sección a Examinar. Para especificar el examen de soldaduras o piezas donde sólo 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. Fig. 3.37

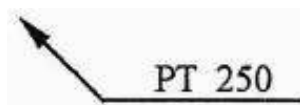


FIG. 3.37 LONGITUD DE LA SECCIÓN A EXAMINAR

Examen de la longitud total

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



Examen parcial

Cuando se requiere que sólo 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 del símbolo de examen. fig. 3.38

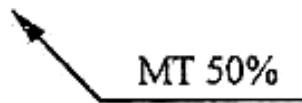


FIG. 3.38 EXAMEN PARCIAL

Número 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. Fig. 3.39

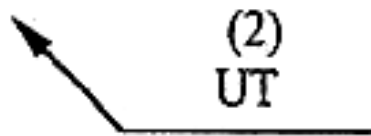


FIG. 3.39 NUMERO DE EXAMENES



TEMA 4

METALURGIA DE LA SOLDADURA

Las propiedades de los metales y sus aleaciones dependen de sus estructuras metalúrgicas o metalográficas y de aspectos sub-microscópicos, 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 los siguientes patrones.

4.01 ESTRUCTURA CRISTALINA.

La materia ordinaria existe en tres estados: 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 el que se encuentran dispuestos 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 los átomos están dispuestos de manera ordenada formando cristales, la distancia entre ellos es más reducida (con respecto a los otros dos estados) y su movilidad es muy limitada. El estado líquido puede considerarse como una estructura indeterminada ya que no posee el orden del estado sólido en la separación relativamente grande y movilidad de los átomos que caracterizan el 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 la temperatura de solidificación de equilibrio, sus átomos tienen una movilidad muy limitada y no pueden desplazarse ordenadamente para formar cristales. Estas sustancias se denominan “amorfos”.

Por otra parte la densidad de los líquidos y la separación promedio entre los átomos son muy cercanas a las de los sólidos. La diferencia principal entre los otros dos estados y el sólido consiste en que en este último 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 geométrico idealizado llamado red espacial. Las redes espaciales pueden ser visualizadas como un gran conjunto de puntos ordenados en el espacio, de tal manera que cada uno de ellos presentan una posición idéntica con respecto a las de los otros colocados a su alrededor. Si cada uno de estos fuera unido con líneas imaginarias a los puntos más cercanos se obtendría una configuración geométrica, la de un cubo por ejemplo que se repetiría en todas las direcciones.

La red quedaría definida por el modelo geométrico individual formado a unir con líneas la cantidad mínima de los puntos mas cercanos entre si. Este modelo geométrico individual recibe el nombre de *celda unitaria*. fig. 4.1

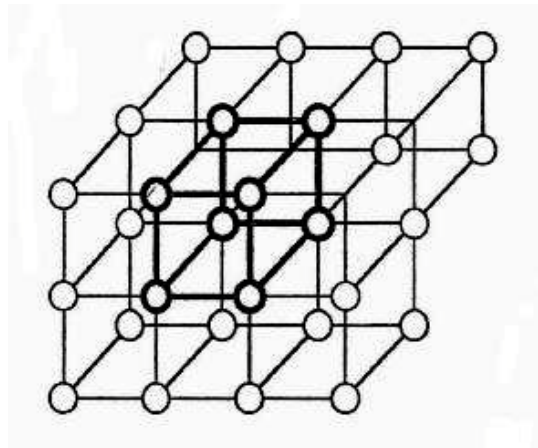


FIG. 4.1 RED ESPACIAL CUBICA SIMPLE EN LA QUE SE INDICA UNA CELDA UNITARIA.

Las posiciones que guardan los átomos en las estructuras cristalinas de los sólidos siguen uno de los modelos geométricos de 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 más comúnmente encontradas en los metales son: la cúbica centrada en el cuerpo, la cúbica centrada en las caras y la hexagonal compacta. Fig. 4.2 a 4.4



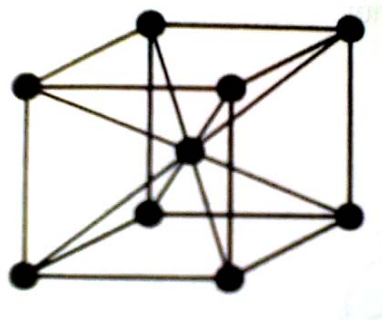


Fig. 4.2 Estructura cristalina cúbica centrada en el cuerpo.

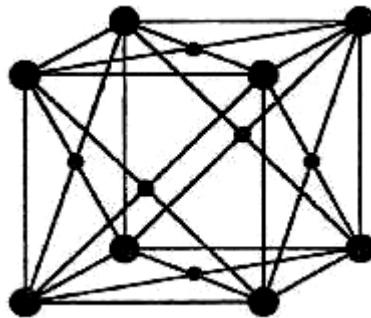


Fig. 4.3 Estructura cristalina cúbica centrada en las caras

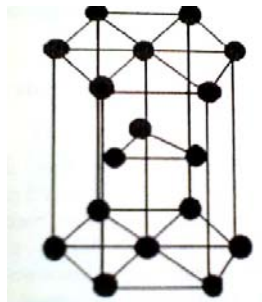


Fig. 4.4 Estructura cristalina hexagonal compacta.

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

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. fig. 4.5 a 4.9



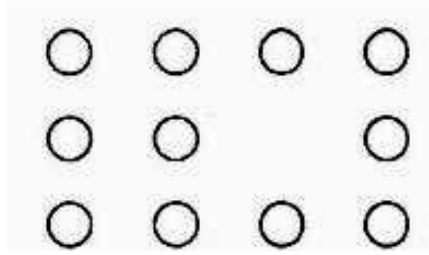


Fig.4.5 Vacancia (falta de un átomo en la red)

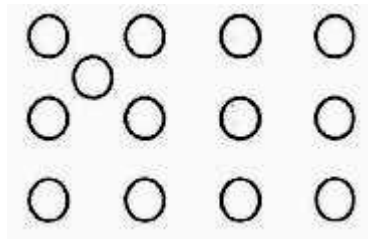


Fig. 4.6 Átomo intersticial (exceso de un átomo en la red).

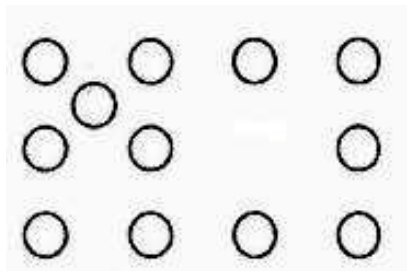


Fig. 4.7 Defecto de Frenkel (vacancia y átomo intersticial).

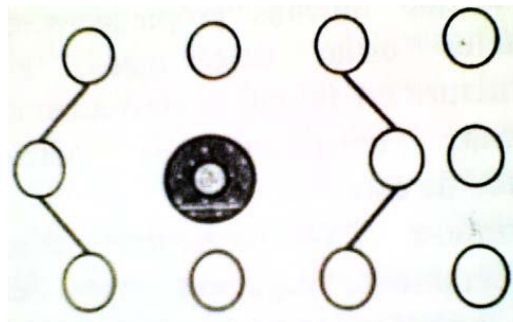


Fig. 4.8 Átomo de impureza que distorsiona la perfección de la red.



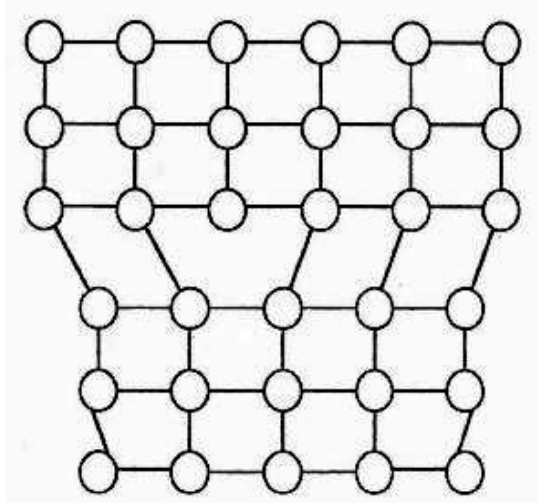


Fig. 4.9 Dislocación de borde

Segunda: Los metales en estado sólido están compuestos por conjuntos de granos y estos a su vez, están constituidos por átomos agrupados formando “cristales individuales” celdas unitarias (podrían ser cúbicos centrados en el cuerpo por ejemplo) que tienen la misma orientación y se repiten indefinidamente en todas direcciones (la red espacial).

La diferencia existente entre el grano y otro es la orientación que presentan las agrupaciones de sus cristales individuales. Los granos están unidos unos con otros formando una zona de transición (agrupación de átomos en forma individual) llamada **límite de grano**. De acuerdo con esto, puede considerarse que los metales son materiales poli-cristalinos, esto es, están constituidos de un número infinito de granos de diferente tamaño.

Para tener una idea más cercana de la naturaleza poli-cristalina de los metales considérese que un grano de hierro de tamaño típico (0-25mm) contiene unos 10^{18} átomos. Fig. 4.10



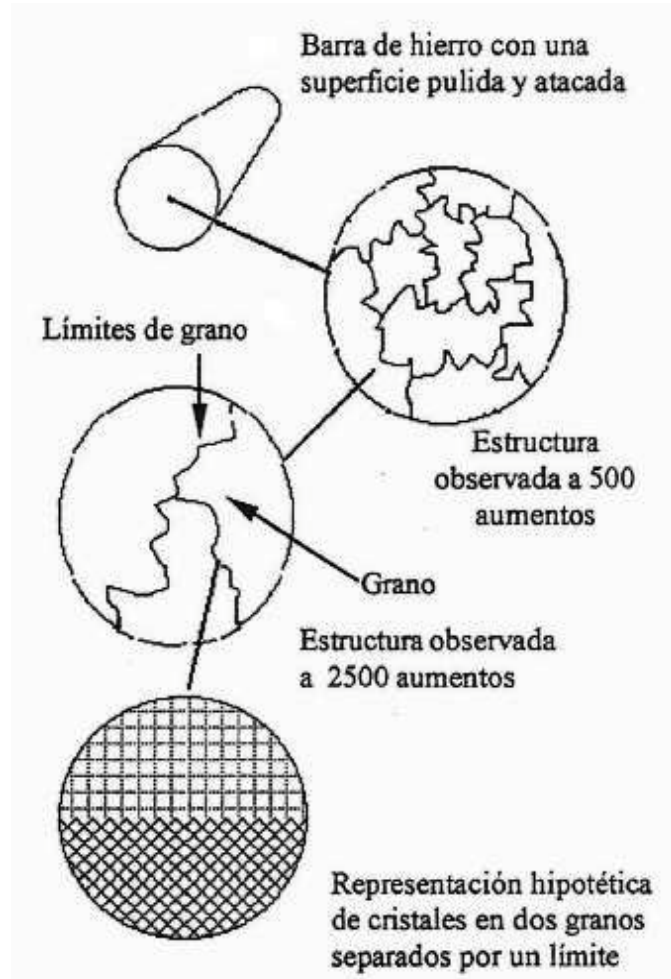


Fig. 4.10 Granos y límite de grano.

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

4.02 ALEACIONES.

Debido a que los metales puros presentan propiedades mecánicas pobres, rara vez tiene aplicaciones industriales, pero se ha desarrollado una amplia gama de aleaciones con propiedades específicas adecuadas para las 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 y la resistencia ala 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 aleaciones (solutos).

Las soluciones sólidas pueden ser de dos tipos sustitucionales e intersticiales. En las de primer tipo los átomos de aleante se alojan en algún hueco o intersticio entre los átomos de la matriz. fig. 4.11 a 4.12

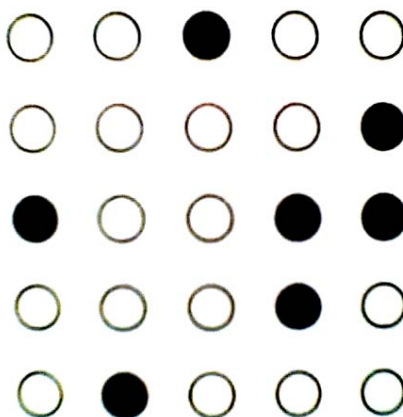


Fig. 4.11 Solución sólida sustitucional.

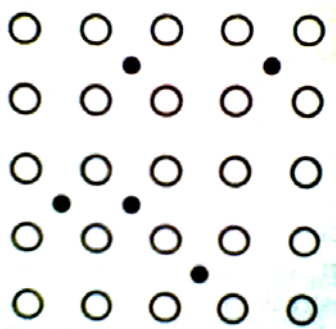


Fig.4.12 Solución sólida intersticial

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

El tipo de solución sólida y el grado de solubilidad dependen de algunos factores. Para que dos metales sean solubles entre sí 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 la misma estructura cristalina.
- Deben tener igual electronegatividad o una diferencia no apreciable de esta
- Deben tener la misma valencia.
- Dos metales que satisfagan estas condiciones (como el oro y la plata) formaran una solución solida 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 solidas formadas serán intersticiales y la solubilidad estará muy restringida.

En los sistemas de solubilidad parcial, esta decrece al disminuir la temperatura la temperatura.

Las aleaciones de dos metales solubles en todas las proporciones en el estado solido son mezclas homogéneas, es decir, presentan la misma composición y la misma estructura. Sin embargo la mayor parte de las aleaciones son solubilidad restringida, en las que además de soluciones solidas, están presentes en porciones variables de material que difiere en composición química o estructura cristalina(o ambas a la vez) con respecto de la solución solida. A estas porciones diferentes entre si se les denomina fases.

4.03 DIFUSION.

En este estado solido existe movimiento de átomos, “Saltando” de una posición de red cristalina a otra posición cercana. A este movimiento de átomos en el estado solido se le denomina difusión. fig. 4.13

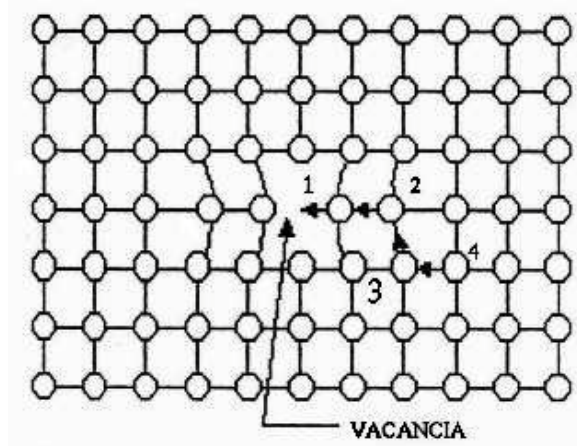


Fig. 4.13 El átomo 1 se desplazara al lugar vacante, el átomo 2 ocupara el lugar que ocupaba el átomo 1 y así sucesivamente. (Desplazamiento por difusión de los átomos)



Los “saltos” de los átomos durante la difusión puede ser de su “*posición original*” hacia una posición vacante en la red, sustituyendo a otro átomo en su posición de red, o bien alejándose intersticialmente.

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

4.04 PROPIEDADES DE LOS METALES Y LAS ALEACIONES.

La utilidad y la aplicación adecuada de los metales y aleaciones para fines específicos se miden y describe en función de sus propiedades, tales como resistencia mecánica, resistencia a la oxidación, a la corrosión, y comportamiento a temperaturas muy altas o muy bajas.

Las propiedades intrínsecas de los metales (resistencia mecánica, ductibilidad, conductividad térmica y eléctrica) 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.

4.05 FACTORES QUE DETERMINAN LAS PROPIEDADES DE LAS ALEACIONES.

Anteriormente se habló de las estructuras cristalinas, estas no son perfectas, y las discontinuidades en estas tienen una gran influencia en el comportamiento de las aleaciones.

La resistencia mecánica real de los metales ordinarios es mucho menor a la resistencia teórica que deberían de tener de acuerdo con su estructura cristalina y su enlace metálico. La causa de este hecho radica en la existencia muy extendida de las dislocaciones en los cristales. En la siguiente figura mostraremos como se produce una deformación permanente en una red cuando una fuerza corta un cristal. fig. 4.14



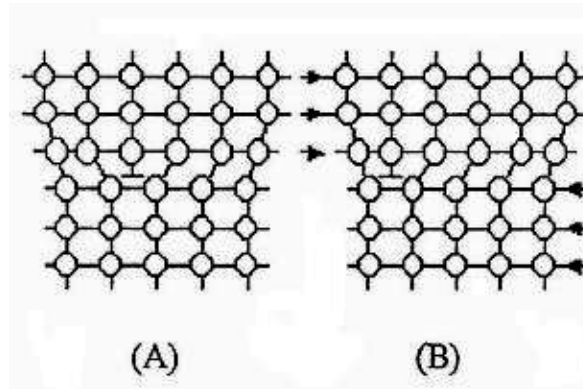


Fig.4.14 (A) Dislocación de borde de una estructura cristalina, (B) desplazamiento de la dislocación por un espacio en la red, debido a la acción de una fuerza cizallante.

El plano de los átomos situado encima de la dislocación se desliza sobre el plano atómico inferior, restableciendo con este 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 necesaria para producir el mismo desplazamiento en una estructura cristalina.

De acuerdo con lo anterior la deformación plástica de los metales ocurre principalmente por el desplazamiento 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 a 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 gran medida del tipo de imperfecciones existentes en la red. De esta manera existen estos 5 mecanismos capaces de producir modificaciones en las propiedades de las aleaciones.

- A. Endurecimiento por deformación plástica o en frío. Un metal puro sin deformaciones previas es blando, es decir se puede deformar con gran facilidad debido al desplazamiento de los planos cristalinos a través de las dislocaciones. El endurecimiento de los metales se produce cuando el desplazamiento 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 como resultado, el metal se hace más resistente, es más difícil seguir deformándolo. El endurecimiento máximo posible de los metales puros se obtiene solo mediante las deformaciones en frío.

- B. Endurecimiento por aleación. Los elementos de aleación en las soluciones solidas siempre provocan el endurecimiento del metal aleado. Si los átomos de aleante se distribuyen al azar no representa gran obstáculo para el desplazamiento de las dislocaciones pero estos átomos tienden a alojarse alrededor de las dislocaciones dificultando el desplazamiento, de manera que la fuerza necesaria para producir las deformaciones aumenta considerablemente. En la figura 4.15 mostraremos los átomos de un aleante ubicados cerca de una dislocación y estos obstaculizan los desplazamientos.

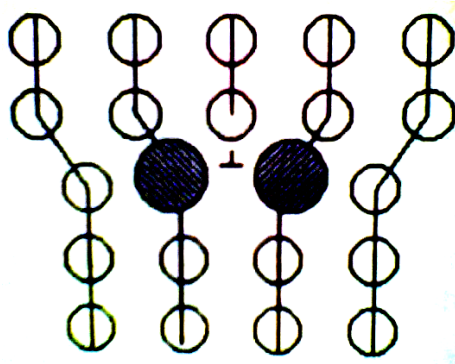


Fig. 4.15 Átomos de aleante en posiciones cercanas a una dislocación.

- A. Estructura de solidificación del grano. La solidificación de los metales de soldadura (y algunas de las 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.
- B. Transformaciones de fase en el sólido. El endurecimiento en las aleaciones pueden provocarse al transformar las fases originalmente presentes en fases nuevas con propiedades diferentes. Esta reacción de transformación se llevan a cabo por medio de procesos de calentamiento y enfriamiento a temperatura adecuadas llamados tratamientos térmico. Las propiedades de las aleaciones dependen de las propiedades de las fases que las componen y de la forma en que dichas fases están



relacionadas entre si, es decir, de la micro-estructura que forman. Los tratamientos térmicos también producen cambios en la micro-estructura.

- C. Endurecimiento por precipitación (envejecimiento). Este mecanismo es aplicable a algunos aceros y aleaciones 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 de los granos de la otra fase que resulta 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 excesivos a las temperaturas de envejecimiento no permiten el desarrollo de la resistencia y la dureza máxima posible.

4.06 METALURGIA BASICA DE LOS ACEROS.

Los aceros son aleaciones de base hierro en las que el principal elemento de aleación es el carbono (hasta un 2.0% en peso como limite teórico).

Los aceros son las aleaciones con mayor aplicación en la industria y las más usadas en la 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 comprender algunos fundamentos de la metalurgia básica de los aceros.

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

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



TRANSFORMACIONES ALOTROPICAS DEL FIERRO PURO.

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

Las transformaciones alotrópicas que ocurren en el hierro puro dependen de la temperatura a la que este se encuentre.

De temperatura ambiente hasta 910°C el hierro puro presenta una estructura cristalina cúbica centrada en el cuerpo (body centered cubic-BCC) 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 (face centered cubic- FCC) 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 (delta). fig. 4.16

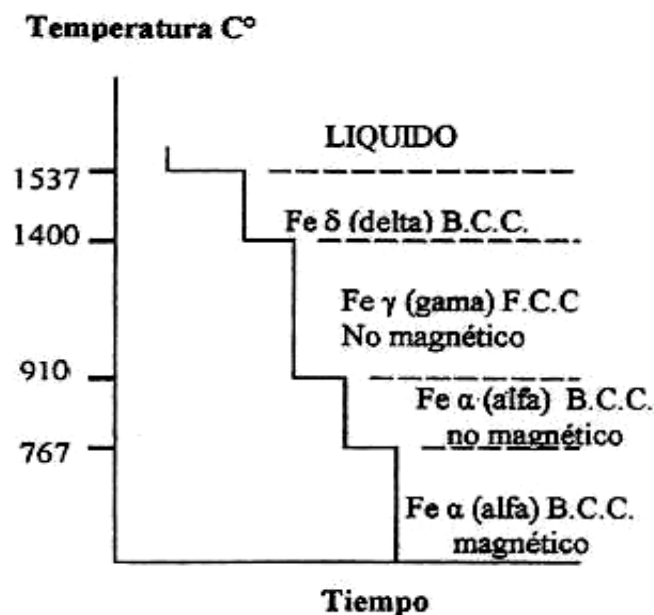


Fig. 4.16 transformaciones alotrópicas del hierro puro.

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 en la 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 (solida, 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 composición puede ser dendrítico o celular. En ambos modos hay segregación de elemento 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 le 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 (para formar granos) y aproximarse unos a otros, en las zonas intermedias entre los cristales, la solidificación ocurre no en los planos de cada cristal, sino en forma “desordenada”, dando lugar a los límites de grano, que son regiones altamente distorsionadas. La forma y tamaño de grano y en consecuencia, la proporción de los límites de grano, tienen una gran influencia sobre las propiedades de los metales. Figuras 4.17 y 4.18

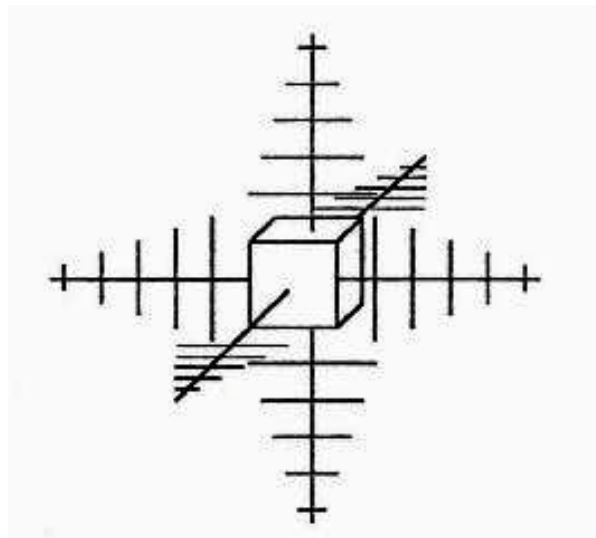


Fig. 4.17 Crecimiento dendrítico de un cristal.



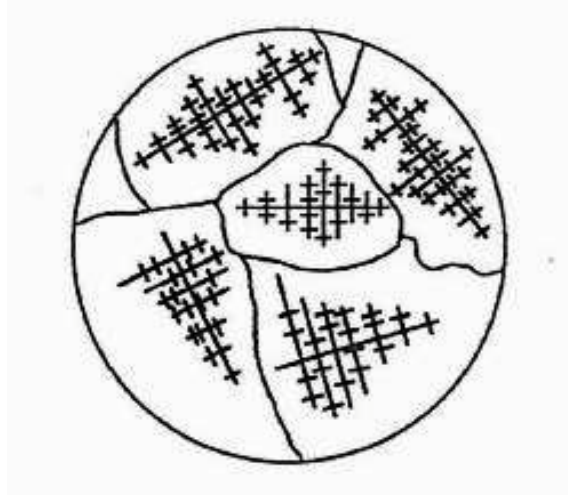


Fig. 4.18 Patrón de crecimiento detrítico de los granos

TRANSFORMACION DE FASES DE LOS ACEROS.

Las transformaciones antes descritas son aplicables al hierro puro, pero no a los aceros, que contienen, además del carbono diversos elementos de aleación; dependiendo del contenido de estos, las temperaturas y los productos de las transformaciones son diferentes a los indicados.

Estas transformaciones son descritas mediante el diagrama Fe-C y los diagramas de transformaciones isotérmicas y de enfriamiento continuo.

DIAGRAMA Fe-C

El diagrama Fe-C indica las transformaciones en *equilibrio* que sufren los aceros al carbono. Aunque un 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 “transformación en equilibrio” se refiere a aquellos cambios que ocurren, desde un punto de vista práctico, en equilibrio, y tal diagrama representa los cambios y fases de equilibrio (ferrita δ , austenita, ferrita, cementita y perlita) mismas que están presentes cuando el enfriamiento ocurre con suficiente lentitud.



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

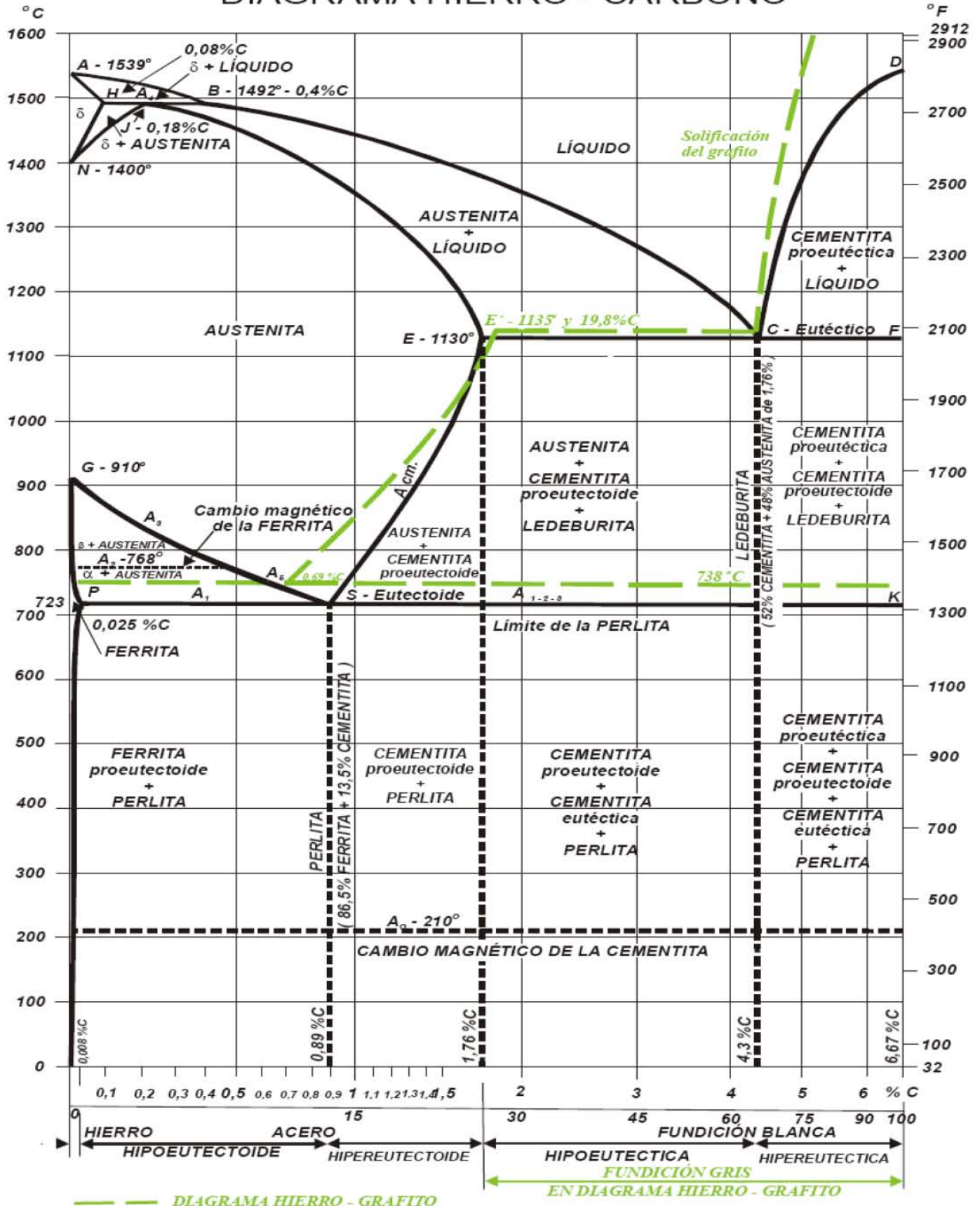
La austenita puede mantener en solución sólida hasta un 2.00% de carbono. Existen temperaturas debajo de las cuales la austenita ya no es estable y tiende a descomponerse en fases que si lo son, estas fases son la ferrita (que no puede tener una solución mas de 0.02% de carbón) y la cementita (que es un compuesto intermetalico 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 ferrita (que puede disolver hasta 0.02% C), y en otras que la concentración sea alta y se forme cementita (que contiene 6.67% de C) o perlita que es una mezcla de ferrita y cementita.

En el diagrama Fe-C también están indicados 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 peritéctico (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 una 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 peritéctica 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.



DIAGRAMA HIERRO - CARBONO



Los aceros de todas las composiciones (contenidos de carbono) que al solidificar pasan por la región de la transformación peritéctica, entran en el campo de la estructura cúbica centrada en las caras de 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 de temple), los productos de las transformaciones no estarán en equilibrio (son metales estables) 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 meta estable, 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 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-1)

Los diagramas de transformaciones isotérmicas, transformaciones-temperatura 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 se muestra un diagrama TTT para un acero al carbono



con 0.80% C. Para tener una idea sobre la utilidad de este diagrama, considérese la temperatura de 700° C. Puede observarse que la transformación se inicia a 480 segundos (8 minuto s) y finaliza después de 7,200 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. Fig. 4.20

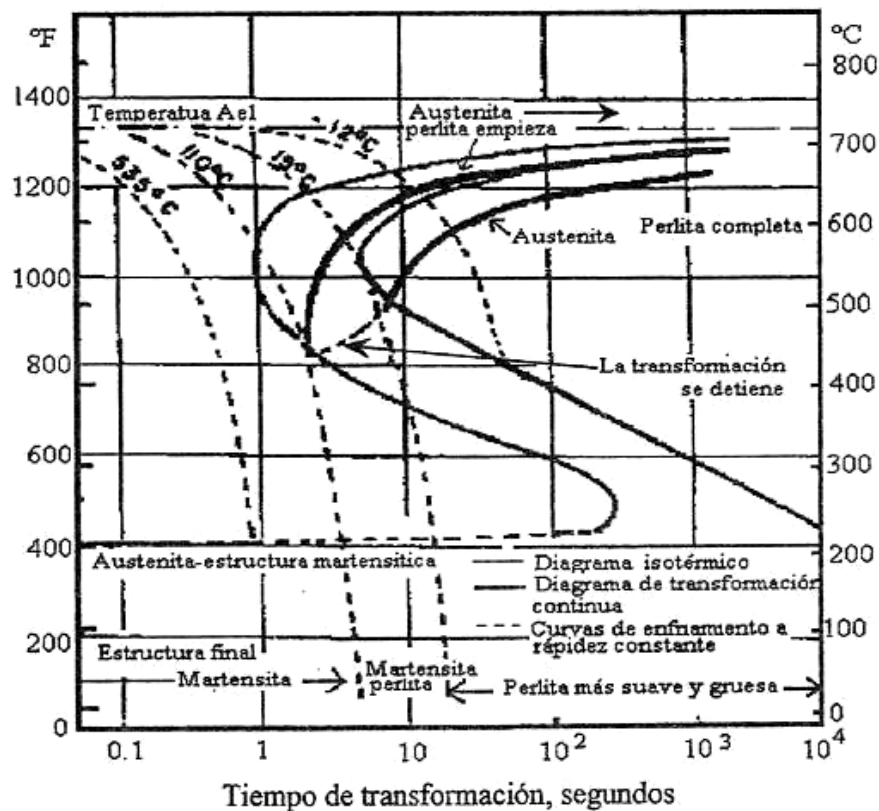


FIG. 4.20 DIAGRAMA TTT DE UN ACERO EUTECTOIDE.



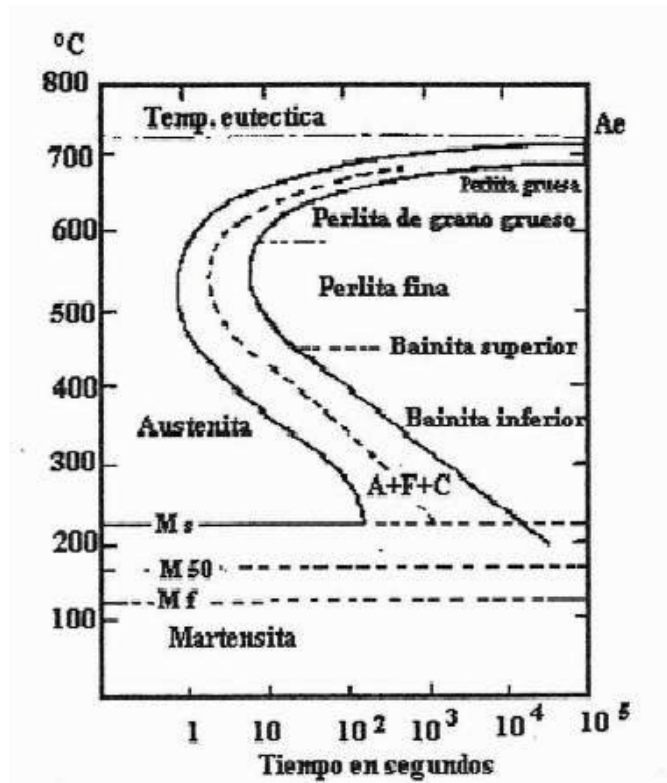


FIG.4.21 DIAGRAMA (CCT DERIVADO DE UN DIAGRAMA TTT) PARA UN ACERO EUTECTOIDE.

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 se transforma durante enfriamiento hasta temperatura ambiente. Las curvas útiles para describir esta condición son los diagramas de transformación enfriamiento continuo (continuous cooling transformation -CCT) o curvas T-E (transformación-enfriamiento). Los diagramas CCT son similares a los TTT, pero difieren en que en 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 pueden determinar características tales como el tamaño de 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 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 química o electrolíticamente con los reactivos adecuados para revelar la estructura y luego se procede a su examen microscópico. Las figuras 4.22 a 4.25 muestran las micro-estructuras que más comúnmente se encuentran en los aceros.

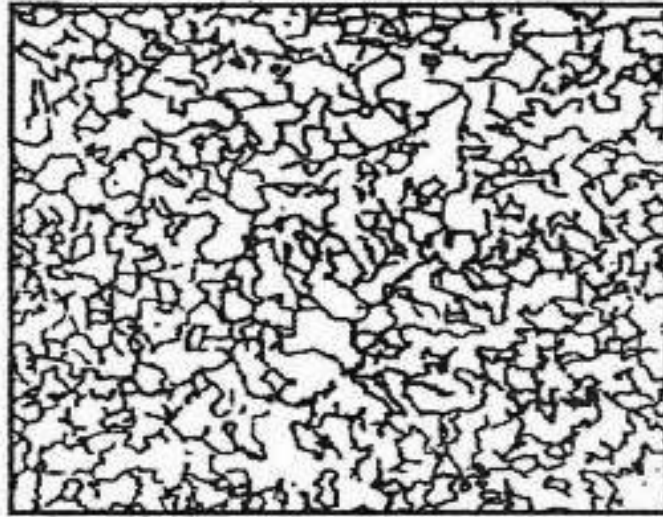


FIG.4.22 ESTRUCTURA FERRITICA, ATAQUE: NITAL 2%, 100X.

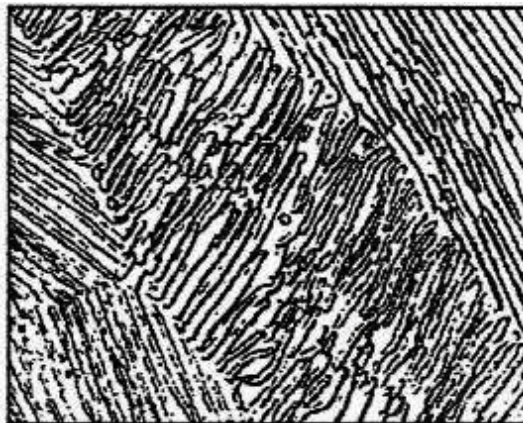


FIG. 4.23 PERLITA LAMINAR, ATAQUE: PICRAL AL 4%, 1400X



FIG. 4.24 MARTENSITA SIN REVENIR, ATAQUE: PRICAL AL 2%, 500X

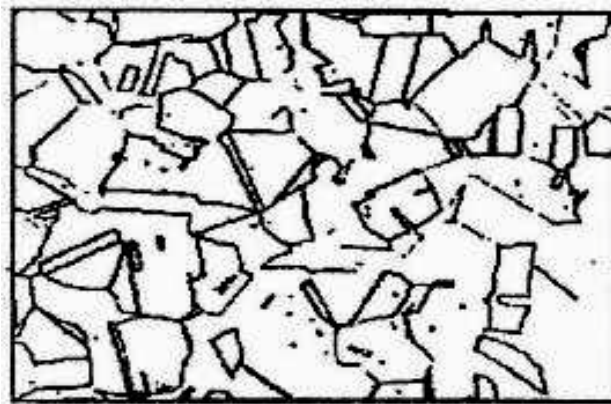


FIG. 4.25 ESTRUCTURA AUSTENITICA, ATAQUE: ACIDO OXÁLICO, 500X

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. A continuación se describe brevemente la influencia de los elementos más comunes en los aceros.

Carbono

Presente hasta en un 2% (límite teórico); puede estar 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. Comparado con el hierro, también tiene más afinidad por el oxígeno y el carbono por 10 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. Es un elemento promotor de la austenita y contenidos mayores a un 1.00% reduce la soldabilidad.

Azufre y selenio

Generalmente presente como impureza; debido a que forma una aleación eutéctica de bajo punto de fusión (sulfuro 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 resulfurados) 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 forma 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). Se 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 inoxidables.

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 inoxidables (con contenidos mayores al 11% Cr) se adiciona de un 8 a 35%, ya que en contenidos mayores al 7%, retiene la fase austenita a temperatura ambiente, formando los aceros inoxidables 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



4.07 CLASIFICACIÓN DE LOS ACEROS

De manera genérica y debido a la abundancia del hierro en la naturaleza, y a que las aleaciones de hierro son las 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 un 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 aleación 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 o en caliente) y en base a la forma del producto (barras, placas, tubos y 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 moteado, el maleable, el nodular o dúctil y los hierros colados aleados.
- Hierro dulce.
- Hierro forjado (en desuso)
- Hierros sinterizados por metalurgia de polvos.
- Aceros al carbono.
- Aceros aleados (de baja, mediana y alta aleación)
- 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 se 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 manera:



Nombre común	% C	Usos típicos
Hierro descarburizado en rollo	0.005 max.	Lamina esmaltada y lamina no envejecida para embutido
Lingote de hierro Armco	0.03 max	Lamina galvanizada, esmaltada y para embutido profundo
Acero de bajo carbono	0.15 max	Chasises y rines de automóviles, electrodos para soldadura
Acero suave o dulce	0.15/0.35	Barras y perfiles estructurales
Acero de medio carbono	0.35/0.55	Herramientas y partes de 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 o 0.60% Cu, o bien, tienen un intervalo o una cantidad mínima definida de los siguientes elementos: aluminio, columbio o 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%, los de media aleación 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: a) Aceros de alta resistencia y baja aleación (para usos estructurales o para la construcción de recipientes a presión). b) Aceros para maquinaria y para usos automotriz y aeronáutico. c) Aceros para servicio a bajas temperaturas. d) Aceros para servicios a temperaturas elevadas.

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. Las establecidas por la SAE tampoco son especificaciones, sino 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 acero simple al carbono, 2 acero al níquel, el 3 un acero al cromo níquel, etc.) . el segundo, en los aceros de aleación simple (esto es, con un único elemento de aleación principal) indica el contenido aproximado del aleante, mientras que los dos (o tres) 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 0.20% de carbono. Las tablas 4.1, 4.2 y 4.3 muestran las designaciones AISI/SAE generales de los 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 sub-estructural. Estos aceros son usados 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.



DESIGNACIÓN	CONTENIDO NOMINAL DEL ELEMENTO O ELEMENTOS DE ALEACIÓN	TIPO DE ACERO
10xx 11xx 12xx 15xx	Aceros simples al carbono (1.00 %C máximo) Aceros resultufurados Aceros resultufurados y refosforados 1.00 - 1.65 % Mn.	Al carbono
13xx	Mn 1.75	Al manganeso.
23xx 25xx	Ni 3.50 Ni 5.00	Al níquel.
31xx 32xx 33xx 34xx	Ni 1.25 / Cr 0.065 y 0.80 Ni 1.75 / Cr 1.07 Ni 3.50 / Cr 1.50 t 1.57 (alto níquel) Ni 3.00 / Cr 0.77	Al níquel - cromo.
40xx 44xx	Mo 0.20 y 0.25 Mo 0.40 y 0.52	Al molibdeno.
41xx	Cr 0.50, 0.80 y 0.95 / Mo 0.12, 0.20, 0.25 y 0.30	Al cromo - molibdeno
43xx 43Vxx 47xx	Ni 1.82 / Cr 0.50 y 0.80 / Mo 0.25 Ni 1.82 / Cr 0.50 / Mo 0.12 y 0.25 / V 0.03 min. Ni 1.05 / Cr 0.45 / Mo 0.020 y 0.35	Al cromo-níquel-molibdeno
81xx 86xx 87xx 88xx 93xx 94xx 97xx 98xx	Ni 0.30 / Cr 0.40 / Mo 0.12 Ni 0.55 / Cr 0.50 / Mo 0.20 Ni 0.55 / Cr 0.50 / Mo 0.25 Ni 0.55 / Cr 0.50 / Mo 0.35 Ni 3.25 / Cr 1.20 / Mo 0.12 Ni 0.45 / Cr 0.40 / Mo 0.12 Ni 0.55 / Cr 0.20 / Mo 0.20 Ni 1.00 / Cr 0.80 / Mo 0.25	Al cromo-níquel-molibdeno
46xx 48xx	Ni 0.85 y 1.82 / Mo 0.20 y 0.25 Ni 3.50 / Mo 0.25	Al níquel - molibdeno
50xx 51xx 50xxx 51xxx 52xxx	Cr 0.27, 0.40, 0.50, y 0.65 Cr 0.80, 0.87, 0.92 0.95, 1.00 y 1.05 Cr 0.50 Cr 1.02 C 1.00 min. Cr 1.45	Al cromo
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 en aleación
xxBxx	B denota Boro	Aceros al Boro
xxLxx	L denota Plomo	Aceros al Plomo

TABLA 4.2 DESIGNACIÓN AISI/SAE PARA ACEROS AL CARBÓN Y DE BAJA



DESIG - NACIÓN	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 caliente
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.

Estas prácticas son conocidas como procesamiento termo-mecánicamente controlado. Los principales micro-aleantes 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 son 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 de carbono, estos aceros poseen una excelente soldabilidad.

Los principios metalúrgicos (microaleación, endurecimiento subestructural) involucrados en la producción de estos aceros y los métodos adecuados para soldarlos (control estricto sobre las temperaturas de precalentamiento y entre pasos y sobre el calor aportado por pasos) es un asunto complejo que va más allá de las posibilidades y alcance de este texto, por lo que el lector interesado en tales asuntos debe remitirse a textos especializados sobre metalurgia e ingeniería de soldadura.



Aceros de alta aleación

Como se mencionó anteriormente, los aceros de alta aleación contienen más 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 10% o más de manganeso y alto carbono, poseen gran tenacidad y pueden ser endurecidos cuando son sometidos a trabajo en frío. Su estructura es austenítica debida a que el alto contenido de manganeso retiene esta 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 los aceros de alta aleación más importantes desde el punto de vista comercial. Son definidos como aquellos que resisten el ataque de muchos medios corrosivos a temperaturas atmosféricas y elevadas. Esta resistencia se debe a su alto contenido en cromo de por lo menos el 11% lo cual provoca que en las superficies se forme una película densa y delgada de óxido 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 en 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 tenacidad a 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 acero inoxidable: los austeníticos, los ferríticos y los martensíticos. Los últimos contienen la menor cantidad de cromo y mayor contenido de carbono y poseen alta templeabilidad. También existen aleaciones endurecibles por precipitación, y las superausteníticas, superferríticas y duplex; estas últimas tienen una microestructura compuesta por austenita y ferrita.



Los grados comunes de los aceros inoxidable laminados o forjados están clasificados con designaciones AISI en base a su composición química, pero otros no se identifican de acuerdo con este sistema, sino por otros medios tales como marcas comerciales.

Las designaciones AISI clasifican a los aceros inoxidable en series y en grados. Por ejemplo, el grado 304 es la aleación más común de la serie 300, que corresponde a los aceros inoxidable 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 se 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 de carbono, que para el grado "L" es menor que para el grado estándar.

La tabla 4.4 muestra, de manera resumida, las series o grupos generales de aceros inoxidable, 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, austenítico, no templable, no magnético
3xx	Al Cr-Ni, austeníticos, no templables y no magnéticos
4xx	Al Cr, no templables, ferríticos y magnéticos
4xx	Al Cr, templables, martensíticos y magnéticos
Ninguna	Endurecidos por precipitación, martensíticos, austeníticos y semiausteníticos

Tabla 4.4 Designación 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 centésimas de punto porcentual, y 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 a un 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 inoxidables 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 inoxidables para ser usados en servicios a altas temperaturas, y en la actualidad existen aceros resistentes al calor que son muy parecidos a ciertos aceros inoxidables y a veces sólo difieren de estos por pequeñas modificaciones en su composición química.



Especificaciones ASTM para aceros Las especificaciones establecidas por la ASTM (antes American Society for Testing and Materials – Sociedad Americana de Pruebas y Materiales) 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 o placa de acero, por ejemplo), método de fabricación (forjado, laminación, etc.) y aplicación (uso estructural o para recipiente a presión, para altas o bajas temperaturas, etc.). En algunos casos, las especificaciones ASTM, para los diferentes grados o tipos que incluyen, adoptan las clasificaciones AISI o ACI.

4.08 TRATAMIENTOS TÉRMICOS DEL ACERO como se mencionó anteriormente, el intervalo amplio de las propiedades mecánicas que tienen 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 Fe-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 de carbono, mientras que la templabilidad es una medida de la cantidad de martensita que se forma durante el enfriamiento. De este modo, en ciertos aceros con alta templabilidad se formará martensita cuando son enfriados al aire, pero los de baja templabilidad requerirán de 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 microestructura 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 la pieza a tratar y mantenerla a la 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 recocido se aplica a metales ferrosos, implica que se trata de recocido total, y se emplea para reducir la dureza y los esfuerzos residuales, mejorar la maquinabilidad, facilitar el trabajado 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 AC3 y A_{cm} del diagrama Fe-C).

Adicionalmente, también existen los recocidos de re-cristalización, isotérmico e intermedio.

Normalizado

Consiste en calentar aleaciones ferrosas 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 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 refinar las estructuras dendríticas de piezas de fundición, así como refinar el grano y homogeneizar la micro-estructura para mejorar la 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 Fe-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 inferior a la crítica, la pieza no se endurecerá completamente. La 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 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 temperaturas menores a la 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

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.

Es el tratamiento térmico mas usado en las partes soldadas y la temperatura de alivio de los esfuerzos para la mayor parte de los aceros al carbón y de baja aleación oscila entre 595 y 630°C.

4.09 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 (nitrógeno, oxígeno e hidrógeno) 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 microestructura, 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 de fusión, en el metal de soldadura, hasta prácticamente la ambiente, en el



metal base, pasando por el intervalo de transformación. La figura 4.26 ilustra las partes de una junta soldada.

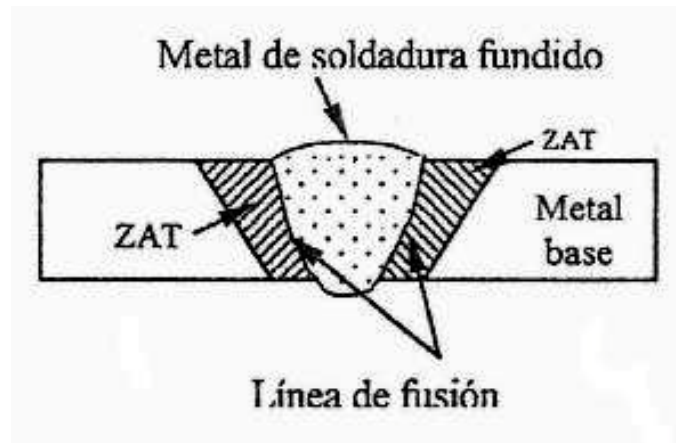


Fig.4.26 Partes de las juntas soldadas

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 (aleación) 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 (debido a que son sometidos a temperaturas de recocido) 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 inoxidables 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 4.27 ilustra el efecto del ciclo térmico en los metales base deformados en frío.

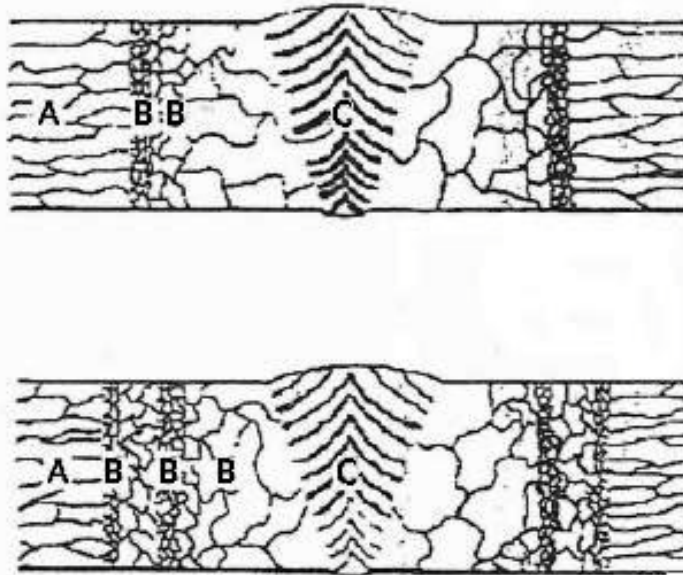


Fig. 4.27 Zonas afectadas térmicamente con granos recrystalizados.

Esta figura muestra las micro-estructuras 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 recrystalizadas, donde la primera zona de grano fino resulta de la re-cristalización de la fase alfa trabajada en fría, 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 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, y 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.

Es difícil soldar este tipo de aleaciones 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 este 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 las tres formas básicas de cambios dimensionales que se describen a continuación y se ilustran en la figura

Expansión térmica (figura 4.28) 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:

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

Donde:

(cm/ cm/°C)	
ΔT = Incremento de temperatura	ΔL = Cambio de longitud (cm)
L_f = Longitud final (cm)	α = Coeficiente de expansión térmica
L_o = Longitud inicial (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 (α).

Fig.4.28

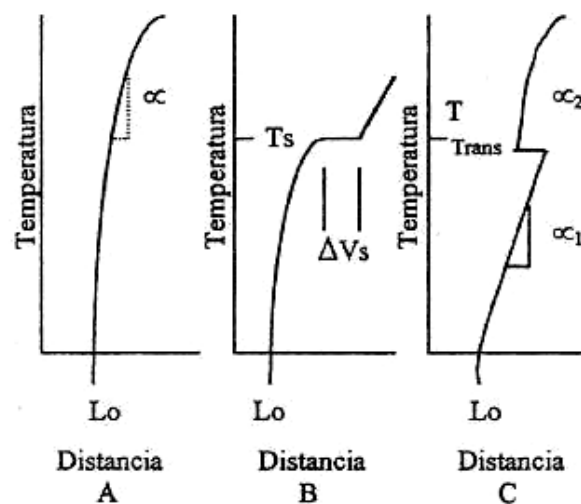


Fig. 4.28 Formas básicas de los cambios dimensionales durante la soldadura.



- Cambios de volumen durante la fusión y la solidificación 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 Las transformaciones de fase 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 (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 tanta 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 proporción 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.



5.10 TRANSFORMACIONES DEL ACERO DURANTE LA SOLDADURA

Las regiones de la zona afectada térmicamente en los aceros que se endurecen por transformaciones de fase durante la soldadura, así como su relación con las temperaturas, pico alcanzadas y el diagrama Fe-C se muestra en la figura 4.29

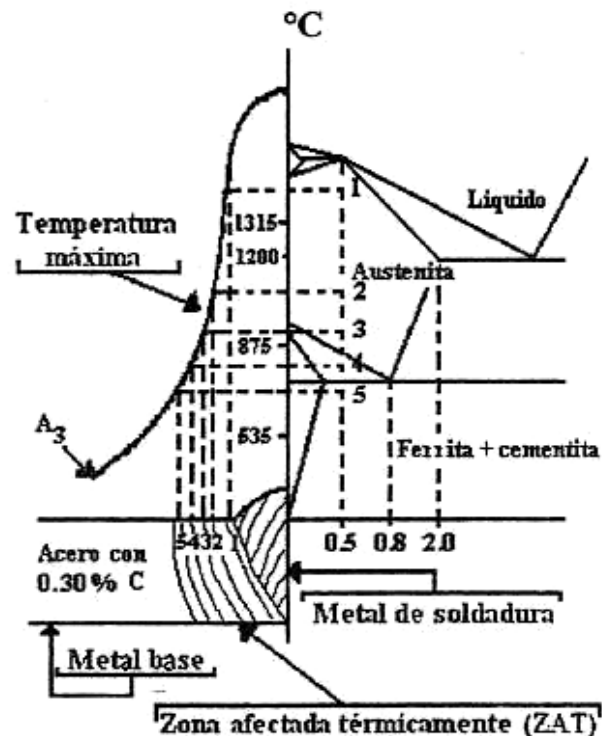


Fig.4.29 Relación aproximada de las temperaturas pico en las juntas soldadas y el diagrama Fe-C.

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 manera que esta región puede transformarse rápidamente en martensita durante el enfriamiento.

La región 2 también se austenita, 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 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 carbonó aumenta, también se incrementa la susceptibilidad al agrietamiento y la dureza, y disminuye la tenacidad.

La dureza de la ZAT generalmente es un buen indicador de la cantidad de martensita presente y de la susceptibilidad al agrietamiento: Cuando la dureza del metal es inferior a 250 HB (Dureza Brinell) casi nunca se presenta el agrietamiento, pero este es frecuente si la dureza del metal es cercana a 450 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 éstas (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 es muy corta con respecto de la duración de los ciclos de tratamiento 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, y 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.

4.11 SOLDABILIDAD Y CARBONO EQUIVALENTE

En las secciones 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 considero 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



$$CE = \%C + \% Mn/4 + \% Si/4$$

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 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 adecuado 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. 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 depositado, 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 metales de aporte y ' el 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 (en la ZAT) y de la



dureza, es inversamente proporcional al carbono equivalente. Por lo general, los aceros con bajos valores de CE (por ejemplo, de 0.2 a 0.3) poseen una soldabilidad excelente, pero cuando este valor excede de 0.40, la soldabilidad (en términos de la susceptibilidad al agrietamiento debajo de los cordones producido por hidrógeno) disminuye considerablemente. Así, un acero con 0.20% de carbono y 1.60% de manganeso, tiene un CE de 0.60 (de acuerdo con la segunda fórmula citada), valor que indica una sensibilidad al agrietamiento relativamente alta.

4.12 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 del 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 (distorsión, esfuerzos residuales excesivos, discontinuidades tales como grietas, etc.), es necesario, entre otros factores, controlar la velocidad de enfriamiento. Tal control puede ejercerse por medio de las siguientes variables de soldadura

Precalentamiento

El precalentamiento es el calor aplicado al metal base o sustrato para obtener y mantener en éste la temperatura de precalentamiento. 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 precalentamiento, aunque en algunos casos también el límite máximo, y éste coincide con la temperatura máxima entre pasos. El precalentamiento 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 contracción, con lo que se reducen los esfuerzos residuales.

Temperatura entre pasos

Ésta, 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 precalentamiento. 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 cuando se sueldan aceros templados y revenidos o aceros inoxidable austeníticos, las altas temperaturas entre pasos 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:

$$H = EI(60)/V$$

Donde:

H = Calor aportado en Joules/Pulg.

E = Voltaje del arco, en Voltios

I = Corriente de soldadura, en Amperios

V = Velocidad del arco, en Pulg./ Min.

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 micro-estructura y las propiedades de las juntas soldadas), y 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.

4.13 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 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 subsecuente transformación martensita.

Las posibles fuentes de hidrógeno, son la humedad y otros compuestos de hidrógeno procedentes del metal de aporte, del revestimiento del electrodo, de los fundentes, del gas de protección o de contaminación de 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 7000°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 templeables 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 la ocurrencia de este tipo de problemas son el precalentamiento del metal base para disminuir la velocidad del 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 6 se tratan con más detalle los requisitos y precauciones asociados con los procesos de bajo hidrógeno.

4.14 SOLDADURA DE ACEROS INOXIDABLES

Para soldar exitosamente a los aceros inoxidable, 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 primero 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 de 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 requiere 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.

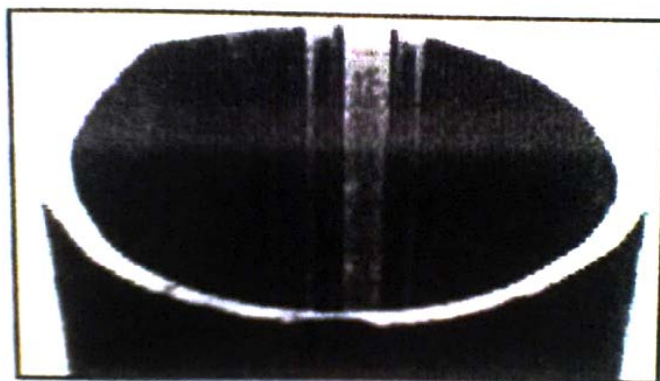
Si estos aceros son mantenidos por períodos relativamente largos a la temperatura de sensitización, que oscila entre 427 y 871°C, parte del cromo en solución cerca de los límites de grano se difunde hacia estos, donde se forman y precipitan carburos de cromo. Como resultado de este hecho, hay una reducción del contenido 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 el tiempo suficiente para que precipiten carburos de cromo en la ZAT, durante el servicio pueden ocurrir fallas por corrosión intergranular.

Las siguientes figuras 4.30 a 4.32, tomadas del Volumen 4, 7ª Edición del Manual de Soldadura de AWS, ilustran este tipo de corrosión en un acero inoxidable tipo 304.



Fig. 430 Microestructura de una ZAT sensitizada con corrosión intergranular.

Fig. 4.31 Sección de un tubo con corrosión intergranular.



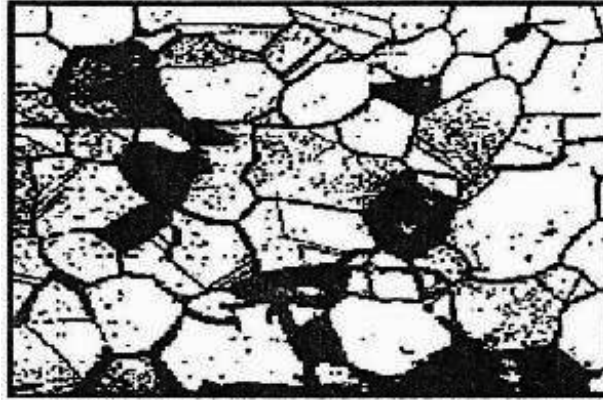


Fig. 4.32 Macrografía de una sección transversal que muestra la extensión de la zona de corrosión interregular.

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, esto 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 acero 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 inoxidables austeníticos está 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 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 más 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 de manera 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 diagramas de constitución desarrollados 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 debiera 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 al impacto y en algunos casos 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 clave de la soldadura de los otros grupos de acero inoxidable. Lo anterior se debe a que estos temas son demasiado extensos y especializados y a que están fuera de las posibilidades de este texto, pero se juzgó 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 se 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.



TEMA 5

CÓDIGOS, NORMAS Y ESPECIFICACIONES

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 de las normas, y el alcance, campo de aplicación, extensión y estructura de éstas 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 sólo 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 productos y de servicios, 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.

5.01 ORIGEN DE LAS NORMAS

Las normas son desarrolladas, publicadas y actualizadas por organizaciones y entidades gubernamentales y privadas con 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 -AASmO (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 de Acero)*
- *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 prepara, 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 aprobadas.

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 indebida 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 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 las aplicaciones particulares que son de su interés o responsabilidad.

En los Estados Unidos de América, la entidad responsable de coordinar las normas nacionales es El Instituto Nacional Americano de Normas. El ANSI es una 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 del 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 B31.4, "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 norma 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 -eSA).
- Deutsches Institute 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 Standard -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 (International Organization for Standarization -ISO), 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 isos, que significa igual. Isos también es la raíz del prefijo "iso". Esta designación fue seleccionada debido a que conceptualmente remite a "igualdad", "uniformidad", "normal".

La ISO tiene su sede en Ginebra, Suiza, está compuesta por más de 120 países miembro 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.

Esquema Mexicano de Normalización

En los Estados Unidos Mexicanos, los trabajos relacionados con el desarrollo, publicación y actualización de las normas son regidos por la Ley Federal sobre Metrología y Normalización. Esta ley también cubre las actividades de certificación, acreditación y verificación. El Programa Nacional de Normalización es la instancia encargada de la coordinación de las actividades asociadas con el desarrollo de las normas. En México



operan las Normas Oficiales Mexicanas -NOM- y las Normas Mexicanas -NMX-. Las NOM son de observancia obligatoria debido a que se refieren a productos o actividades que puedan constituir un riesgo para la seguridad de las personas o dañar la salud humana, animal, vegetal, el medio ambiente general y laboral, o para la preservación de recursos naturales. Las NMX, en términos generales son de aplicación voluntaria.

5.02 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 y otros documentos de uso común en la industria tienen diferencias en cuanto a su extensión, alcance, aplicabilidad y propósito. A continuación se mencionan las características clave de algunos de estos documentos.

Código (code).

Código es un conjunto de 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 término "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, prácticas recomendadas, definiciones de términos, clasificaciones y símbolos gráficos que han sido aprobados por un comité patrocinador (vigilante) de cierta sociedad técnica y adoptados por ésta.

Especificación

Una especificación es una norma 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 si los requisitos especificados para el producto han sido cumplidos o no.

Prácticas 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 específica, para que los



usuarios puedan 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 en 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 funcionamiento 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 términos y símbolos estándar propios del dominio específico del campo de aplicación que regulan 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.

5.03 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 éstas están incluidas en contratos u otros documentos de compra. El cumplimiento de las prácticas recomendadas o las guías es opcional. Sin embargo, si 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, el empleo de las guías o las prácticas 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 ésta, aspectos que están indicados en la introducción o 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 su 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 atmósferas corrosivas, bajo temperaturas elevadas o sometida 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 exigencias específicas que no permiten acciones alternativas, otras permiten acciones o procedimientos alternos, siempre y cuando se cumpla con los criterios estipulados, mismos que generalmente están dados como requisitos mínimos. Como ejemplo de esta situación puede citarse la resistencia última 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 el 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 recorrir a requisitos adicionales para obtener las características de calidad que necesitan cubrir. Las especificaciones, ASTM por ejemplo, de materiales y productos, incluyen los requisitos suplementarios previstos para especificar las características adicionales correspondientes, pero en circunstancias especiales, aún estos podrían resultar insuficientes.

Existen varios mecanismos por medio de los cuales la mayoría de las normas son revisadas. Estos mecanismos se ponen en práctica cuando se detecta que una norma tiene errores, contiene restricciones sin fundamento o no es aplicable con respecto a desarrollos tecnológicos recientes. Algunas normas son actualizadas regularmente en base de períodos establecidos, mientras que otras son revisadas según lo requieran las necesidades. Las revisiones pueden ser en forma de "addenda", o éstas pueden ser incorporadas en documentos que reemplazan 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 de 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 los requisitos estipulados. Siempre que existan dudas en cuanto a las ediciones o revisiones de los documentos a ser usados, éstas debieran aclararse antes de que se inicien los trabajos correspondientes. Hay algunas palabras clave que se emplean ampliamente en las normas relacionadas con bienes soldados, y a fin de asegurar su interpretación correcta, es conveniente precisar su significado e intención.

- **Shall y Will** (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, debiera), denota que el requisito o aspecto al que se refiere no es obligatorio, pero se recomienda como una buena práctica. Las prácticas 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

5.04 ALGUNAS NORMAS SOBRE EQUIPOS Y ESTRUCTURAS SOLDADAS

A continuación se listan algunas de las normas que con mayor frecuencia están asociadas con las asignaciones del inspector de soldadura:

- CÓDIGO ANSI / ASME BPV (ASME BPV CODE) PARA CALDERAS Y RECIPIENTES A PRESIÓN.
- CÓDIGO ANSI / ASME B3.1 PARA / TUBERIAS SUJETAS A PRESIÓN.
- CÓDIGO ANSI / AWS D1.1 DE SOLDADURA ESTRUCTURAL ACERO
- CÓDIGO ANSI / AWS D1.2 PARA SOLDADURA ESTRUCTURAL ALUMINIO



- CÓDIGO ANSI / AWS D1.3 DE SOLDADURA ESTRUCTURAL LÁMINA DE ACERO (ESPESORES DELGADOS, MENORES DE 1/8")
- CÓDIGO ANSI / AWS D1.4 PARA SOLDADURA ESTRUCTURAL – ACERO DE REFUERZO (VARILLAS PARA CONCRETO REFORZADO)
- CÓDIGO ANSI / AWS D1.5 PARA SOLDADURA DE PUENTES
- CÓDIGO ANSI / AWS D1.6 PARA SOLDADURA ESTRUCTURAL –ACERO INOXIDABLE
- ESPECIFICACIÓN ANSI / AWS D15.1 DE SOLDADURA DE FERROCARRILES CARROS Y LOCOMOTORAS
- ESPECIFICACIÓN ANSI / AWS D14.1 PARA SOLDADURA DE GRÚAS INDUSTRIALES Y OTROS EQUIPOS DE MANEJO DE MATERIALES
- ESPECIFICACIÓN ANSI / AWS D3.6 PARA SOLDADURAS SUBACUÁTICA
- ESPECIFICACIÓN ANSI / AWS D18.1 PARA SOLDADURA DE SISTEMAS DE TUBERÍA DE ACERO INOXIDABLE AUSTENÍTICO PARA APLICACIONES SANITARIAS (HIGIÉNICAS)
- ESPECIFICACIÓN ANSI / AWS B2.1 PARA LA CALIFICACIÓN DE PROCEDIMIENTOS Y HABILIDAD DE SOLDADURA
- NORMA API 1104, SOLDADURA DE LÍNEAS DE TUBERÍA 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 2A-WSD, PLANEACIÓN, DISEÑO y CONSTRUCCIÓN DE PLATAFORMAS MARINAS FIJAS -DISEÑO CON ESFUERZOS DE TRABAJO
- PRACTICA ·RECOMENDADA API 2A-LRFD, 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 Y 3183-3/COR. INDUSTRIAS DEL PETRÓLEO Y GAS NATURAL - TUBO DE ACERO PARA LÍNEAS DE TUBERÍA – CONDICIONES TECNICAS DE ENTREGA, TUBOS DE REQUISITOS CLASES 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 cubren 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 que recurrir a normas extranjeras. Por otra parte, la globalización de las actividades industriales y comerciales impone el empleo de las normas nacionales del país de las partes que contratan el suministro de bienes, las de 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 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 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.

5.05 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 (National 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 auditoría 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 está 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 construyen las compañías, y antes de que éstas 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:



1 Calderas de Potencia

11 Especificación es de Materiales

Parte A - Materiales ferrosos

Parte B - Materiales no ferrosos

*Parte C - Varillas, electrodos y
metales de aporte para soldadura*

Parte D - Propiedades

111 Subsección NCA - Requisitos Generales para las Divisiones 1 y 2

111 División 1

Subsección NB -Componentes Clase I

Subsección NC -Componentes. Clase 2

Subsección ND -Componentes Clase 3

Subsección NE -Componentes Clase MC

Subsección NF -Soportes

*Subsección NG -Estructuras de Soporte
del Núcleo*

*Subsección NH -Componentes Clase 1
en Servicio a Temperaturas Elevadas
Apéndices*

111 División 2 :-Código para Recipientes y Contenedores de Concreto del Reactor

IV Calderas de Calefacción

V Exámenes no Destructivos

VI Reglas Recomendadas para el Cuidado y Operación de Calderas de



*Calefacción**VII Reglas Recomendadas para el
Cuidado de Calderas de Potencia**VIII Recipientes a Presión
División I**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 las 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 está orientada a los diversos componentes requeridos en la industria de la energía nuclear.

La Sección IV aplica a calderas que suministran vapor y 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 éstos están incluidos las torres de destilación, los reactores y otros recipientes usados para 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.

5.06 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.

Esta sección no incluye la tubería externa de las calderas que es definida por la Sección 1 del Código ASME BPV; tal tubería requiere un sistema de control de calidad y una inspección por terceras partes similar a aquella requerida para la fabricación de calderas. Pero por otra parte, los materiales, el diseño, la fabricación, instalación, inspección y pruebas para la tubería externa de calderas debe 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 fase gaseosa, o mezclas de estos gases. Las



aplicaciones que eran objeto de esta sección actualmente están cubiertas por la Sección B31.4

Sección B31.3, 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 servicio, 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 probarse de acuerdo con los requisitos de esta Sección del 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 (marinas, 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 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 Laboratories o cualquier otro laboratorio de pruebas 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 principales de gas y 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 en 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 Determina la Resistencia Remanente de Líneas de Tubería Corroída. Un Suplemento al Código ASME B31

Ésta contiene procedimientos para la evaluación de tuberías en servicio corroídas, así como para la toma de las acciones pertinentes a fin de determinar si éstas 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 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 del código a fin de determinar correctamente cuáles 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. Está 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 a 1/8Pulg. (3.2 mm), metales base diferentes a los aceros al carbono y de baja aleación y los aceros con un límite de cedencia mínimo mayor a 100,000 lb/pulg² (690 MPa.) A continuación se indican las secciones que lo componen y un 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

Cubre 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 inspectores, los criterios de aceptación para soldaduras de producción y los procedimientos estándar para realizar la 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 D1.5

Esta norma cubre los requisitos de fabricación por medio de soldadura aplicables a los puentes de carreteras, y debe ser usado conjuntamente con la *Especificación Estándar para Puentes de Carreteras AASHTO* o la *Especificación A ASHTO para el Diseño de Puentes LRFD*.

Las provisiones de este código no son aplicables a la soldadura de metales base de espesores menores a 3 mm.

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*

5.07 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 compresión, 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 soldaduras aceptables realizadas por soldadores calificados que usan procedimientos y equipo de soldadura y materiales aprobados. También presenta métodos para la producción de radiografías adecuadas, realizadas por técnicos que empleen procedimientos y equipo 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 América.

A continuación se citan las secciones que forman parte de esta norma:

Sección 1 - Generalidades

Sección 2 - Calificación de Procedimientos de Soldadura para Soldaduras 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 Soldaduras 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 - Soldadura 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 petrolera 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, así como tubos de extremos planos de peso estándar, de peso regular, de pared extra-gruesa y doble extra-gruesa, de 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:

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, Longitudes, Defectos y Acabados en los Extremos

8. Coples

9. Inspección y Pruebas

10. Marcado

11. Recubrimiento y Protección



12. Documentos

Apéndice A - Especificación para Uniones Soldadas de dos 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

Equivalentes Métricos

Apéndice F - Requisitos Suplementarios

Apéndice G - Dimensiones del

Dispositivo de Prueba de Doblado Guiado

Apéndice H - Inspección del Comprador

Apéndice I - Instrucciones de Marcado para Licenciarios API

Apéndice J - Conversiones de Unidades

Métricas (SI) y Procedimientos de Redondeo.

5.08 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 la 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.

5.09 LAS ESPECIFICACIONES ASTM

ASTM (en otro tiempo The American Society for Testing and Material, Sociedad Americana de Pruebas y Materiales) desarrolla y publica las 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 todas 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 incorpora las normas nuevas y revisadas. Actualmente está compuesta de 15 secciones formadas por 73 volúmenes y un índice. Las especificaciones para los productos metálicos, métodos de prueba y procedimientos analíticos de interés 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 (letras) que forman parte de la designación alfanumérica de cada especificación indican de manera general el contenido de éstas: Para metales ferrosos se emplea el prefijo "A" (Especificación ASTM A36 para Acero Estructural, por ejemplo), para metales no ferrosos se usa "B", Y para materias diversas, entre las que se 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 de las especificaciones ASTM incluyen requisitos suplementarios que deben ser especificados por el comprador si éste 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 esas pruebas cumplen con los requisitos de la especificación designada, el material puede ser usado para esa aplicación.

Algunos productos cubiertos por las especificaciones ASTM son fabricados por soldadura. De éstos, el grupo más grande es el de tubos de acero. Algunos tipos de tubo son producidos a partir de solera, plancha o lámina, por medio de operaciones de rolado y soldadura por arco para hacer 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 tubo son producidos con costuras soldadas por resistencia, y en este caso, por lo general las especificaciones ASTM aplicables no establecen requisitos especiales- de soldadura, pero el producto terminado es sometido a las 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 particular, o que ésta 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 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 requisitos generales, definen los términos empleados o hacen referencia al documento en que están definidos. *Pertenencia de*



Materiales (App urtenant 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 las 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 está incluida en las especificaciones de requisitos generales, y establece la información que deben incluir los pedidos o las órdenes de compra para describir adecuadamente el material deseado, a fin de evitar posibles confusiones. Los principales aspectos involucrados son: designación ASTM (incluyendo tipo, clase, grado) y fecha de emisión de la especificación, cantidad, nombre del material, (acero al carbono, por ejemplo), forma del producto (perfiles, placa, barra, etc.), tamaño, condición (laminado o con tratamiento térmico y tipo de tratamiento), condición superficial (acabado), reportes de prueba, certificados de calidad y requisitos suplementarios y adicionales.

Proceso de Fabricación

Tratamientos Térmicos

Estructura Metalúrgica

Calidad

Requisitos de composición química

Propiedades Mecánicas

Inspección y Pruebas Especificadas

Métodos de Prueba

Reportes de Prueba y Certificados



Variaciones Permisibles en Dimensiones y Masa

Reparaciones

Marcado, Identificación, Empaque y

Carga para el Embarques

Rechazos

Requisitos Suplementarios

Esta sección contiene los requisitos suplementarios, ya sea estandarizado u opcional, aplicables a los productos cubiertos por una especificación particular. Es conveniente hacer énfasis en el sentido de que el productor está obligado a que los bienes que suministra sólo deben cumplir los requisitos estándar contenidos en las especificaciones correspondientes, y que para que también se cumplan los requisitos suplementarios deseados, estos deben estar especificados en las órdenes de compra.

Especificaciones AWS para materiales consumibles de soldadura

La Sociedad Americana de Soldadura publica entre una cantidad numerosa de normas (algunas de las cuales han sido descritas o referidas en este texto) sobre usos y calidad de materiales, productos, pruebas, operaciones y procesos de soldadura, las especificaciones para varillas, electrodos y metales de aporte de soldadura.

Estas especificaciones cubren la mayor parte de los materiales consumibles empleados en procesos 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 metales de aporte consta de una letra "A" seguida de un 5, un punto y uno o 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 Americanas 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 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 éstas. 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 formarán 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 éstos están incluidos en las especificaciones



mismas, pero el control de los materiales en rubros tales como la inspección durante recibo, la identificación, rastreabilidad, 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 éstas, según la aplicación de que se trate. Por ejemplo, la Sección VIII, División I del Código ASME BPV, entre sus apéndices obligatorios incluye el No. 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 de personal

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 7.

5.10 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, quién debe realizar tales actividades y cuándo, 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/Erección e Inspección de Verificación, siendo ésta última una prerrogativa del propietario. ASME B31.3 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 de agudeza visual. Entre estos esquemas destaca el Programa de Certificación de Inspectores de Soldadura 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 refieren a actividades generales de control o aseguramiento de calidad (tales como control de materiales base y de 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 más 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 sí 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 que éste debe estar calificado y certificado de acuerdo con la edición vigente de la Práctica Recomendada SNT-TC-1A 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 10 establece claramente AWS D1.1 en sus párrafos 6.14.7.1 y 6.14.7.2, sólo individuos certificados como Nivel 1 (en la técnica no destructiva correspondiente) y trabajando bajo la supervisión de individuos 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 1 y TI debe ser realizada por mi individuo certificado como Nivel III por la ASNT o que ha sido certificado cubriendo todos los requisitos, incluyendo los de examen, establecidos en el documento SNT-TC-1A Hay algunas variantes' en los requisitos anteriores, ya que ASME B31.3 sólo indica que la Practica Recomendada SNT-TC-1A puede emplearse para propósitos de calificación y certificación mientras que la Sección VIII División 1 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, Partes D, E y F.
- ✓ La Norma API 1104, en su Sección 8 presenta métodos y procedimientos radiográficos y establece los requisitos aplicables, y para las situaciones en las que están especificadas pruebas con partículas magnéticas, líquidos penetrantes y ultrasonido, remite al usuario a las especificaciones ASTM correspondientes. (La sección 6 contiene los estándares de aceptación).



5.11 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 tubería 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 -NBI), 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 operando 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-I000, "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/Usuaria



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 refinación de petróleo y de procesos químicos, pero puede ser usado, cuando resulte práctico, en cualquier sistema de tubería.

Norma API 653 para la Inspección, Reparación, Reconstrucción y Alteración de Tanques

Esta cubre los tanques de acero al carbono y de baja aleación contruidos 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, envolvente, estructura, techo, accesorios y a las boquillas unidas a las primeras bridas, juntas roscadas o conexiones soldadas exteriores.

Código API 510 para la Inspección de Recipientes a Presión

Cubre el mantenimiento, inspección, reclasificación (rerating) y alteración de recipientes a presión en servicio empleados en la industria petroquímica y de refinación.

Práctica 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 API 570
- Certificación de Inspector de Tanques de Almacenamiento API 653
- Certificación de Inspector de Recipientes a Presión API 510



TEMA 6

PROCESOS DE SOLDADURA

INTRODUCCION.

En este capítulo se hace una descripción breve de los procesos de soldadura más ampliamente usados en la fabricación, construcción y montaje de los equipos, partes, estructuras e instalaciones que con mayor frecuencia se ven involucrados los inspectores de soldadura. Existe una gran variedad de procesos de soldadura, varios métodos y técnicas de aplicación y una extensa cantidad y variedad, en constante aumento, de metales base y de aporte, por lo que una revisión de tales procesos necesariamente resulta incompleta. Adicionalmente, debido a que cada proceso involucra aspectos técnicos, de producción, metalúrgicos, económicos y de otra índole, las consideraciones de este capítulo se limitan a los procesos más usuales, mismos que son abordados desde los puntos de vista más estrechamente relacionados con la inspección de soldadura: una descripción breve del proceso y del equipo que se emplea, sus principales aplicaciones, ventajas y limitaciones, las variables particulares más relevantes y, en especial, las especificaciones y clasificaciones de los electrodos y metales de aporte.

Otros dos aspectos de los procesos, esenciales desde el punto de vista del inspector, son las discontinuidades e imperfecciones asociadas con cada uno de ellos y los métodos de inspección aplicables, pero estos son abordados en los capítulos sobre discontinuidades y pruebas no destructivas.

GENERALIDADES.

Debido a que en el idioma Español el término *soldadura* se aplica de manera indistinta para referirse a diferentes grupos de procesos de unión y a diversos objetos y significados (unión soldada, electrodo recubierto, metal depositado, metal de aporte y operaciones de soldadura, entre otros), es conveniente, antes de seguir tratando sobre los procesos de soldadura, hacer algunas precisiones sobre el significado de este término, para lo que se recurrirá a las siguientes definiciones estandarizadas: **Soldadura** (welding) Es la coalescencia localizada de metales o no metales, producida por el calentamiento de los



materiales a una temperatura apropiada, con o sin aplicación de presión y con o sin el empleo de material de aporte. **Soldadura fuerte** (*brazing*): Grupo de procesos de soldadura, los cuales producen la coalescencia de los materiales por el calentamiento de éstos, a la temperatura adecuada, y empleando un metal de aporte que tiene una temperatura de *liquidus* superior a los 450 °C (840 °F), pero inferior a la temperatura de *solidus* del metal base. El metal de aporte se distribuye por acción capilar entre las superficies de la junta mantenidas en contacto estrecho.

Soldadura blanda (*soldering*): Grupo de procesos de soldadura que producen coalescencia de materiales, calentándolos a una temperatura adecuada y usando material de aporte que tenga una línea de *liquidus* que no exceda de 450 °C (840 °F) y debajo de la línea de *solidus* del metal base. El metal de aporte se distribuye por acción capilar entre las superficies de la junta mantenidas en contacto estrecho.

6.01 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 fig. 6.1 así como la tabla 6.1 procesos de soldadura también las características propias de cada aplicación en la fig. 6.2, y cuales de estos son aplicables en algún proceso, fig. 6.3.



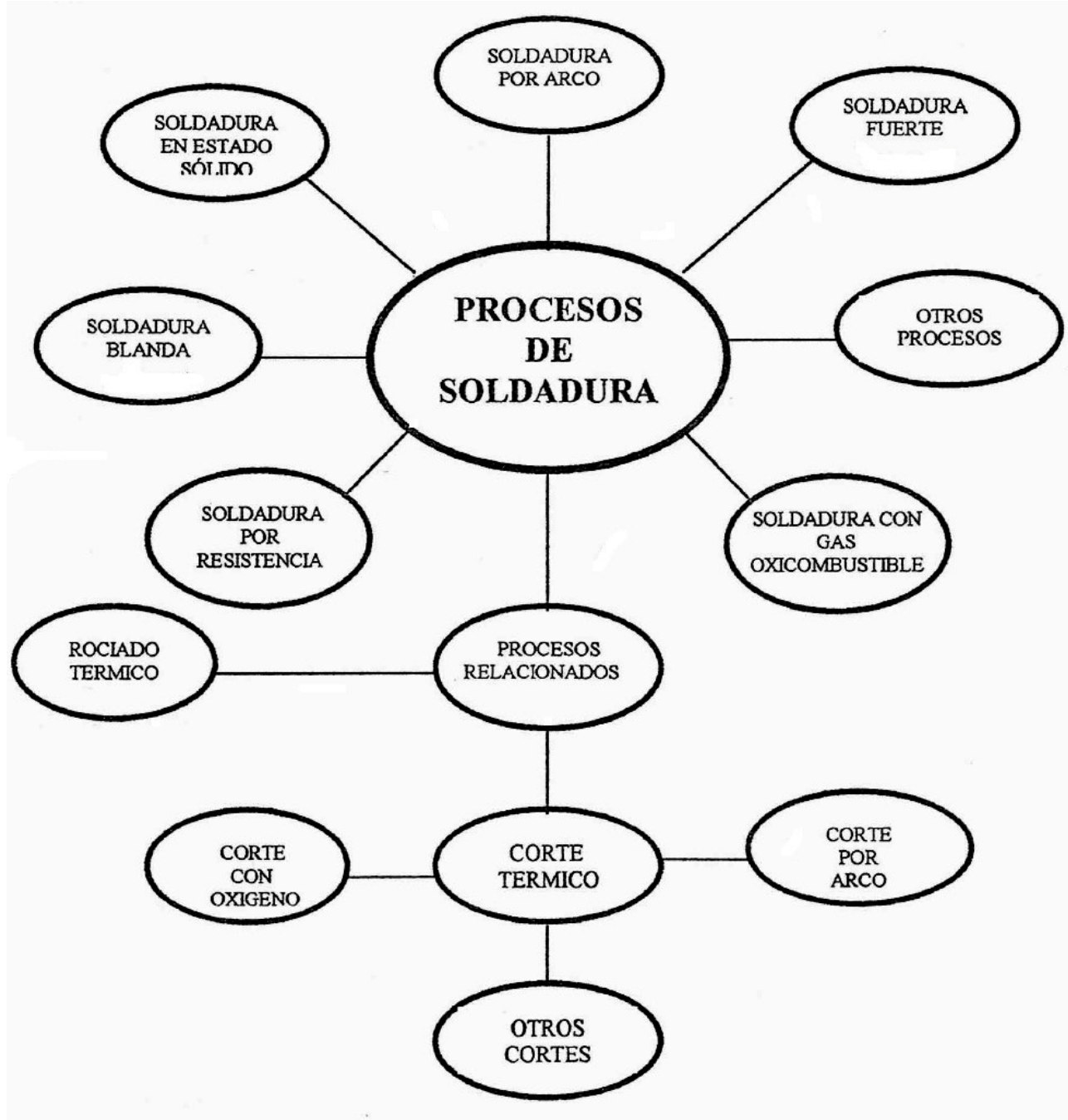


Fig. 6.1 Carta maestra de los procesos de soldadura (de acuerdo con la norma ANSI/AWS A3.0-94, "términos y Definiciones Estándar de Soldadura").



SOLDADURA POR ARCO (ARC WELDING - AW)

Soldadura con hidrógeno atómico	AHW
Soldadura de arco con electrodo desnudo	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 por electro-gas	EGW
Soldadura por arco con electrodo tubular	FCAW
Soldadura por arco metálico protegido con gas	GMAW
Soldadura por arco metálico pulsado protegido con 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 WELDING - SSW)

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



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 en 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	1S
Soldadura blanda por rayos infrarrojos	IRS
Soldadura blanda con hierro	INS
Soldadura blanda por resistencia	RS
Soldadura blanda por flama (con antorcha)	TS
Soldadura fuerte por ultrasonido	USS
Soldadura blanda por agitación	WS

OTROS PROCESOS DE SOLDADURA

Soldadura por haz de electrones	EBW
Soldadura por haz de electrones en alto vacío	EBW-HV
Soldadura por haz de electrones al medio vacío	EBW-MV
Soldadura por haz de electrones sin vacío	EBW-NV
Soldadura por electro-escoria	ESW
Soldadura por flujo	FLOW f
Soldadura por inducción	IW
Soldadura por haz láser	LBW



Soldadura por percusión	PEW
Soldadura por aluminotermia	TW

SOLDADURA POR RESISTENCIA (RESISTANCE WELDING - RW)

Soldadura por chispa	FW
Soldadura por proyección	PW
Soldadura de costura por resistencia	RSEW
	RSEW-
Soldadura de costura por resistencia con alta frecuencia	HF
Soldadura de costura por resistencia con inducción	RSEW-1
Soldadura de puntos por resistencia	RSW
Soldadura de resistencia por recalcado	UW
Soldadura de resistencia por recalcado con alta frecuencia	UW-HF
Soldadura de resistencia por recalcado con inducción	US-1

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-hidrógeno	OHW
Soldadura con gas a presión	PGW

CORTE POR ARCO (ARC CUTTING - AC)

Corte por arco con 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 metálico 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-hidrógeno

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 6.1 Procesos de Soldadura (de acuerdo con la Norma ANSI /AWS A3.0-94, Términos y Definiciones Estándar de Soldadura)




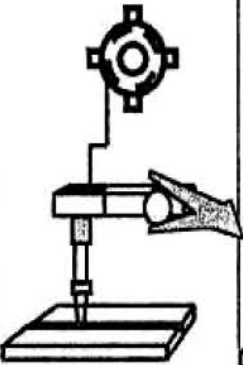
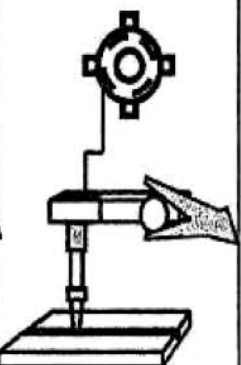


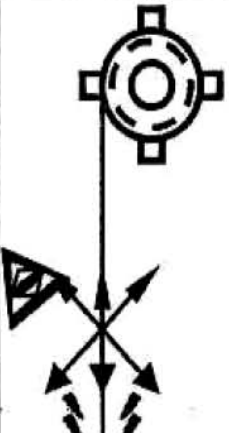
Método de aplicación	MA - Manual (circuito cerrado)	SE - Semiautomático (circuito cerrado)	ME - Mecanizado (circuito cerrado)	AU – Automático (circuito cerrado)	AD - Control Adaptable (circuito cerrado)	RO - Robotizado (circuito cerrado o abierto)
Función y elementos de soldadura por arco						
Iniciar 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	Maquina	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)	Maquina (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 riesgo de discontinuidades	Máquina (con sensor)	Maquina (robot) (sólo con sensor)

FIG. 6.2 RELACIONES PERSONAS MAQUINA PARA METODOS DE APLICACIÓN EN SOLDADURA POR ARCO



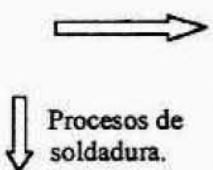
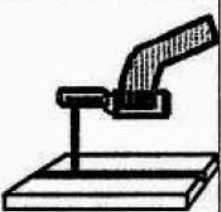

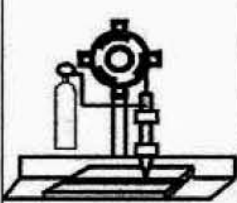
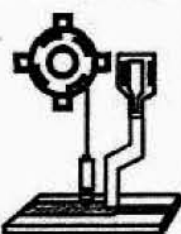
Método de aplicación. 	MA MANUAL	SA SEMIAUTOMÁTICO	ME MECANIZADO	AU AUTOMÁTICO
				
ARCO METÁLICO PROTEGIDO	El más popular	No usado	No usado	Especial
ARCO DE TUNGSTENO PROTEGIDO CON GAS	El más popular	Posible pero raro	Usado	Usado
ARCO PLASMA	El más popular	No usado	Usado	Usado
ARCO SUMERGIDO	No es posible	Poco usado	El más popular	Popular
ARCO METÁLICO PROTEGIDO CON GAS	No es posible	El más popular	Usado	Popular
ARCO CON ELECTRODO TUBULAR	No es posible	El más popular	Usado	Popular
ELECTRO-ESCORIA	No es posible	Posible pero raro	El más popular	Usado
SOLDADURA FUERTE CON ANTORCHA	El más popular	Usado	Usado	Usado
GAS OXI-COMBUSTIBLE	El más popular	No usado	Poco usado	Poco usado
CORTE TÉRMICO	El más popular	-----	Popular	Popular

FIG. 6.3 METODOS POSIBLES DE APLICACIÓN DE VARIOS PROCESOS DE SOLDADURA



6.02 NATURALEZA DEL ARCO ELÉCTRICO.

El arco eléctrico es una corriente que fluye entre dos elementos (el electrodo y la pieza de trabajo) pasando de uno a otro a través de una columna de gas ionizado 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. Ver fig. 6.4

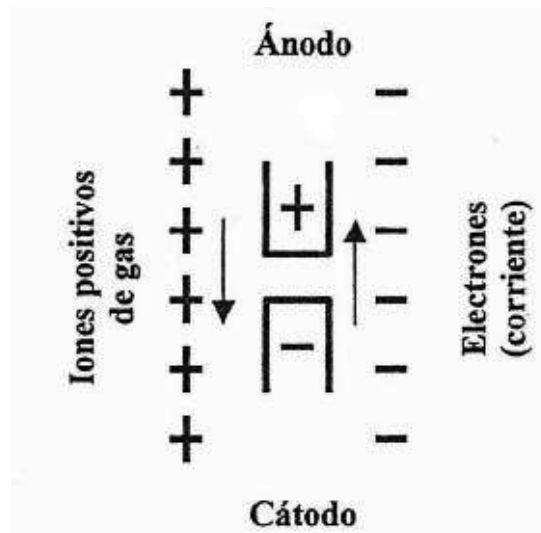


FIG. 6.4 ARCO ELECTRICO

Los electrones negativos son emitidos por el cátodo y fluyen junto a los iones negativos del plasma hacia el ánodo positivo. Los iones positivos fluyen, en sentido contrario, sin embargo tal y como sucede a 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 del 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 gas neutro e ionizado 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.
- Variación del tipo de 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 en la temperatura del arco de soldadura. Los valores medidos de las temperaturas del arco oscilan entre unos 5300 y 30300 °C, dependiendo de la corriente de este y de la naturaleza del plasma. En el proceso SMAW, las temperaturas máximas que se obtienen son de aproximadamente 6250°C, mientras que 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 6.5





FIG. 6.5 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 al arco y al metal fundido con gases, vapores o escorias protectoras, a esto se le denomina la protección del arco, misma que puede realizarse por 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. Ésta protege a los cordones solidificados (aún calientes) del contacto con el aire, evitando reacciones y enfriamientos bruscos.

Circuito básico de soldadura

El circuito básico de soldadura por arco se ilustra en la figura 6.6.

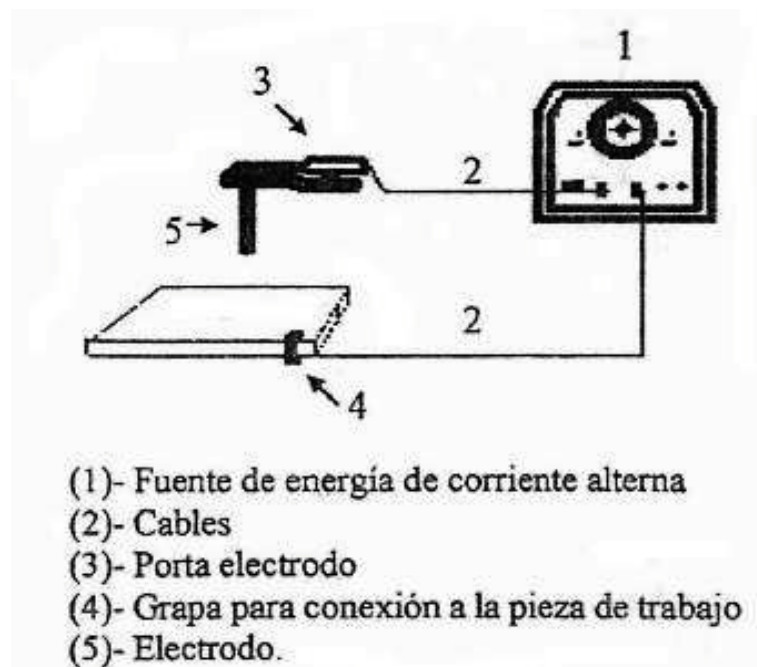


Fig. 6.6 Circuito básico de soldadura en una maquina de corriente alterna.

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 una corriente electrodo positivo, o también de manera arbitraria, polaridad invertida, cuando el cable del



electrodo se conecta a la terminal negativa de la maquina la polaridad se designa como corriente directa del electrodo negativo, originalmente como polaridad directa, por el hecho de que los electrones fluyen del polo negativo hacia el positivo *ver fig. 6.7*

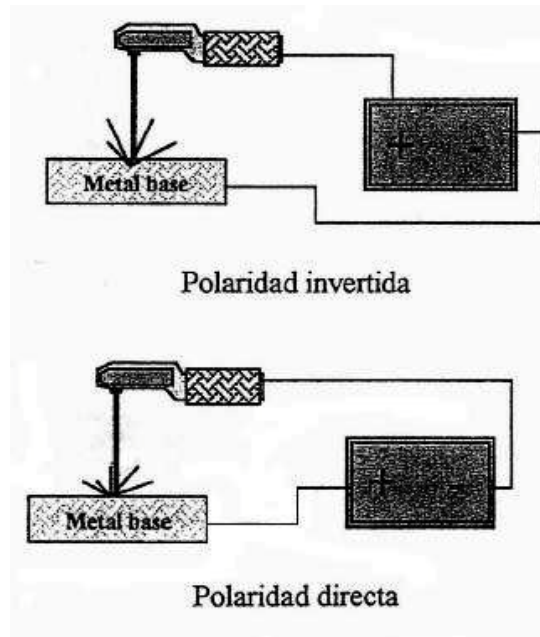


FIG. 6.7 POLARIDAD

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 figura 6.8

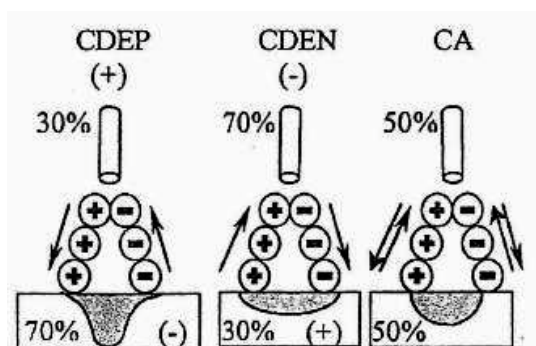


FIG. 6.8 EFECTO DE LA POLARIDAD SOBRE LA PENETRACIÓN Y LA DISTRIBUCIÓN DEL CALOR EN LA MAYORÍA DE LOS PROCESOS DE SOLDADURA.



En el caso del proceso de soldadura por 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 6.9

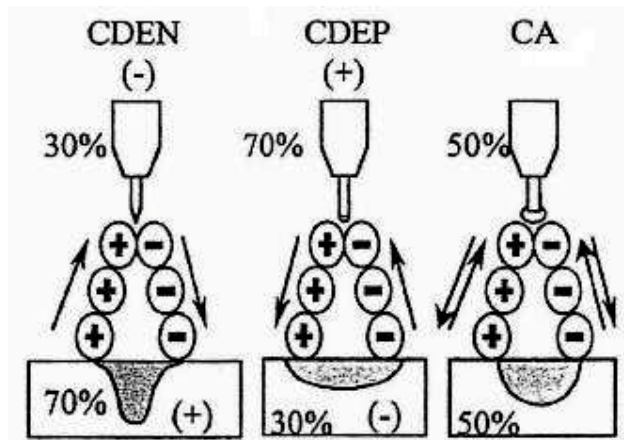


FIG. 6.9 EFECTO DE LA POLARIDAD SOBRE LA PENETRACIÓN Y DISTRIBUCIÓN DEL CALOR EN EL PROCESO GTAW.

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 término, 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, seguridad y la disponibilidad de personal entrenado.

El voltaje suministrado para [mes industriales por las compañías eléctricas es demasiado alto para usarse directamente en la soldadura por arco, por lo que la primer función de las máquinas soldadoras es reducir el voltaje de entrada o de línea a un intervalo de voltaje de salida apropiado (el cual varía de unos 17 a 45 Voltios), y una corriente adecuada, que normalmente oscila 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 maquinas 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 secundario. 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 fórmula:

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

Dónde:

N_1 = Numero de vueltas del devanado primario del transformador

N_2 = Numero de vueltas del devanado secundario

E_1 = voltaje de entrada

E_2 = voltaje de salida

I_2 = corriente de entrada

I_1 = corriente de salida (Carga)

Las maquinas 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 un generados 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 máquinas que suministran corriente alterna y corriente directa. Éstas son básicamente arreglos de transformador y rectificador.

Las maquinas para soldar, y como se menciona 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 una maquina de voltaje constante es aquella que entrega una corriente de soldadura con variaciones mínimas de voltaje cuando la comente de salida varía. Las siguientes figuras 6.10 y 6.11 muestran las curvas características de cada uno de estos tipos de máquinas de soldar.

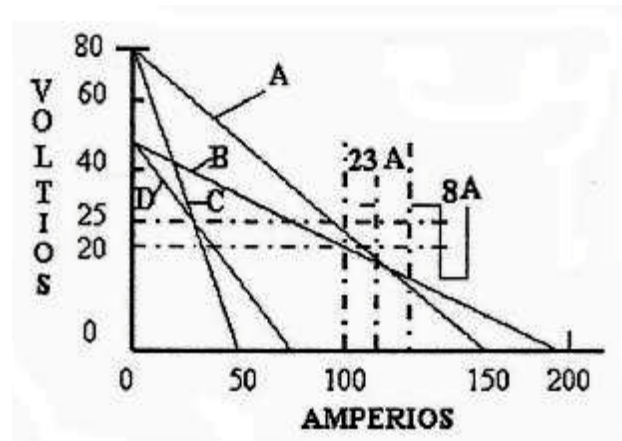


FIG. 6.10 CARACTERÍSTICAS TÍPICAS VA DE UNA FUENTE DE CORRIENTE CONSTANTE CON VOLTAJE AJUSTABLE DE CIRCUITO ABIERTO

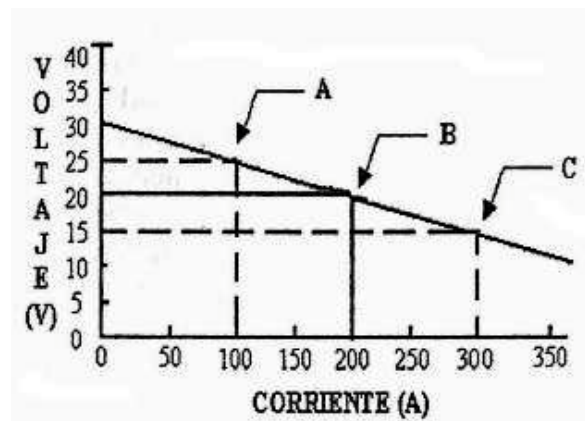


Fig. 6.11 Relaciones de salida VA para una máquina de voltaje constante.

Las dos figuras anteriores muestran las curvas Voltio-Amperio (VA) de salida de las máquinas de comente constante y voltaje 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 las máquinas de soldar. Estas características, conjuntamente con las dinámicas, determinan la efectividad de su operación, y afectan su comportamiento"



Las máquinas de voltaje variable son usadas en los procesos de soldadura por arco metálico protegido, arco de tungsteno protegido con gas y para la mayor parte de aplicaciones de arco sumergido. Las máquinas 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 con el empleo de metales de aporte 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 período de tiempo (10 minutos, por ejemplo) que puede operar a una corriente de soldadura establecida. Así, una máquina clasificada como de 300 Amperios a un ciclo de trabajo de 60%, significa que la maquina puede operarse seguramente a una corriente de 300 Amperios durante 6 de cada 10 minutos. Si este ciclo de trabajo se reduce en una operación real, se podrá incrementar la corriente máxima permisible. Así, a un ciclo de un trabajo de un 30%, esta misma máquina de 300 Amperios podría operarse a 375 Amperios.



6.03 PROCESO DE SOLDADURA POR ARCO METÁLICO PROTEGIDO CON ELECTRODO RECUBIERTO. (SHIELDED METAL ARC WELDING - SMAW)

Es un proceso de soldadura por medio el cual el arco se produce entre un electrodo recubierto y el charco de 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 “soldadura eléctrica”.

La siguiente figura 6.12 muestra esquemáticamente el proceso.

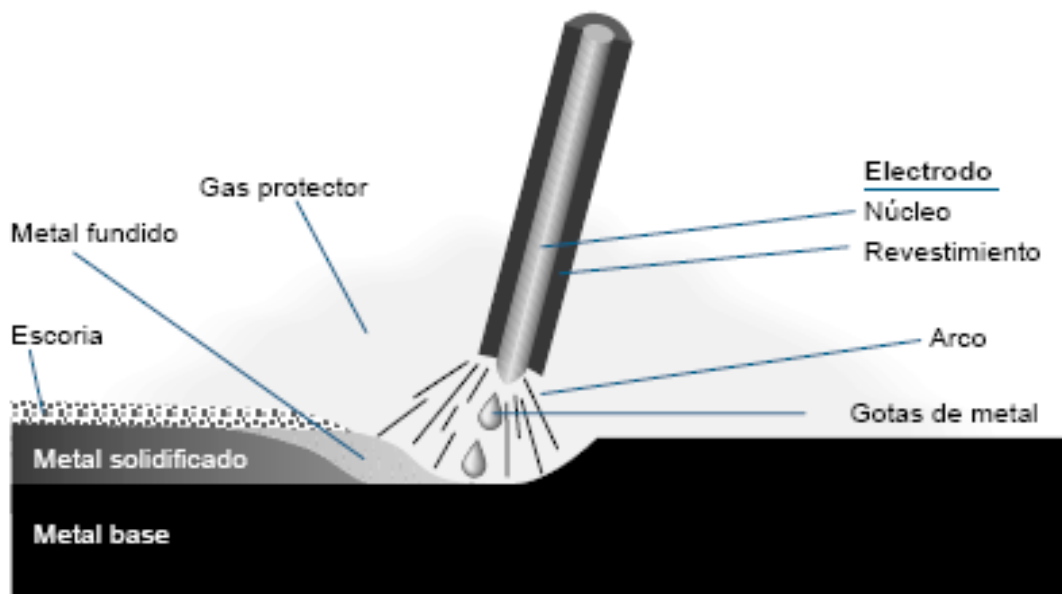


Fig. 6.12 Proceso de soldadura por arco metálico protegido.

Funciones del núcleo metálico.

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

- conducir 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 más importantes del revestimiento se listan a continuación:

- Suministrar la atmósfera protectora al arco y al charco de metal
- Suministrar agentes desoxidantes y limpiadores al metal de soldadura fundido.
- Formar una capa de escoria para proteger al metal fundido y evitar enfriamientos bruscos y oxidación del metal sólido caliente.
- Suministrar elementos de aleación al metal de soldadura.
- En algunos electrodos, suministrar parte del metal de aporte, en forma de polvo de hierro.
- Fijar características 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 empleado en este proceso consiste en una fuente de energía, cables, porta electrodo y grapa para conexión a la pieza de trabajo. Figura 6.13

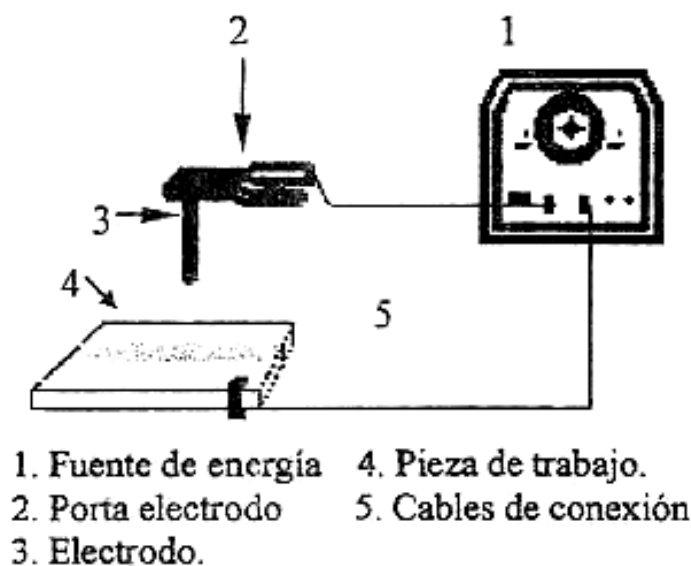


Fig. 6.13 Equipo para el proceso de soldadura por arco metálico protegido



Fuente de energía

El proceso SMAW requiere fuentes de energía o poder de voltaje variable (corrientes constante) que suministren corrientes de 10 a 500 Amperios y voltajes de 17 a 45 Voltios, dependiendo del tipo y tamaño 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 el 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 de cientos de alambres finos que son trenzados y aislados de forma natural dentro de un recubrimiento sintético

Métodos de aplicación

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

Aplicaciones, limitaciones y ventajas

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

Se emplea en talleres pequeños y grandes, para reparación de diversos componentes, así como en 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 usado)
- Puede emplearse en campo y en taller.
- Es aplicable a un intervalo amplio de espesores (aproximadamente de 1.2 mm en adelante)
- Los electrodos pueden doblarse de manera que pueden ser usados en áreas ciegas.
- Se pueden emplear cables largos para tener acceso 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 depende en 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 depósito relativamente baja.
- La porción del electrodo que se sujeta al maneral o porta electrodo no se aprovecha.
- No puede ser usado para soldar algunos metales no ferrosos.
- No pueden emplearse amperajes altos (como los que se 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 el porta electrodo. La corriente de soldadura está limitada por el 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 deteriora su capacidad de protección



6.04 VARIABLES ESPECÍFICAS.

Las variables particulares más 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 6.2 Y más adelante en esta sección. Algunas de estas variables están definidas y relacionadas 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 6.2 indica de manera clara, para cada clasificación de electrodo, qué clase de recubrimiento tiene, con qué tipo de corriente y polaridad debe emplearse y la profundidad de la penetración con que está 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 éstos pueden señalarse las propiedades mecánicas (del depósito 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 de depósito), 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 más estrechamente vinculados con puntos de vista de ingeniería de soldadura y producción que con la inspección, por lo que no se consideran más en este texto.

Intensidad de la corriente de soldadura

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

De acuerdo con lo anterior, un electrodo de 1/8" (0.125") de diámetro requiere una corriente de 125 Amperios. Pero como se mencionó anteriormente, esto es sólo una guía, ya que si se tratara de un electrodo E-6010 (de 1/8"), la corriente adecuada de operación sería de unos 75 a 130 Amperios, pero si se trata de un electrodo E-7024 (de 1/8"), que tiene polvo de hierro en su revestimiento, la corriente a emplear sería de unos 100 a 170 Amperios, dependiendo de si se emplea corriente directa o corriente alterna.



6.05 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 ésta higroscópicamente. En el momento de soldar, el hidrógeno proveniente de esta humedad causa efectos adversos en algunos aceros bajo ciertas condiciones. Para las aplicaciones en las que resulta perjudicial el hidrógeno, se formularon específicamente grupos de electrodos llamados de "bajo hidrógeno". El último designador (dígito) de la clasificación de los electrodos de bajo hidrógeno 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 hidrógeno, y el contenido de humedad (en las condiciones que los suministra el fabricante o después de reacondicionados), dependiendo de su clasificación, debe ser de 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 específicas 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 6.4 de este texto reproduce la información básica contenida en la tabla mencionada, pero es conveniente anotar que con respecto al almacenamiento y los períodos 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 en el Código de Soldadura Estructural para Acero ANSI/AWS D1.1, en su Sección "Fabricación".



Tales requisitos (Tabla No. 6.1) se refieren a los periodos aprobados y a los periodos alternativos establecidos por pruebas para la exposición de los electrodos a la atmósfera.

6.06 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 aleación
- AWS A5.6 para electrodos de cobre y sus aleaciones
- AWS A5.11 para electrodos de Níquel y sus aleaciones
- 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.

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

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 6.14



**En este sistema de clasificación, los dos o tres primeros dígitos indican la resistencia mínima ala 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 está diseñado.*

CLASIFICACIÓN*	TIPO DE CORRIENTE USADA	PENETRACIÓN	REVESTIMIENTO
EXXXO **	CDEP	PROFUNDA	CELULOSA , SODIO
EXXX1	CA, CDEP	PROFUNDA	CELULOSA, POTASIO
EXXX2***	CA ,CDEN	INTERMEDIA	RUTILO, SODIO
EXXX3	CA, CDEP CDEN	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 HIDRÓGENO, 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 E6020, el cual puede emplearse con CDEN, CDEP o CA

*** El electrodo E6022 está diseñado 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

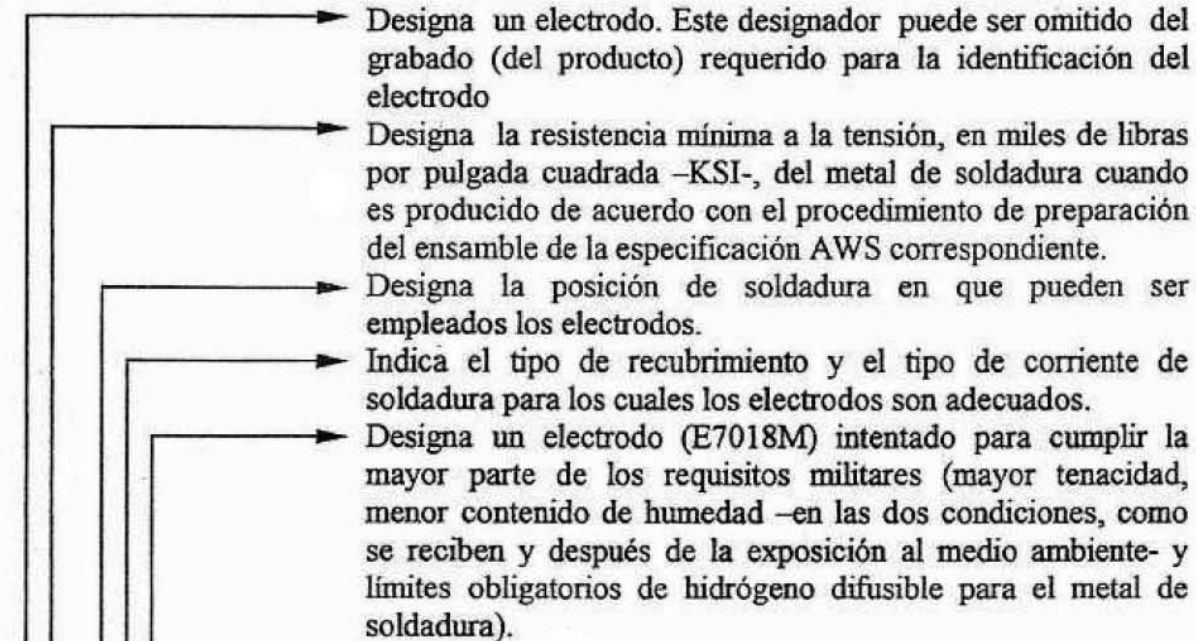
CDEN: Corriente Directa, Electrodo Negativo (polaridad Directa)

CDEP: Corriente Directa, Electrodo Positivo (Polaridad Invertida)

TABLA 6.2 CLASIFICACIÓN GENERAL Y ALGUNAS CARACTERÍSTICAS DE LOS ELECTRODOS RECUBIERTOS DE ACERO AL CARBONO.



Designadores obligatorios de la clasificación



E XX Y Y
E XX Y Y M
E XX Y Y-I HZ R

Designadores suplementarios opcionales

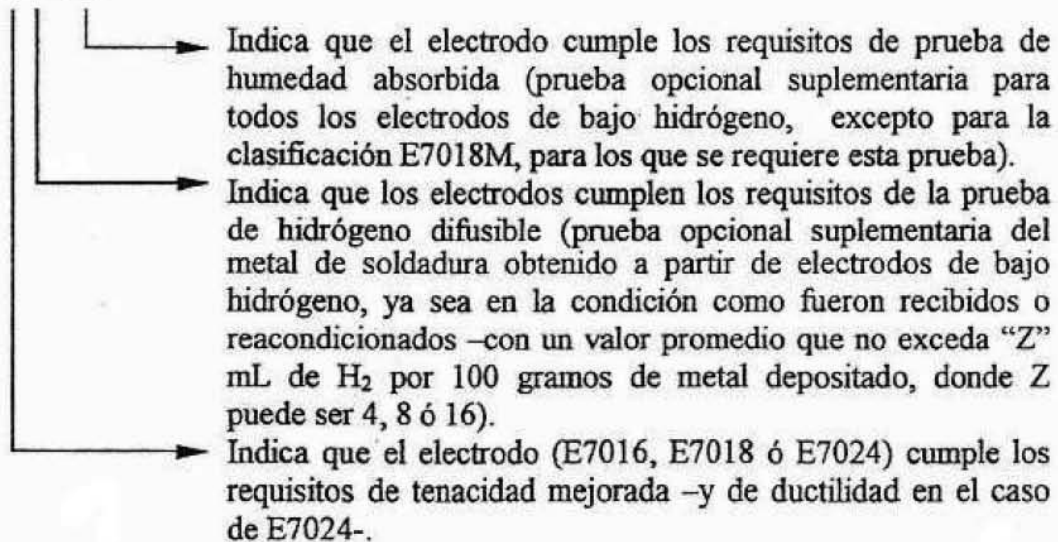


FIG. 6.14 DESIGNADORES OBLIGATORIOS Y OPCIONALES SUPLEMENTARIOS EN LA CLASIFICACIÓN DE LOS ELECTRODOS RECUBIERTOS DE ACERO AL CARBÓN.



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-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 plana, vertical, horizontal y sobre cabeza.

8: Revestimiento de bajo hidrógeno con potasio y polvo de hierro; electrodo para ser empleado con corriente alterna o corriente directa electrodo positivo

1: Indica que cumple con los requisitos de tenacidad (resistencia al impacto) mejorada (20 libras-pie a -500 F, ó 27 Joules a -470 C).

H8: Significa que el metal depositado con este electrodo contiene como máximo 8 ml de H₂/100grnos 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 A5.5) es muy parecida a la empleada para los electrodos de acero al carbón o, 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 de AWS 5.3 contiene, de 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 (low) 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 está diseñado para cumplir la mayoría de los requisitos militares (mayor tenacidad y mayor elongación), y que contiene níquel (de 1.75 a 2.50%), Cromo (0.30 a 1.50%) y molibdeno (de 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 clasificación (G). Las tablas de la especificación (AWS 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.

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

Como el E8018-W2, y electrodos para aplicaciones militares. La tabla de AWS 6.3 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	4.0-6.0	0.45-0.65	---
B6L	0.05	1.0	0.90	0.40	4.0-6.0	0.45-0.65	---
B7	0.05-0.10	1.0	0.90	0.40	6.0-8.0	0.45-0.65	---
B7L	0.05	1.0	0.90	0.40	6.0-8.0	0.45-0.65	---
B8	0.05-0.10	1.0	0.90	0.40	8.0-10.5	0.85-1.20	---
B8L	0.05	1.0	0.90	0.40	8.0-10.5	0.85-1.20	---
B9	0.08-0.13	1.25	0.30	1.0	8.0-10.5	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	.15	.35	.05
C4	0.10	1.25	0.60	1.10-2.0	---	---	---
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 min.	0.80 min.	0.50 min	0.30min	0.20 min.	0.20min
M	0.10	0.60-2.25	0.60-0.80	1.25-2.5	.15-1.50	0.25-.55	.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 únicos indican los límites máximos especificados.

TABLA 6.3 REQUISITOS DE COMPOSICIÓN QUÍMICA PARA METAL DE SOLDADURA NO DILUIDO DE ELECTRODOS RECUBIERTOS 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	$80 \pm 20^{\circ}\text{F}$ ($30 \pm 10^{\circ}\text{C}$) con una humedad relativa máxima del 50%	20°F (12°C) hasta 40°F (24°C) arriba de la temperatura ambiente	1 hora a temperaturas de $275 \pm 25^{\circ}\text{F}$ ($135 \pm 15^{\circ}\text{C}$)
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 a temperaturas de 500 a 800°F (260° a 427°C)
<p>Notas:</p> <p>a. Después de removerlos del empaque del fabricante</p> <p>b. Debido a las diferencias inherentes en la composición de los revestimientos, debieran consultarse a los fabricantes para conocer las condiciones exactas de secado.</p> <p>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 en el aire libre.</p>			

Tabla 6.4 condiciones típicas de almacenamiento y secado para electrodos 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 A5.4) también sigue un patrón similar al de las otras especificaciones AWS para metales de aporte.

Las clasificaciones inician con la letra "E" (electrodo) seguida de tres dígitos que designan su composición química y, ocasionalmente, seguidas 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 soldadura y el tipo de comente 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 grado 316.

16: Indica que este electrodo puede usarse con CA o CDEP y en todas las posiciones (aunque los electrodos de 316" y mayores no se recomienda para 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 de carbono del metal de soldadura correspondiente está restringido a la porción alta del valor 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 E30SMo, 10 que indica que la composición de este metal de soldadura es el mismo que el depositado por electrodos E30S, excepto por la adición de molibdeno y una pequeña reducción en el límite del carbono.

VER ANEXO 1, ESPECIFICACIONES ESTÁNDAR ASTM PARA ELECTRODOS SEGÚN EL METAL BASE

La tabla 6.5 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 posición 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 o CA	Todas
EXXX(X)- 17	CDEP o CA	Todas
EXXX(X)- 26	CDEP o CA	Plana y horizontal

TABLA 6.5. POSICIONES Y TIPOS DE CORRIENTE PARA LOS ELECTRODOS DE ACERO INOXIDABLE.

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



6.07 PROCESO DE SOLDADURA POR ARCO CON ALAMBRE CONTINUO PROTEGIDO CON GAS (GAS METAL ARC WELDING - GMAW).

Es un proceso de soldadura por arco en el que éste se establece entre un electrodo metálico continuo de aporte y el charco de soldadura del 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 emplea protecciones con gases inertes o activos, “micro alambre”, “micro wire” entre otras designaciones.

En GMAW se emplea un alambre continuo solido y desnudo, que tiene las funciones de servir como electrodo y como metal de aporte, y al no haber revestimiento como en el caso de el proceso SMAW y fundente adicionado externamente como en el proceso SAW, no se forma una capa de escoria sino 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 requieren cuidados y limpieza adecuados para obtener soldaduras libres de poros y otras discontinuidades. Ver Figura 6.15

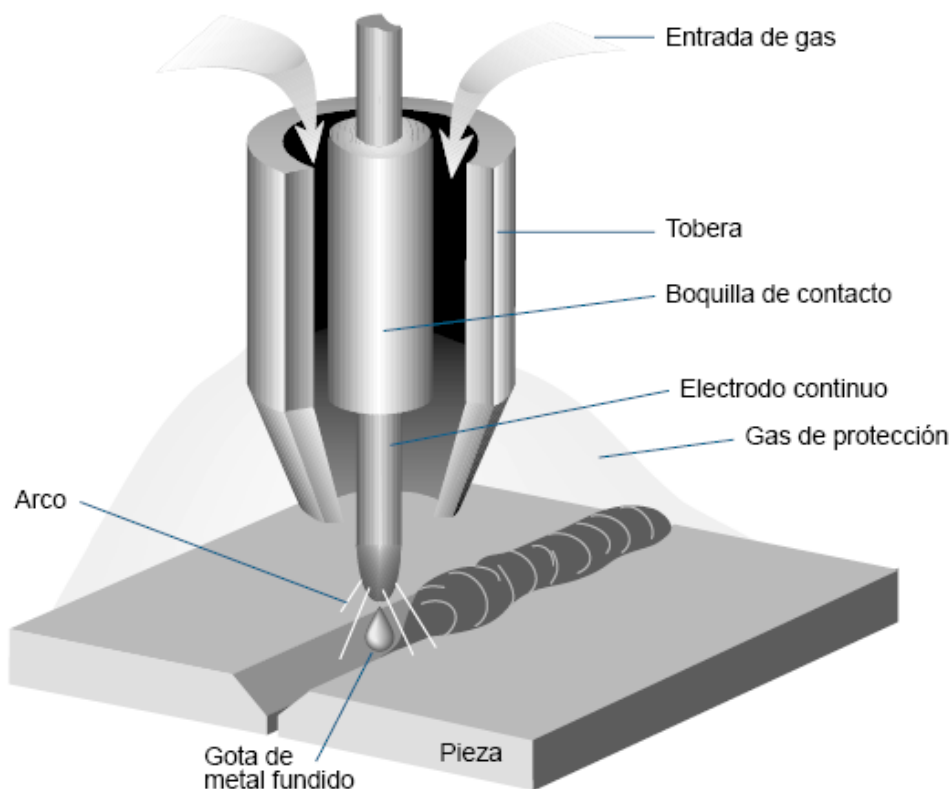


FIG. 6.15 PROCESO DE SOLDADURA POR ARCO CON ALAMBRE CONTINUO PROTEGIDO CON GAS.



En este proceso pueden usarse los métodos de aplicación semiautomática, 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 ver figura 6.16.

Aplicaciones, ventajas y limitaciones

Este proceso es muy versátil y se usa en aplicaciones que requieren altos o bajos volúmenes de producción. Entre sus aplicaciones principales se encuentran la fabricación de recipientes a presión, tuberías industriales, líneas de tuberías de transmisión, instalaciones de energía nuclear, barcos, ferrocarriles, industrias automotriz y aeroespacial y la de equipo pesado, incluyendo la construcción y fabricación de productos y bienes de acero al carbono, aceros inoxidables 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 ser fácilmente unidas (con modo de transferencia metálica en corto circuito), lo que facilita realizar efectivamente cierta clase de reparaciones.
- Mejor aprovechamiento del metal de aporte y en un mayor factor de operación, lo que redunda en beneficio de los costos totales de soldadura.



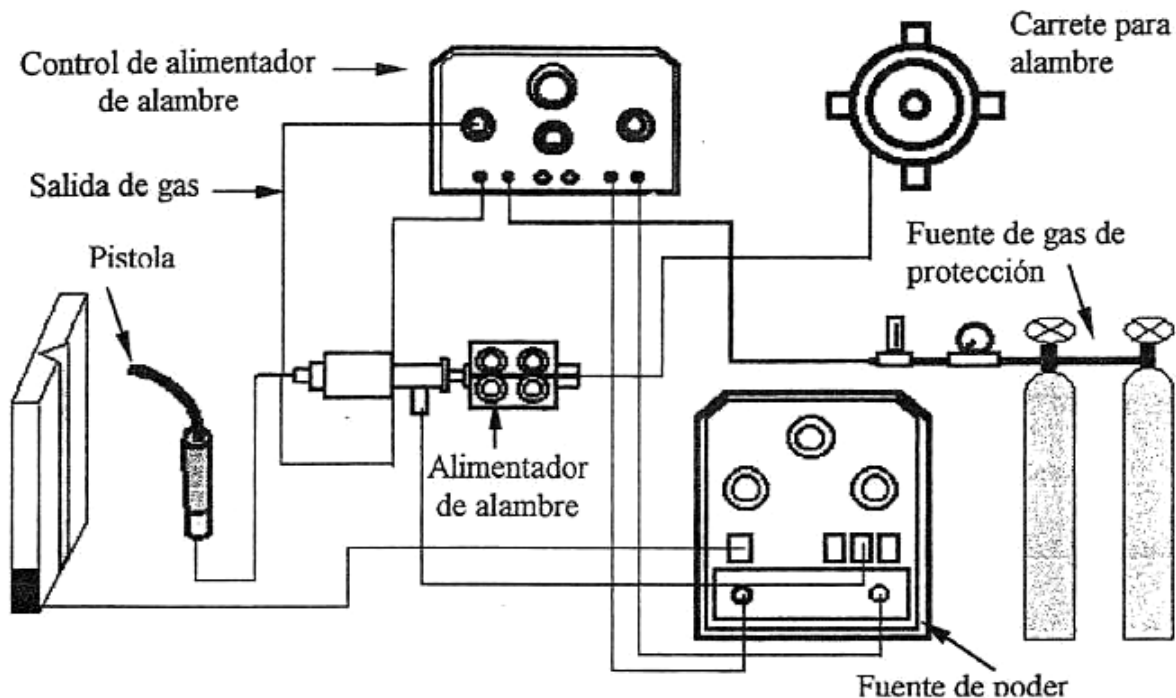


FIG. 6.16 EQUIPO DE PROCESO DE SOLDADURA POR ARCO METÁLICO CON ALAMBRE CONTINUO

6.08 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 a este proceso y tienen una gran influencia sobre las características de las uniones soldadas.

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

Las figuras 6.17 Y 6.18 ilustran los patrones de penetración y el contorno del cordón obtenido con algunos gases de protección.



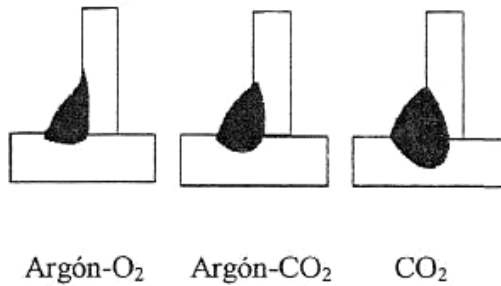


Fig. 6.17 Efecto de algunos gases en el contorno y en la penetración del cordón.

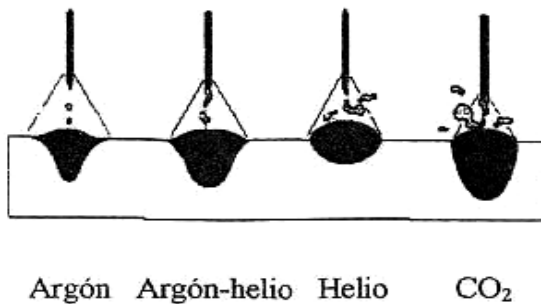


Fig. 6.18 Patrones de penetración y contorno del cordón con varios gases de protección

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.
- Disponibilidad
- Costo del gas
- y las propiedades mecánicas requeridas

La tabla 6.6 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		Metales no ferrosos
Helio		Aleaciones de aluminio, magnesio y cobre
Dióxido de carbono		Aceros al carbono y de baja aleación
Argón – helio	20% - 80% He	Aleaciones de aluminio, magnesio y níquel
Argón y oxígeno	1-2% O ₂ 3-5% O ₂	Acero inoxidable, 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 60-70He-25-35Ar-5 CO ₂	Acero inoxidable (corto circuito) Aceros de baja aleación
Nitrógeno		Aleaciones de cobre

TABLA 6.6 USO DE DIFERENTES GASES DE PROTECCION PARA EL PROCESO DE SOLDADURA POR ARCO METALICO PROTEGIDO CON GAS.

Modos de transferencia metálica

En soldadura por arco metálico protegido con gas pueden obtenerse 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, rocío y arco pulsado. Además, recientemente la Lincoln Electric Ca. Desarrolló una fuente de energía para corto circuito que produce una transferencia por tensión superficial.

La física de la transferencia metálica aún no está bien comprendida, pero se cree que hay varias fuerzas que regulan tal transferencia. Dos de estas fuerzas son la gravedad y el efecto de 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 ésta. Se estima que este efecto es clave en la transferencia por rocío y un factor involucrado en la 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 a la velocidad de alimentación de alambre (en relación con el diámetro de éste)-, el gas de protección y el voltaje, principalmente.



Transferencia por corto circuito

Esta caracterizado como un modo de "baja energía", ya que emplea los niveles de corrientes más bajos asociados con GMAW. El metal es transferido del electrodo a la pieza de trabajo sólo durante el lapso en que el electrodo esta 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 6.19. 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.

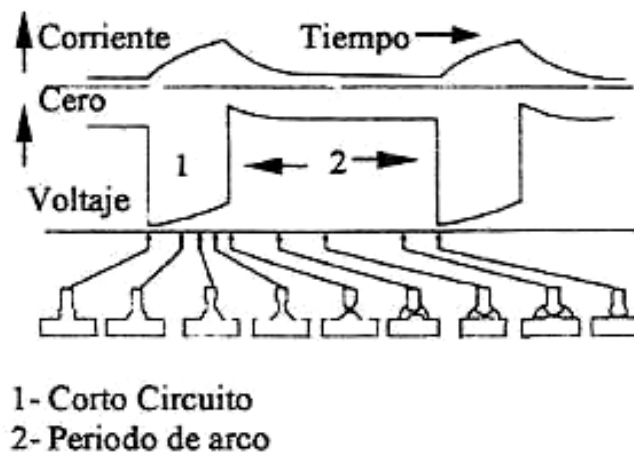


Fig. 6.19 ciclo típico de tiempo contra corriente para soldadura de acero con GMAW en transferencia en corto circuito.

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 debiera ocurrir tan rápido como para producir un chisporroteo debido a la desintegración de la gota transferida del metal de aporte. La velocidad de aumento de la 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 del intervalo de la temperatura de fusión del electrodo. El voltaje de circuito abierto de la fuente debe ser suficientemente bajo de manera que el arco no pueda continuar bajo las condiciones de



soldadura existentes. Una porción de la energía para el mantenimiento del arco es proporcionada por la reserva inductiva de energía durante el período de corto circuito.

Ya que la transferencia metálica ocurre sólo 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 tabla 6.7 muestra los intervalos típicos de corriente empleados para electrodos de acero al carbono

Corriente para soldadura, Amperios					
Diámetro del electrodo		Posiciones plana y horizontal		Posiciones vertical y sobre cabeza	
Pulgadas	mm.	Min.	Max.	Min.	Max.
0.030	.08	50	150	50	125
0.035	0.9	75	175	75	150
0.045	1.2	100	225	100	175

TABLA 6.7 INTERVALOS TÍPICOS DE CORRIENTE PARA SOLDADURA DE ACERO CON GMAW EN TRANSFERENCIA EN CORTO CIRCUITO.

Ventajas, características y aplicaciones de transferencia en corto circuito.

- El empleo de los intervalos más bajos de corriente asociados con este proceso.
- Pequeños. Diámetros de electrodo. (0.030",0.035",0.045")
- Polaridad invertida (electrodo positivo)
- Aportes térmicos bajos, 10 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 6.4 mm (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



Transferencia globular.

La transferencia globular ocurre con intensidades de corriente y voltaje relativamente bajas, pero más altos que los empleados para obtener transferencia en corto circuito. Tiene lugar con todos los tipos de gases de protección, pero si se emplea CO_2 , generalmente ocurre a niveles de corriente y voltaje en la parte superior del intervalo de operación. Ver figura 6.20

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

Esta es 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 CO_2 generalmente es de naturaleza inestable y está 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 CO_2 , la mayor parte de la energía del arco se dirige hacia abajo de la superficie del metal de soldadura fundido, lo que produce un perfil de cordón de penetración muy profunda con una acción de lavado en los extremos del cordón (menor que las obtenidas con el modo de transferencia en rocío)

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

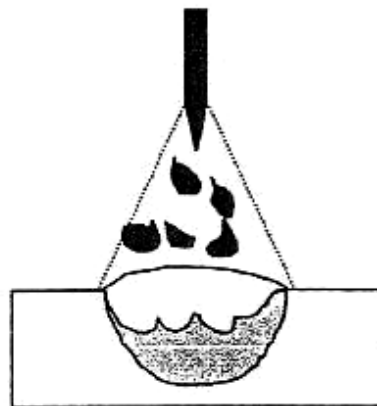


Fig. 6.20 Transferencia globular



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) está asociada con los niveles de voltaje y amperaje más altos del intervalo de operación del 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 6.8 muestra los valores típicos de corriente de transición para varios metales de aporte y gases de protección.

Tipo de electrodo	Diámetro del electrodo		Gas de protección	Corriente mínima para arco en rocío
	Pulg.	mm		Amp.
Acero dulce	0.030	.76	98% Ar-2% O	150
Acero dulce	0.035	.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	.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	.76	Argón	95
Aluminio	0.045	1.19	Argón	135
Aluminio	0.062	1.6	Argón	180

TABLA 6.8. CORRIENTE DE TRANSICIÓN PARA EL MODO DE TRANSFERENCIA EN ROCÍO

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 rocío al soldar aceros al carbono y de baja



aleación, es necesario que la mezcla del gas de protección contenga un porcentaje mínimo de Argón (que oscila de aproximadamente el 80 al 86 %, según diversos autores).

El ciclo de transferencia por rocío empieza cuando el extremo del electrodo se adelgaza en un punto, se forman pequeñas gotas y son impelidas electromagnéticamente 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 axialmente en línea recta del electrodo al charco de metal soldadura y el arco es muy estable, lo que resulta en muy poco chisporroteo y un cordón de soldadura de superficie relativamente lisa. Debido 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. Ver fig. 6.21

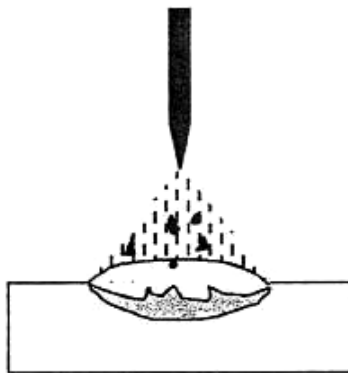


FIG. 6.21 TRANSFERENCIA DE CALOR POR ROCÍO.

Ventajas, características y aplicaciones del modo de transferencia en rocío

- 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 la menor cantidad de chisporroteo que los otros modos de transferencia.
- Adecuado para soldar en posiciones plana y en filetes horizontales, aunque también el útil para soldar fuera de posición, pero debe tenerse en cuenta que los altos niveles de corriente y voltaje usados pueden producir un charco de soldadura relativamente abundante que resulta difícil de controlar.
- Requiere del empleo de corriente directa y polaridad invertida (electrodo positivo).



Transferencia por arco con corriente pulsada

La transferencia por corriente pulsada es una variante del proceso GMAW útil soldar en todas las posiciones empleando 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 rocío, correspondiente a la corriente pulsada de pico.

Este modo de transferencia combina características y ventajas de las transferencias en rocío 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.

6.09 CONSUMIBLES, ESPECIFICACIONES Y CLASIFICACIONES

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

- AWS A5.9 para electrodos de aceros inoxidable
- AWS A5.10 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 las 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 A-5.18) que se ilustra a continuación:

ER XX S-YN

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 refiere 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 letra se emplea únicamente cuando aplica la nota b de la Tabla de la especificación, e indica que el metal de soldadura esta intentado para aplicaciones en reactores nucleares. Así, en la clasificación **ER70S-3**: **ER** significa que se trata de un electrodo o una varilla desnuda (Rod, R) **70** indica una resistencia mínima a la tensión (del metal de soldadura producido por este electrodo) de 70,000 libras por pulgada cuadrada (PSI, Pound per Square inch)

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 a 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 éstos 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 y, la posición de la "X" puede ser ocupada por una "C" o una "M", que establecen, respectivamente, si el electrodo es clasificado con CO₂ o con mezcla de 75-80% argón/balance 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 refiere 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 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 de un número de tres dígitos que designa la composición química del metal de aporte. Por ejemplo, **ER30S**.

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

VER ANEXO 1, ESPECIFICACIONES ESTANDAR ASTM SEGÚN METALES BASE



6.10 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 formado en la pieza de trabajo.

La protección se obtiene a través de la descomposición de un fundente contenido en el núcleo del electrodo tubular, y puede o no ser requerida la protección con 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 algunos cambios menores (en el alimentador de alambre o en los rodillos de éste, 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 con gas a las que si lo requieren.

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

Las especificaciones aplicables y la información de los fabricantes de los electrodos tubulares establecen de manera concreta cuáles de estos se deben emplear con gas de protección adicional y cuales sin éste, y qué 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 figura 6,22.



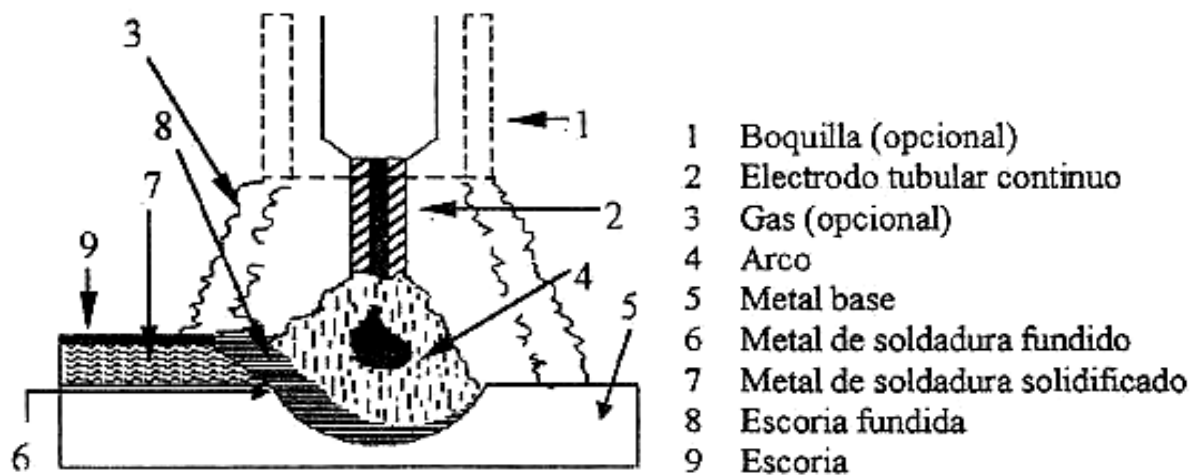


FIG. 6.22 PROCESO DE SOLDADURA POR ARCO CON ELECTRODO TUBULAR CON NÚCLEO DE FUNDENTE.

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, pistola de soldadura, cables y alimentador de alambre, y en algunos casos, medios para el suministro de gas de protección, mismo que es opcional y en algunos casos resulta necesario, dependiendo del metal de aporte empleado. La figura 6.23 de manera esquemática el equipo típico que se emplea en este proceso.

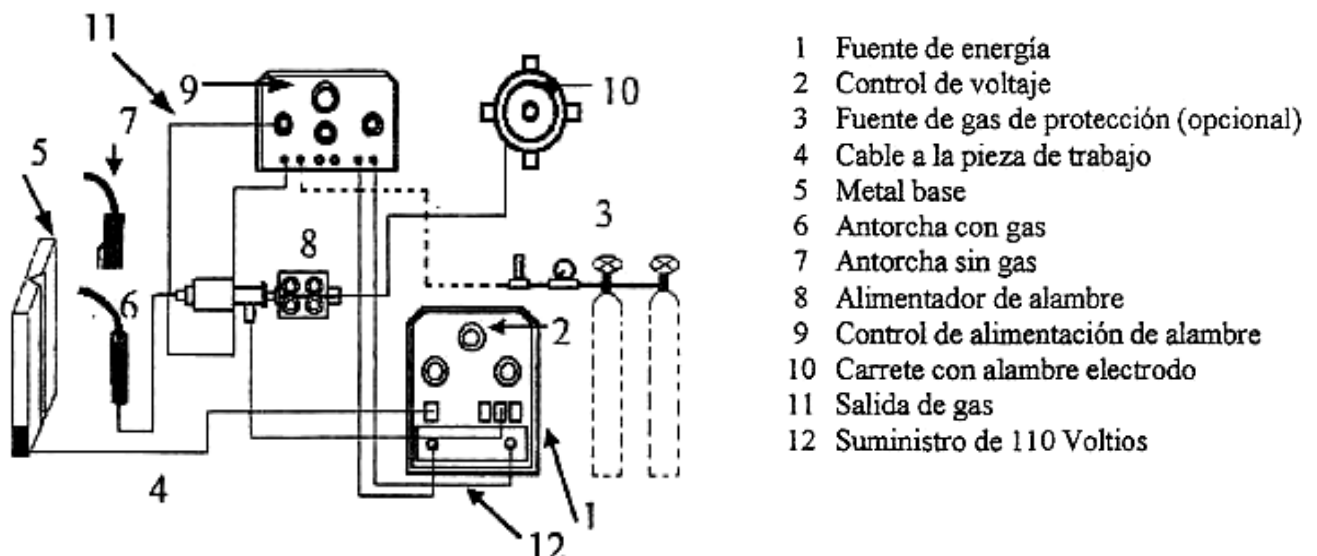


FIG. 6.23 EQUIPO PARA EL PROCESO DE SOLDADURA POR ARCO CON ELECTRODO TUBULAR CON NÚCLEO DE FUNDENTE (FCAW)



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 para reparación. Se emplea para construir recipientes a presión, barcos, estructuras y líneas de tubería; para propósitos generales de fabricación, unir metales base diferentes, 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 pequeño se puede soldar en todas las posiciones, y con electrodos de 3/32" en adelante la soldadura está 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 contorno 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 autoprotegidos eliminan la necesidad de manejo de fundentes o equipo de suministro de gas, y presentan una mayor tolerancia a las corrientes de viento 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 empleando 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 y el viento
- El equipo es más complejo que aquel usado en SMAW, por lo que requiere más mantenimiento.



6.11 VARIABLES ESPECÍFICAS

Las variables particulares de este proceso están relacionadas con el gas de protección y con 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 éste 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 inoxidables 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 metálica requeridos
- Disponibilidad y costo
- Propiedades mecánicas requeridas
- Penetración y forma del cordón

Los 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 A 5.20-95), 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 (consúltase la tabla 9 de la Especificación AWS A 5.29), 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 éstos 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 adicional, se aplican con corriente directa electrodo negativo.

El tipo de corriente y polaridad con que deben soldarse estos electrodos está indicado en la tabla 6.9 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 grandemente la calidad de las soldaduras, como ocurre en el proceso GMAW.

La intensidad de la corriente de soldadura (establecida por los fabricantes de los electrodos) es directamente proporcional a la velocidad de alimentación de alambre, pero ésta 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 los 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 mantienen constantes y se aumenta el voltaje, el cordón se hace más plano y ancho y aumenta ligeramente la penetración.

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



La longitud del electrodo que se extiende más 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. ver fig. 6.23

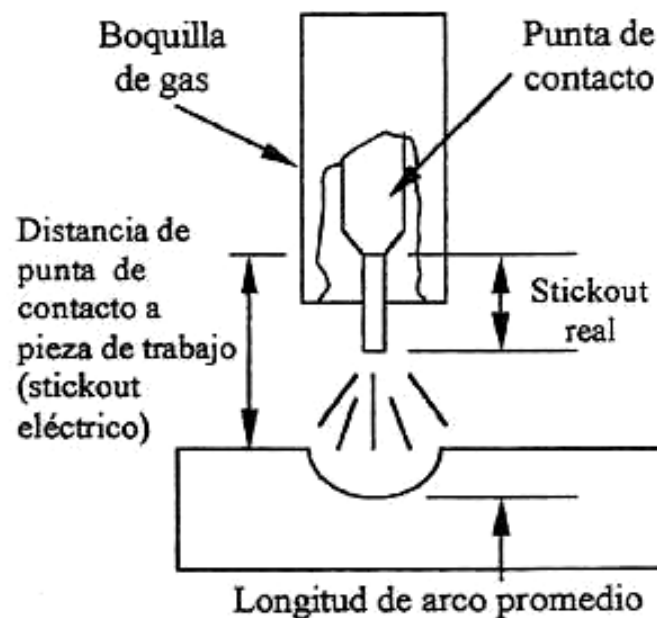


FIG. 6.23 EXTENSIÓN DEL ELECTRODO



Clasificación AWS	POSICIÓN DE SOLDADURA	PROTECCIÓN EXTERNA	POLARIDAD	Aplicación
E70T-1	Plana y horizontal	CO ₂	CDEP	M
E70T-1M	Plana y horizontal	75-80% Ar/balance CO ₂	CDEP	M
E71T-1	P, H, VA, SC	CO ₂	CDEP	M
E71T-1M	P, H, VA, SC	75-80% Ar/balance CO ₂	CDEP	M
E70T-2	Plana y horizontal	CO ₂	CDEP	S
E70T-2M	Plana y horizontal	75-80% Ar/balance CO ₂	CDEP	S
E71T-2	P, H, VA, SC	CO ₂	CDEP	S
E71T-2M	P, H, VA, SC	75-80% Ar/balance CO ₂	CDEP	S
E70T-3	Plana y horizontal	Ninguna	CDEP	S
E70T-4	Plana y horizontal	Ninguna	CDEP	M
E70T-5	Plana y horizontal	CO ₂	CDEP	M
E70T-5M	Plana y horizontal	75-80% Ar/balance CO ₂	CDEP	M
E71T-5	P, H, VA, SC	CO ₂	CDEP o CDEN	M
E71T-5M	P, H, VA, SC	75-80% Ar/balance CO ₂	CDEP o CDEN	M
E70T-6	Plana y horizontal	Ninguna	CDEP	M
E70T-7	Plana y horizontal	Ninguna	CDEN	M
E71T-7	P, H, VA, SC	Ninguna	CDEN	M
E70T-8	Plana y horizontal	Ninguna	CDEN	M
E71T-8	P, H, VA, SC	Ninguna	CDEN	M
E70T-9	Plana y horizontal	CO ₂	CDEP	M
E70T-9M	Plana y horizontal	75-80% Ar/balance CO ₂	CDEP	M
E71T-9	P, H, VA, SC	CO ₂	CDEP	M
E71T-9M	P, H, VA, SC	75-80% Ar/balance CO ₂	CDEP	M
E70T-10	Plana y horizontal	Ninguna	CDEN	S
E70T-11	Plana y horizontal	Ninguna	CDEN	M
E71T-11	P, H, VD, SC	Ninguna	CDEN	M
E70T-12	Plana y horizontal	CO ₂	CDEP	M
E70T-12M	Plana y horizontal	75-80% Ar/balance CO ₂	CDEP	M
E71T-12	P, H, VA, SC	CO ₂	CDEP	M
E71T-12M	P, H, VA, SC	75-80% Ar/balance CO ₂	CDEP	M
E61T-13	P, H, VD, SC	Ninguna	CDEN	S
E71T-13	P, H, VD, SC	Ninguna	CDEN	S
E71T-14	P, H, VD, SC	Ninguna	CDEN	S
EX0T-G	Plana y horizontal	No especificado	No especificado	M
EX1T-G	Todas *	No especificado	No especificado	M
EX0T-GS	Plana y horizontal	No especificado	No especificado	S
EX1T-GS	Todas *	No especificado	No especificado	S

P, H, VA, VD, SC - Plana, horizontal, vertical ascendente, vertical descendente, sobre cabeza.

* Plana, horizontal, vertical ascendente, vertical descendente, sobre cabeza.

Para la aplicación, M significa paso múltiple o sencillo, y S, únicamente paso sencillo.

CDEP significa corriente directa electrodo positivo (polaridad invertida)

CDEN significa corriente directa electrodo negativo (polaridad directa)

TABLA 6.9 POSICIONES DE SOLDADURA, PROTECCION, POLARIDAD Y REQUISITOS DE APLICACIÓN DE ELECTRODOS TUBULARES.



6.12 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 al 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 carbono.

La figura 6.24 describe el sistema de clasificación empleado para los electrodos de acero al carbono cubiertos 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/Pulg² (PSI) de resistencia mínima a la tensión del metal de soldadura

O establece que el electrodo sólo se puede usarse en posiciones plana y horizontal.

T indica que el electrodo es tubular,

4 indica que se trata de un electrodo "auto protegido" (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) es muy similar a la de los electrodos de acero al carbono, pero incluyen un sufijo que designa la composición química del metal de soldadura depositado. Esta composición está establecida en la Tabla 1 de la especificación.

Adicionalmente, el designador de la resistencia mínima a la tensión puede ser

7, 8, 9, 10, 11 o 12, e indica el valor de esta resistencia multiplicado por 10,000 PSI.

La clasificación **E81Ti-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 consúltase 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 ilustran al considerar la clasificación **E308T-1**.

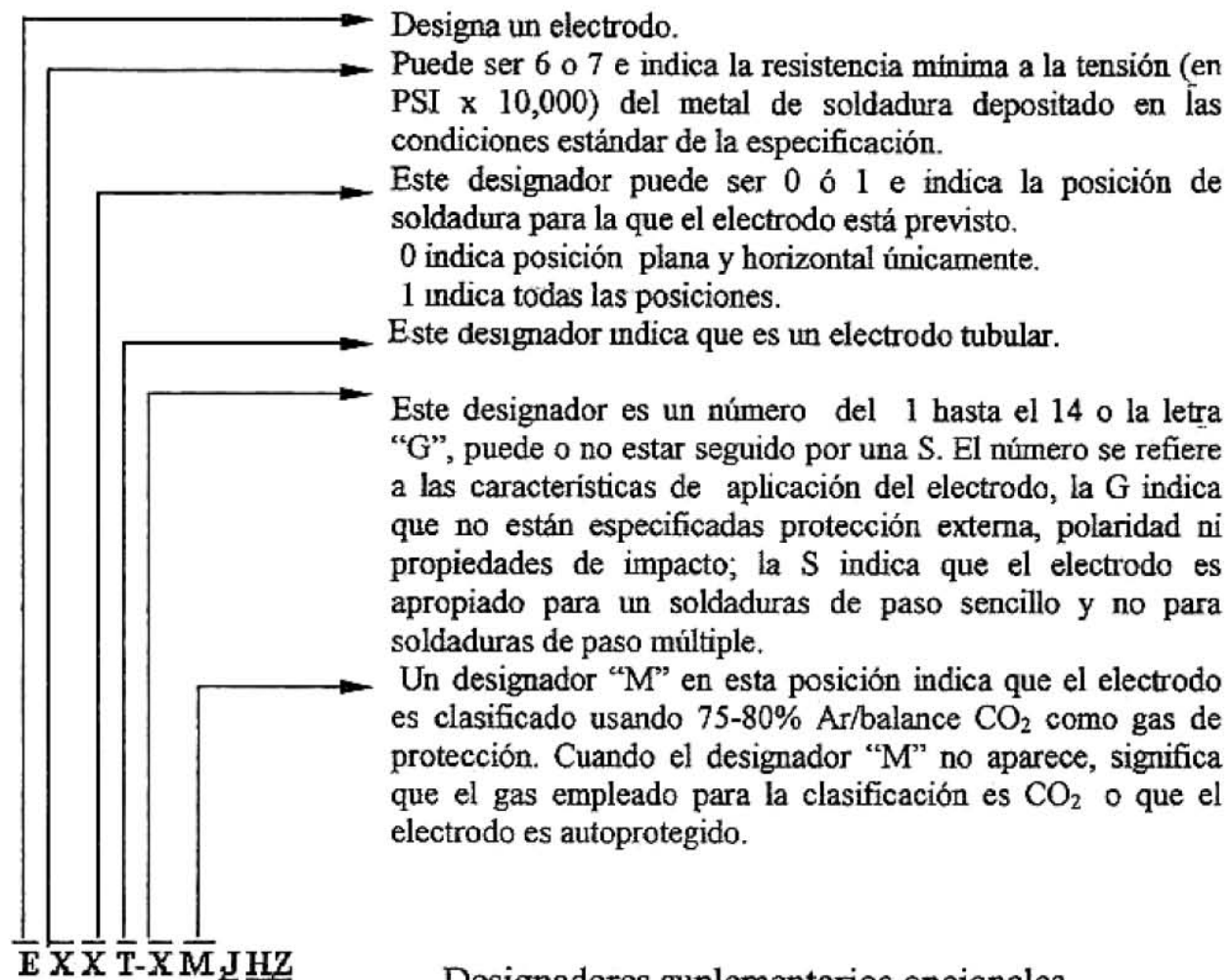
308 designa la composición química del metal de soldadura (véase la Tabla 1 de la especificación)

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



Designadores suplementarios opcionales

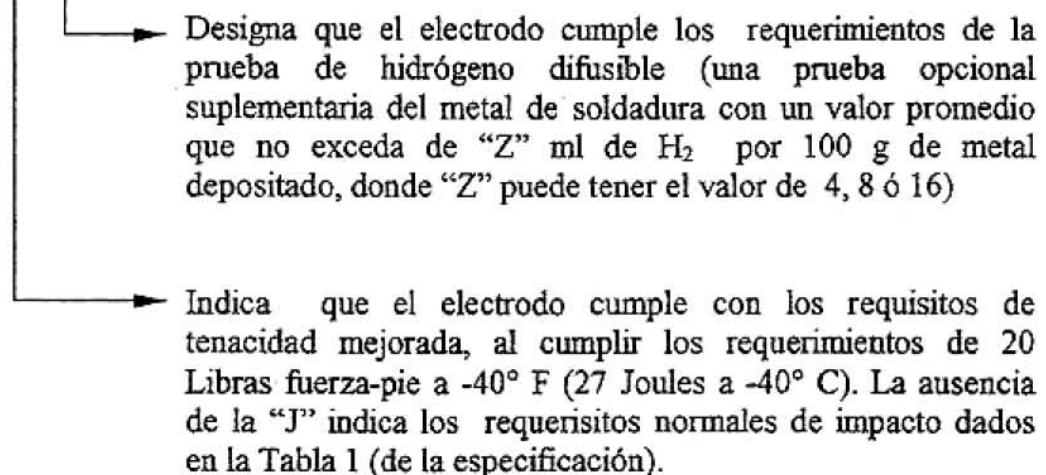


FIG. 6.24 SISTEMA DE CLASIFICACION DE ELECTRODOS TUBULARES DE ACERO AL CARBON PARA EL PROCESO FCAW



6.13 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 "Tungsten Inert Gas (TIG)", "Argón-Arc Welding" y "Soldadura de Argón", 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, al electrodo y al metal de soldadura solidificado pero aún 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.

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, al electrodo y al metal de soldadura solidificado pero aún 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.



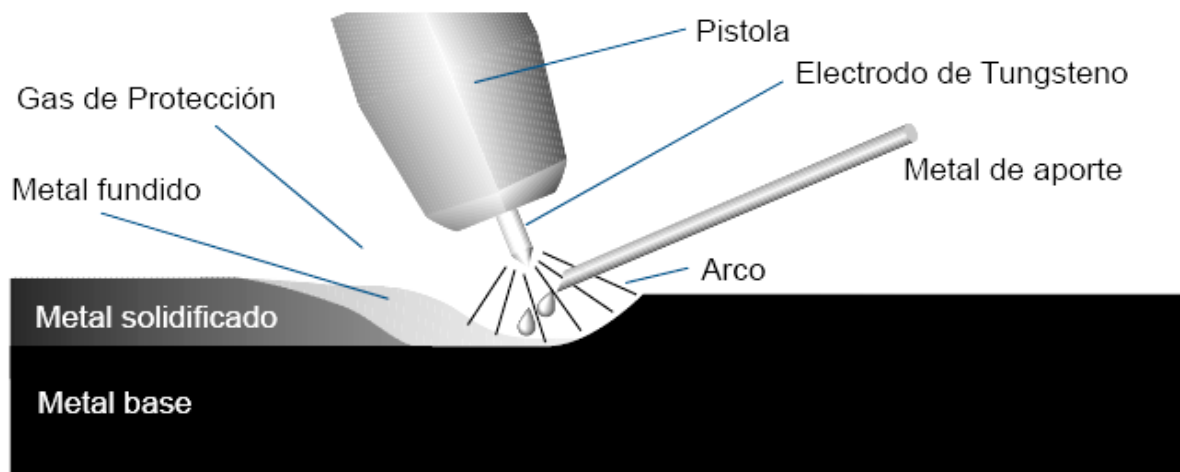


FIG. 6.25 PROCESO DE SOLDADURA POR ARCO DE TUNGSTENO PROTEGIDO CON GAS.

Métodos de aplicación

Este proceso se aplica manualmente la mayor parte de las veces, aunque también se emplean los métodos mecanizado y automático, 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 incluido, 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 ésta 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 mecanizado 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 6.26 ilustra de manera esquemática el equipo típico del proceso de soldadura por arco de tungsteno protegido con gas.

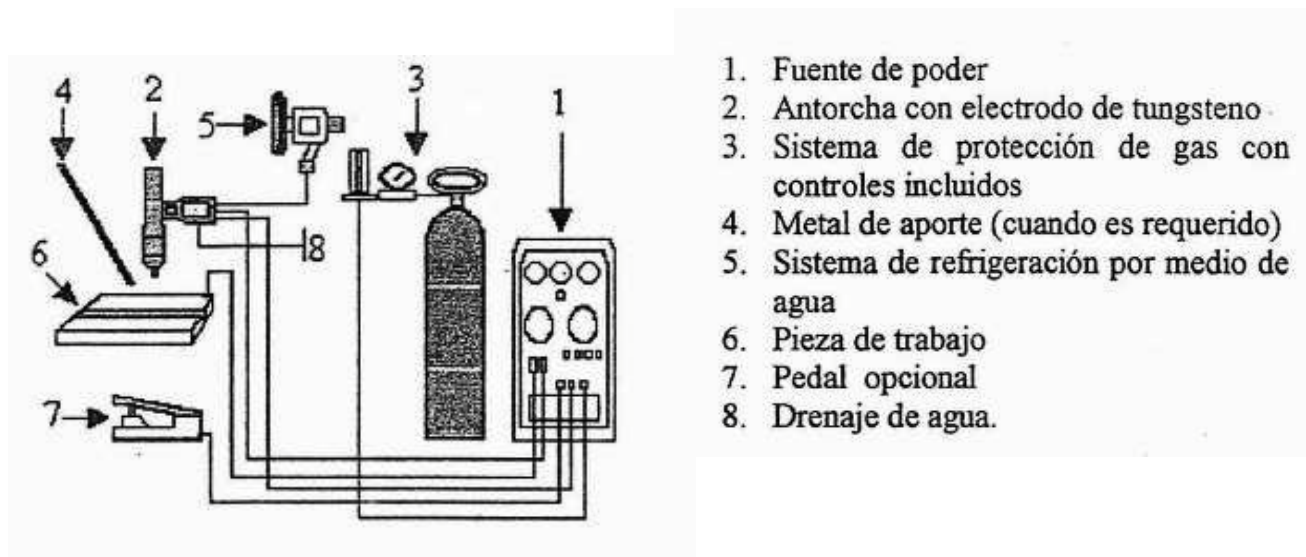


FIG. 6.26 EQUIPO EMPLEADO EN EL GTAW

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; así mismo, es el proceso de soldadura más 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 (aún ya solidificados) si no se protegen adecuadamente, y pierden ductilidad y tenacidad si absorben impurezas tales como oxígeno, hidrógeno 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, lámina y tubería.

Es particularmente apropiado para soldar secciones delgadas, de unas 0.010" (0.25 mm) a menos de 3/8" (10 mm), y tuberías de diámetro de 1 a 6 pulgadas (25.4 a 152.4 mm), aunque también puede usarse para soldar secciones de espesor mayor de 3/8" , pero en este caso, los costos resultan muy elevados.

Las principales ventajas que ofrece este Proceso se enumeran a continuación:

- Puede usarse para soldar casi todos los 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.
- Puede 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 obtienen 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 requeridas por los procesos SMAW (con el método de aplicación manual) y GMAW.
- Los costos asociados con la soldadura de metales base de espesores mayores de 3/8" (10 mm) son mayores que aquellos con los procesos por arco que emplean electrodos consumibles.
- Es difícil lograr una protección adecuada de la zona de soldadura en ambientes donde hay corrientes de aire, ya que éstas 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.

6.14 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 sig. se presenta un resumen de las variables típicas empleadas en diferentes aplicaciones .

Gases de protección

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

No existen reglas para seleccionar el gas de protección para ninguna 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 más que el helio debido a que con respecto a este, ofrece las sig. Ventajas.

- Acción uniforme y suave del arco.
- Penetración Reducida lo que resulta favorable para espesores delgados.
- Acción limpiadora cuando se sueldan metales como el aluminio y el magnesio.
- Menor voltaje de 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 corrientes de aire.
- Requiere menos flujo para dar una protección adecuada.
- Resulta más apropiado para soldar metales diferentes.
- Mayor control del charco de soldadura en posición vertical y sobre cabeza.
- Permite un inicio de arco más fácil.

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

- Produce zonas afectadas térmicamente más pequeñas.
- Para valores de amperaje y longitud de arcos dados, con el helio se transfiere más 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 y la penetración más 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 hidrógeno 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 hidrógeno no puede causar problemas de porosidad o agrietamiento inducido por hidrógeno. También se emplea en situaciones en las que la porosidad es un problema; en algunos casos, se usan mezclas de argón e hidrógeno cuando ningún otro gas puede evitar la porosidad.

Las mezclas de argón e hidrógeno son útiles para soldar aleaciones de base níquel, aceros inoxidables y aleaciones níquel-cobre, y no debieran usarse en la soldadura de aceros simples al carbono o aceros de baja aleación ver tabla 6.10



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
	Abajo de 1/8 pulgada	CDEP	Al torio o al circonio	Argón
Cobre	Todos.	CDEN	Al torio	Helio
	Abajo de 1/8 pulgada	CA	Puro o al circonio	Argón
Magnesio	Todos	CA	Puro o al circonio	Argón
	Abajo 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
	Abajo de 1/8 pulgada	CA	Puro o al circonio	Argón
Aceros inoxidables	Todos	CDEN	Al torio	Argón o argón y helio
	Abajo de 1/8 pulgada	CA	Puro o al circonio	Argón
Titanio	Todos	CDEN	Al torio	Argón

TABLA. 6.10 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 hidrógeno 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 hidrógeno, pero mezclas típicas para soldadura mecanizada contienen 15% de este gas, y para soldadura manual, algunas veces se emplea una mezcla con 5% hidrógeno a fin de obtener soldaduras más limpias.

El flujo de gas de protección requerido depende del 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 sección 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, está 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 más pesado que el aire y unas 10 veces más 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 de flujo de helio sea el 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 (trailing gas): En algunas aplicaciones, tales 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 ésta (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 inoxidable 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 debajo 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 el 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 CDEN (polaridad directa), aunque suele usarse corriente alterna para soldar aleaciones de magnesio y aluminio; el empleo de la corriente directa con electrodo positivo CDEP (polaridad invertida) por lo general está limitado a la soldadura de espesores muy delgados.

La CDEN se emplea más ampliamente en este proceso debido a que al usarse un electrodo de tungsteno (termoiónico), aproximadamente el 70% de 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 CDEN, la punta del electrodo es enfriada por la "evaporación" de electrones, mientras que con CDEP, 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 CDEP se requiere un electrodo de mayor diámetro para una corriente de soldadura dada, que con CDEN. 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 usa con 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 del 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 éste 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 involucren 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 alta penetración a altas velocidades. Esta técnica involucra el uso de CDEN, 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 agudo es el ángulo incluido de afilado del electrodo, mayor es la penetración y menor el 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, afilados 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 del cordón y también (aunque moderadamente) la penetración. El ancho de los cordones también aumenta al oscilar el arco.

6.15 CONSUMIBLES, 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 consumibles, 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 efecto de 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 varia de 0.010" (.25mm) a 1/4" (6.4 mm) 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 norma ANSI/AWS A5.12. "Especificación para electrodos de tungsteno y aleaciones de tungsteno para soldadura y corte por arco, La tabla 6.11 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

TABLA 6.11 CLASIFICACION 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 A5.9 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 soldadura superficiales
- AWS A5.14 para electrodos y varillas de níquel y sus aleaciones
- AWS A5.16 para electrodos y varillas de titanio 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 superficiales
- 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 especificaciones emitidas por la Sociedad Americana de Soldadura. En las páginas 99 y 100 se describe el sistema de clasificación de los metales de aporte para soldar aceros al carbono con este proceso y con GMAW (especificación AWS A 5.18.)

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 depósito de soldadura (normalmente seguidos 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 número 1 que establece que tal varilla se puede usar en todas las posiciones de soldadura y el número 5 o la letra G. El 5 indica que el gas de protección externo 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 tabla 6.12

Clasificación AWS	Protección externa	Polaridad
RXXXXT1-5	100% Argón	CDEN
RXXXXT1-G	No especificado	No especificada

TABLA 6.12 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 su 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 **RFe5-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 **ERCuAl-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 compuestas 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.

VER ANEXO 1, ESPECIFICACIONES ESTÁNDAR ASTM



6.16 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° e (30,000° 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 (como en 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 6.27

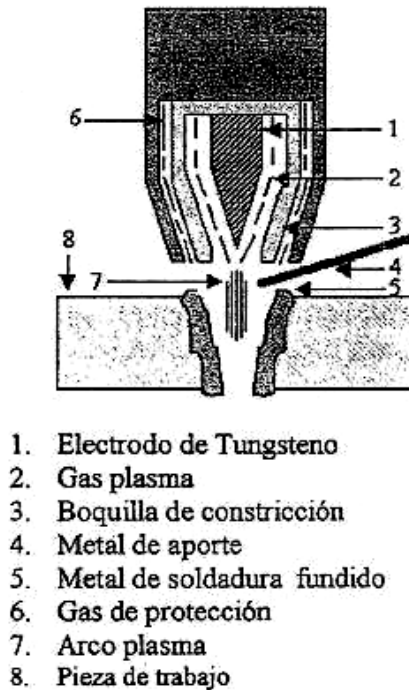


FIG. 6.27 SOLDADURA POR ARCO PLASMA

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 ésta 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 constrictión 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 convenientes bajas 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 114" (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 en el lado de avance del charco de soldadura, y según avanza la fuente de calor, el metal 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 10 mm (3/32" a 3/8") y, en algunas aleaciones de aluminio y titanio, pueden soldarse espesores de hasta 19 mm (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 1.6 mm) 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 3.2 mm (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.

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 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 6.26 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 empleadas en el proceso GTAW.

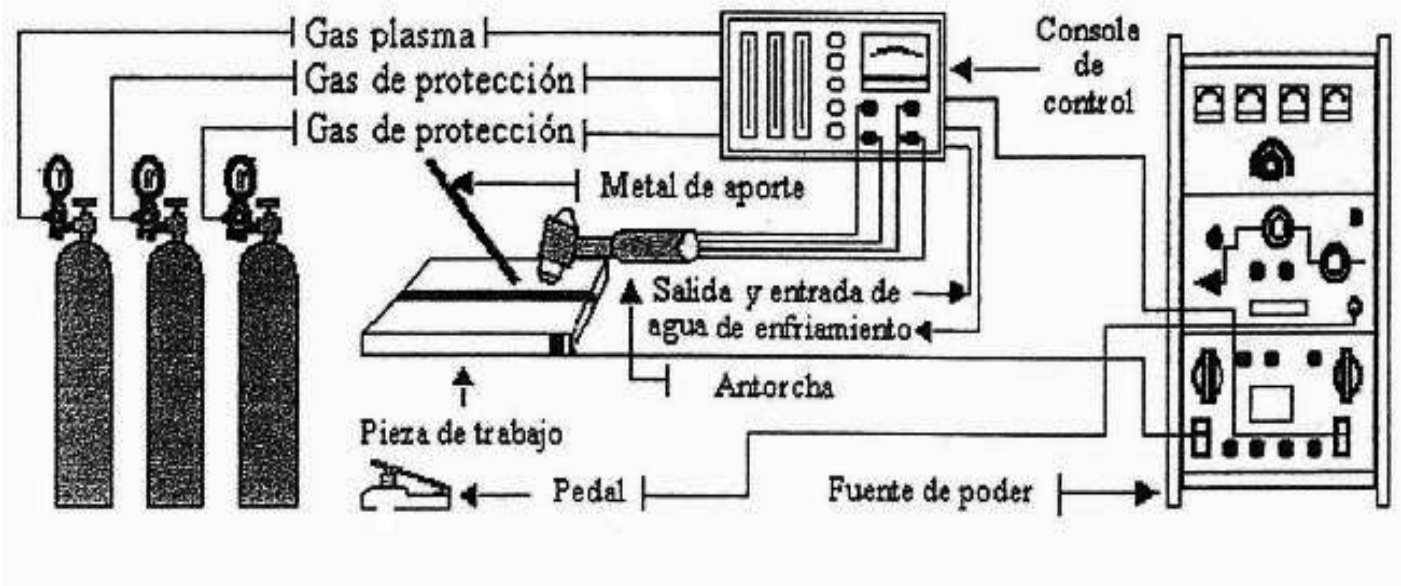


FIG. 6.28 EQUIPO PARA SOLDADURA POR ARCO PLASMA

También, para soldar aluminio con el modo ojo de cerradura, se emplean fuentes de corriente alterna de onda cuadrada con 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 energía propias del arco 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 soldaduras pequeñas, tales como mallas de alambre, equipo médico, electrónico y de instrumentación. El modo "en fusión" (melt-in) con alta y baja corrientes tiene las siguientes ventajas y limitaciones con respecto al proceso GTAW.



Ventajas:

- La concentración de energía es mayor, por lo que las velocidades de soldadura 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 en un 50%.
- El arco es más estable.
- La penetración puede controlarse por medio de las variables de soldadura.
- Produce cordones más angostos (en términos de la relación profundidad/ancho), lo que resulta en menor distorsión.
- 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:

- Ya que el arco constreñido es muy angosto, hay muy poca tolerancia para la mala alineación de las juntas
- Las antorchas manuales para soldadura por arco plasma generalmente son más difíciles de manipular que las antorchas similares para arco de tungsteno.
- El deterioro de la boquilla de constricción afecta la consistencia del nivel de calidad de las soldaduras.

Las principales ventajas y limitaciones del arco plasma en el modo ojo de cerradura, con respecto del arco de tungsteno protegido con gas se listan a continuación.

Ventajas:

- La mayor penetración obtenida en la junta permite reducir el número de pasos requerido para una junta dada.
- La zona de fusión simétrica de la soldadura reduce la tendencia a la distorsión transversal.



- El gas plasma que fluye a través del ojo de cerradura abierto ayuda a evitar la porosidad.
- 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:

- El método de aplicación manual requiere mayor habilidad del soldador, especialmente al soldar espesores gruesos.
- Los procedimientos de soldadura involucran un número mayor de variables, dentro de un intervalo de operación estrecho.
- Aunque puede aplicarse en todas las posiciones, normalmente está restringido, con excepción de las aleaciones de aluminio, a la posición plana.
- El deterioro de la antorcha afecta la consistencia del nivel de calidad de las soldaduras.

6.17 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 eléctricas son los tipos de corriente y polaridad, la intensidad de la corriente, la longitud del arco y la 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 electrodo positivo, debido a que provoca el calentamiento excesivo del electrodo, sólo 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 inoxidables, 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 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 tienen 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 su 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 soldadura de arco plasma con bajas corrientes se prefiere el argón como gas de orificio, ya que su bajo potencial de ionización asegura un arco piloto y una iniciación de arco confiables. 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



hidrógeno (por lo general de 1 a 5% de hidrógeno), y para los aceros simples al carbono, de baja aleación e inoxidables, 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 (trailing gas); en términos generales, las consideraciones hechas al respecto para la soldadura con GTAW también son aplicables para el proceso de arco plasma.

6.18 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 A5.13 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.

6.19 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 charco 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 del alambre (electrodo) y algunas veces de fuentes adicionales, tales como varillas o metal granulado.

En la figura 6.29 se muestra de manera esquemática este proceso.



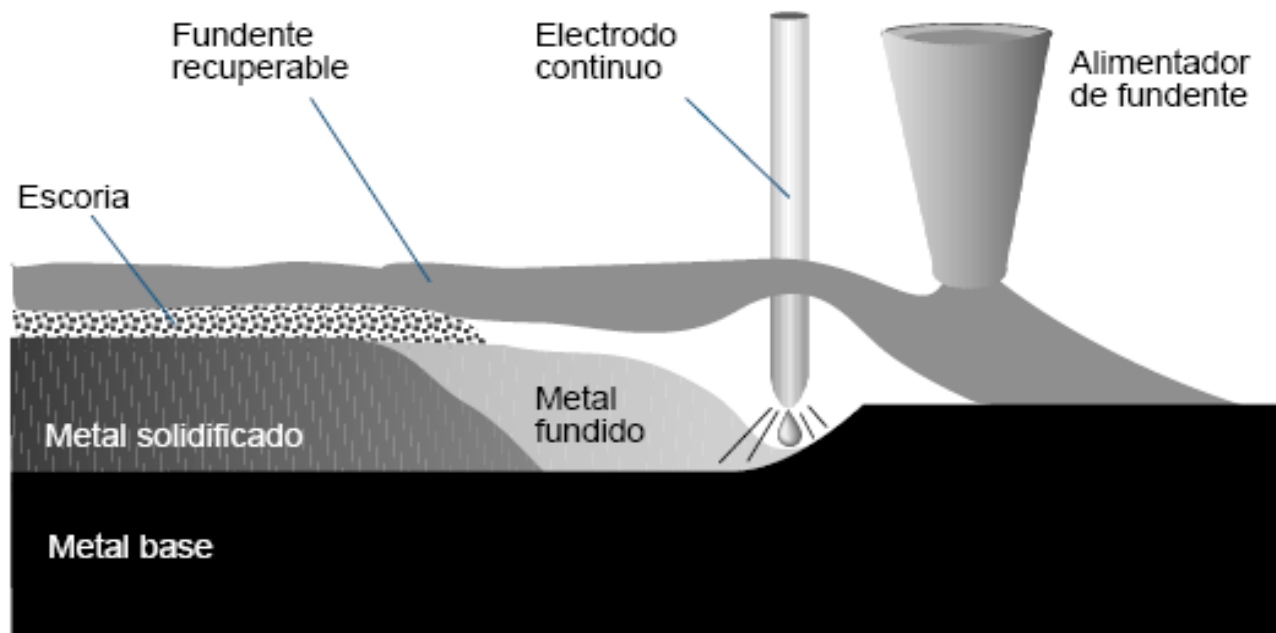


FIG. 6.29 PROCESO DE SOLDADURA POR ARCO SUMERGIDO

Al iniciarse la operación de soldadura, el extremo del 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 proteger al arco y al charco de soldadura, la escoria evita que el cordón solidificado pero aún caliéntese 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 ayudar a controlar el tamaño de grano y la composición química, así como algunas de las propiedades de los depósitos 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 impuestas 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 electrodo debe transportar corriente y el otro o los otros pueden transportarla o no (cold filler), y pueden estar conectados a una o más fuentes, mismas que pueden ser de corriente alterna o corriente directa, o tilla combinación de ambas.



Electrodos gemelos (twin electrodes or 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 en tándem (tandem arc SAW). Esta configuración consiste en un electrodo guía (lead electrode) y uno o más electrodos de seguimiento (trail electrodes) alimentados a un mismo charco de soldadura mediante fuentes y alimentadores independientes.

Existen dos arreglos básicos: en uno el electrodo guía se conecta a 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 (narrow groove welding) que se aplica para soldar metales base de espesores gruesos -de 51 mm (2") y mayores-, adiciones de alambre que no transporta corriente (cold wire addition) y que involucra alambres sólidos y tubulares, adiciones de alambres que sí transportan corriente (hot wire addition) y adiciones de polvo metálico (metal power addition)

Métodos de aplicación

La soldadura por arco sumergido puede aplicarse con los métodos semiautomático, mecanizado y automático.

En el método de aplicación semiautomático 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 tilla 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 está 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 (1/16", 5/64" Y 3/32") e involucran corrientes de soldadura de unos 200 a 600 amperios.



El método mecanizado es el que más se usa, aunque también tiene gran aplicación el automático. La soldadura mecanizada y la automática normalmente se realizan con electrodos de 3.2 a 4.76 mm (1/8" a 3/16") de diámetro, aunque se suelen usar diámetros hasta de 6.35 mm (1/4") con corrientes máximas de 1600 amperios y, para algunas aplicaciones, velocidades hasta de 508 cm/minuto (200 pulg/min.)

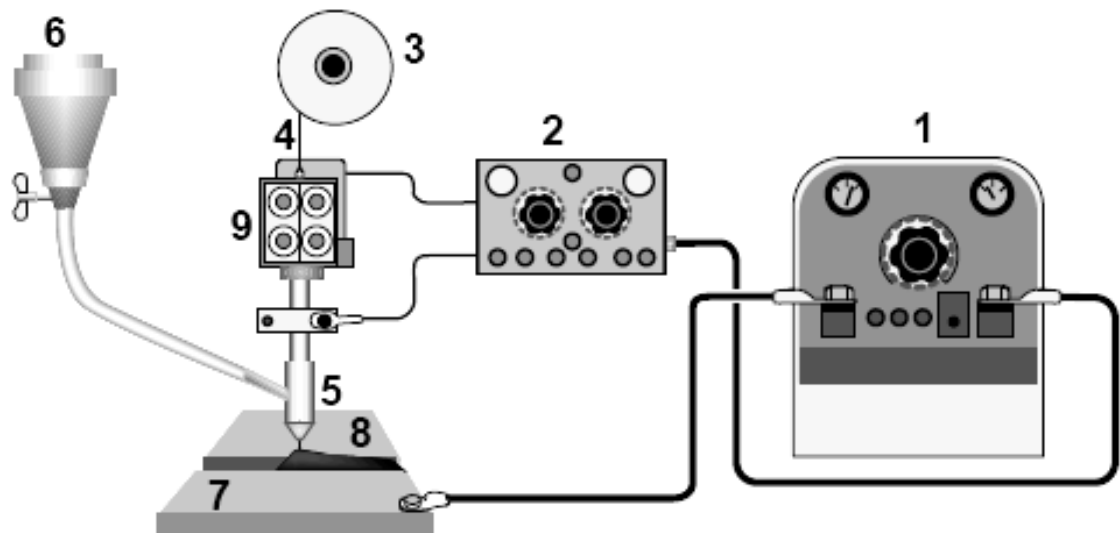
Equipo

El equipo típico de soldadura requerido para este proceso consta de una o más fuentes de energía, sistemas de control del proceso, de alimentación de alambre y de suministro de fundente, y los equipos automáticos y mecanizados y aún 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

Para soldar con arco sumergido son adecuados varios tipos de fuente de energía, pero para una aplicación dada, la fuente debe seleccionarse considerando algunos factores, ya que ésta 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 máquinas 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 automática con alambres de diámetros mayores y con corrientes de 300 a 1000 amperios. Debido a que la soldadura con corriente directa provoca soplos de arco 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. Ver figura 6.30





- | | |
|--|-------------------------------|
| 1. Fuente de Poder de CC o CA (100% ciclo de trabajo). | 5. Tobera para boquilla. |
| 2. Sistema de Control. | 6. Recipiente porta-fundente. |
| 3. Porta carrete de alambre. | 7. Metal base. |
| 4. Alambre-electrodo. | 8. Fundente. |
| | 9. Alimentador de alambre. |

FIG. 6.30 EQUIPO DE SOLDADURA PARA PROCESO SAW

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 (que usan alimentadores de alambre de velocidad constante), las de corriente constante no son autorreguladas, 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 corriente constante, 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 pueden mencionar la fabricación de recipientes a presión, carros de ferrocarril, tuberías y miembros estructurales que requieren soldaduras de gran longitud, o para producir ensambles que incluyen la producción en serie y soldaduras repetitivas. También se emplea ampliamente para hacer depósitos de recubrimientos duros e inoxidable.

Los espesores típicos que se sueldan normalmente oscilan de 1.5 a 51 mm (0.06" a 2") y los de metales base a los que se aplica son: aceros simples al carbono, aceros de alta resistencia y baja aleación en condición de laminación o con tratamientos térmicos de normalizado o de temple y revenido, aceros al carbono molibdeno (con contenidos nominales de 0.5% Mo), al cromo molibdeno (de 0.5 a 9% Cr y de 0.5 a 1% Mo), aceros inoxidables y algunas aleaciones de níquel.

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 electrodo positivo (polaridad invertida)
- 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 los bordes y con la aplicación de soldadura.
- Altas tasas de depósito (de 27 a 45 Kg/h de 60 a 100 lb/h) al soldar espesores medianos y gruesos
- Aunque se emplean intensidades de corriente 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 está 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

6.20 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 clasificaciones de los fundentes

Los fundentes que se emplean en arco sumergido son mezclas fusibles de minerales granulados y otros compuestos químicos de composiciones 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 éstos se clasifican en base de diferentes características. A continuación se indican las formas de clasificación y los tipos incluidos en cada una de éstas

En base de los *métodos de fabricación*, los fundentes pueden ser de los tipos fundido, aglomerado y los mezclados mecánicamente



Fundentes fundidos

Éstos 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, vaciado 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 higroscópicos, su almacenamiento y manejo es sencillo e involucran poco riesgo de agrietamiento asociado con absorción de hidrógeno. Su principal desventaja es su limitado intervalo de composición química, y se deriva de la dificultad de adicionarles desoxidantes y ferro-aleaciones durante su proceso de fabricación.

Fundentes aglomerados

Estos fundentes, a los que también se les denomina “bonderizados” o “aglutinados” (bonded flux), pueden contener óxidos de calcio y magnesio y sales de haluros. Su proceso de fabricación consiste en la trituración y mezclado en seco de las materias primas aglutinado con sustancias tales como silicato 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: facilidad para adicionarles agentes desoxidantes y elementos de aleación, tienen una menor densidad que los fundidos, pueden usarse camas 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 hidrógeno, 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 soldadura patentadas o altamente críticas, pero presentan las siguientes desventajas; segregación de los fundentes mezclados durante las operaciones de manejo, 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 en la composición química 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; 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 y Fe, mientras que los de carácter ácido son Si, Al, Ti y Zr. Un indicador del carácter del fundente es su índice de basicidad (IB), el cual puede determinarse por medio de algunas fórmulas. La siguiente es propuesta por el Instituto Internacional de Soldadura:

$$IB = \frac{CaO + CaF_2 + MgO + K_2O + Na_2O + 1/2 (MnO + FeO)}{SiO_2 + 1/2 (Al_2O_3 + TiO_2 + ZrO_2)}$$

En términos generales, si el índice de basicidad tiene un valor menor a 1, el fundente es ácido, si tiene un valor mayor de 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 está en forma de humedad superficial en las partículas, pero los aglomerados sí pueden absorber 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 absorberán 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 re-acondicionamiento 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.

6.21 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 un electrodo 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 a los metales de soldadura para arco sumergido, es necesario hacer referencia al fundente y al electrodo empleados para obtener dichos metales, y el sistema AWS para designarlos difiere tui tanto del que típicamente emplea para otros metales de aporte la figura 6.31 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 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.



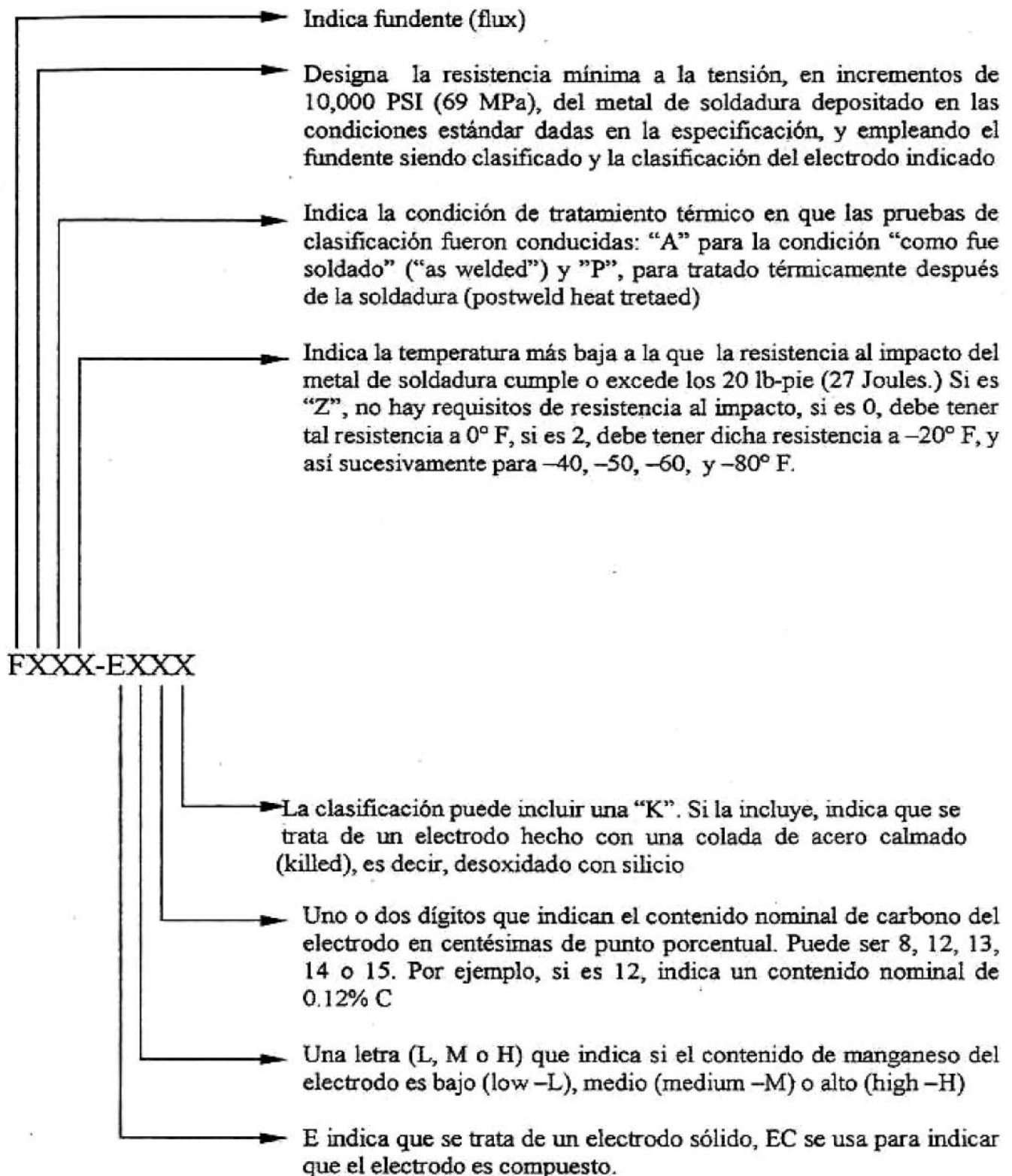


FIGURA 6.31 SISTEMA DE CLASIFICACIÓN AWS PARA FUNDENTES Y ELECTRODOS DE ACERO AL CARBÓN PARA SOLDAR CON ARCO SUMERGIDO



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'

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 de 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-ECI**, 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 puede depositarse mediante el empleo de electrodos sólidos 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 aleados 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 A5.23, se clasifican de una manera



similar a la descrita para fundentes y electrodos de acero al carbono, pero estas clasificaciones incluyen sufijos que indican los elementos de aleación principales que forman parte de la 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, está 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 del 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 refieren a las propiedades del metal de soldadura obtenido con la combinación del fundente específico empleado para obtener dicho metal, conjuntamente con el electrodo sólido EM12K (de acero al carbono, incluido en la tabla 1) y el sufijo **B3**, que indica que 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 metal de soldadura se obtiene con un electrodo aleado. El segundo grupo de caracteres (**ECM2**) indica que para obtener dicho metal se empleó 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 clasificaciones pueden incluir la letra **N**, que indica que el electrodo correspondiente está previsto para aplicaciones nucleares y que debe cumplir con los requisitos correspondientes. También pueden incluir un designador opcional suplementario que se refiere al hidrógeno difusible (**H4**, **H8** o **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 hidrógeno difusible (4 ml/100 g metal depositado, como promedio máximo) establecido en la tabla 8 de la especificación.

Cuando se requieren soldar metales bases diferentes a los aceros al 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 apropiadas 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 pérdidas por oxidación que provoca el arco. Los fundentes para soldar aceros inoxidables y aleaciones de níquel tienen 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



TEMA 7

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, cómo 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 de 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 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 inoxidable, aleaciones de níquel, magnesio, titanio, etc.), las variaciones de espesor del metal base y los 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 calificados y apropiados 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.

7.01 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 variables de 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 éstas, se hacen algunas consideraciones acerca de cada uno y se señalan las diferencias básicas con que son tratadas en las principales normas.

7.02 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 todas las especificaciones de procedimiento de soldadura a emplearse, que éstas deben estar documentadas, calificadas y aprobadas, y que en tales trabajos sólo 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 tienen características y propósitos similares, hay diferencias básicas entre 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 pruebas de calificación antes de poder ser empleados), pero otras normas no contemplan esta posibilidad. Por otra parte, de acuerdo con los lineamientos 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 aquélla 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 personal de soldadura establecidos en las normas más empleadas, y se hacen algunos comentarios con respecto a las diferencias más relevantes establecidas en éstas.

7.03 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 las 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 el Código ASME BPV estipula que 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, sólo en el Código ASME BPV se hacen consideraciones relacionadas con las variables 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 o la exclusión del tratamiento térmico posterior a la soldadura.

Variable esencial suplementaria es un cambio en una condición de soldadura que afecta la tenacidad (resistencia al impacto) de una junta soldada. Un ejemplo de este tipo de variable son incrementos (mayores a los establecidos en las tablas de variables) en la temperatura entre pasos y en el calor aportado por paso.

Es necesario tener presente que este tipo de variables sólo es aplicable cuando otras secciones del código (no la Sección IX), la Sección VIII, División 1, por ejemplo, especifican requisitos de resistencia al impacto para algunos metales. En este caso, uno 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 que no afecta las propiedades mecánicas de la unión y no requiere recalificación.

Por su parte, ni AWS D1.1 ni API 1104 definen expresamente qué es una variable esencial, pero en todas las normas se indica con precisión cuales son éstas para cada proceso de soldadura, y se establece que un cambio en una o más de este tipo de variables, hace obligatoria la recalificación del 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

7.04 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 éste las probetas o especímenes para realizar los ensayos que establece cada norma.

El propósito de la calificación de un procedimiento es determinar que 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 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 para 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 cara 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 del 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 especifica 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 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 calificación es 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 la EPS y el RCS definitivos.

En el RCP, el fabricante o contratista debe certificar que los cupones y los especímenes de prueba se prepararon, soldaron y ensayaron cumpliendo los requisitos especificados. Adicionalmente, el EPS calificado debe proporcionarse a los soldadores u operadores que lo van a emplear, y tal EPS, así como el RCP correspondiente, deben 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

7.05 ESPECIFICACIÓN DE PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA PRECALIFICADO

El Código ANSI/AWS D1.1 para 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 EPS 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 y el persona 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 indicadas 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 establecidos en la tabla 3.7



7.06 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 tienen el soporte de dos o más RCP's realizados de acuerdo con la *Norma AWS B2.*} *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 Addenda 2000, permite que los fabricantes o contratistas usen las EPS estándar de la AWS en la construcción de partes y equipos nuevos sujetos a presión, y no tendrán que realizar pruebas de calificación de procedimiento, sino que sólo deberán efectuar y documentar una demostración que avale que conocen suficiente de soldadura para seguir y aplicar la EPS estándar correspondiente.

7.07 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, precali:ficadoso 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 operator) 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 calificación 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 radiográfico 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 o modo de transferencia metálico 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 respaldos, diámetros de tubería, etc., así como el tipo y número 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 de Habilidad del Soldador CHS o RCHS (Record Welder Qualification Record WPQ or WPQR)*. En este documento se registran las condiciones y los valores reales de las variables que uso 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 prueba 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 habilidad de un soldador o un operador de equipo para soldar expira si o éste no ha soldado con un proceso durante un período de 6 meses o más.

Por su parte, el Código ANSI/AWS D1.1 establece que si el período 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 cómo y en qué circunstancias debe conducirse la repetición de pruebas de habilidad en aquellos casos en los que el personal falló en su primera prueba de calificación. Adicionalmente, los soldadores y los operadores de 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

7.08 VARIABLES DE SOLDADURA A INCLUIR EN LOS DOCUMENTOS DE CALIFICACIÓN

Como se mencionó anteriormente, la información requerida acerca de las variables de soldadura que debe incluirse en los EPS, RCP y RCS difiere de una norma a otra, y también varía 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:

- Uniones o juntas
- Metales base
- Metales de aporte y electrodos
- Posiciones
- Precalentamiento y temperatura entre pasos
- Tratamiento térmico posterior a la soldadura
- Gases de combustión y de protección
- Características eléctricas
- 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 o 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*
- *Cambios en la composición nominal del respaldo*
- *Eliminación del 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 características tales como composición química, soldabilidad y propiedades mecánicas, de manera que los metales base 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 base ferrosos los cuales tienen especificados requisitos de resistencia al impacto. O Así, si una EPS se califica con un acero ASME SA-36, con P No. 1, esta misma EPS también está calificada y puede emplearse (si no hay cambios en otras variables esenciales) para soldar un acero ASME SA-285 grados A, By 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 o agrupados en categorías generales bajo Números M de materiales y subdivididos 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 o 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 QW452.2 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 soldadura están o 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 o está hecho en función de la composición química y a cada grupo se le asigna un Número "A". Esta clasificación agrupa a los diferentes metales de soldadura en "familias" tales como aceros 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 en el diámetro de los electrodos, AWS D1.1 si lo considera o (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



construcciones soldadas (las figuras 4.1 y 4.2 del Código AWS D1.1, por ejemplo). En la figura 7.1 se ilustran las diferentes posiciones de prueba.

Precalentamiento (preheat), temperatura entre pasos (interpass temperature) y calor portado por paso (heat input)

- Las principales variables dentro de esta categoría son:
- *Disminución de la temperatura de precalentamiento*
- *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 tienen 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 precalentamiento y entre pasos son parámetros cuyas variaciones entre límites estrechos son considerados como variables esenciales de procedimiento en las normas.

El propósito del precalentamiento es evitar el agrietamiento de las uniones durante las operaciones de soldadura, y en cierta medida reducir los esfuerzos residuales.

En términos generales, las necesidades de precalentamiento son mayores en la medida en 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 materiales consumibles de soldadura de bajo hidrógeno.

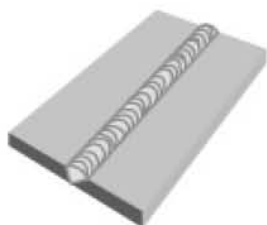
Los requisitos para temperaturas mínimas de precalentamiento y entre pasos están referidos en cada norma, por ejemplo:



- El Código AWS D1.1 en su Tabla 3.2 establece las temperaturas mínimas de precalentamiento y entre pasos para procedimientos precalificados, así como métodos opcionales (véase Anexo XI) para fijar éstas.
- La Sección VIII, División 1 del Código ASME, en su Apéndice R, "Precalentamiento", ofrece una guía general para fijar el precalentamiento 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 precalentamiento y entre pasos, con excepción de las indicadas en las notas de pie de página de las Tablas Nos. DeS-56 y UHA-32.
- El Código ASME B31.3, "Tuberías para Plantas Químicas y Refinerías de Petróleo" establece, en su Tabla No 330.1.1, las recomendaciones y requisitos de temperatura mínima de precalentamiento y entre pasos (y de temperatura máxima entre pasos) para metales base de diferentes espesores y Nos.P.

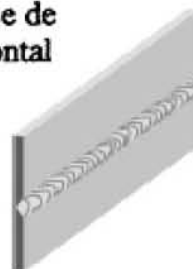


Placa horizontal



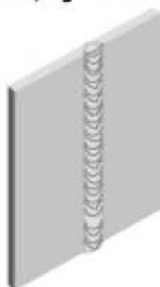
Posición de prueba 1G

Placa vertical; eje de soldadura horizontal



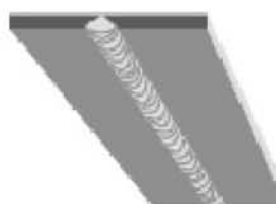
Posición de prueba 2G

Placa vertical; eje de soldadura vertical



Posición de prueba 3G

Placa horizontal



Posición de prueba 4G

Posiciones de prueba para soldaduras de ranura en placa

Tubo horizontal; se gira al soldar

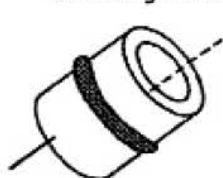


Posición de prueba 1G girada

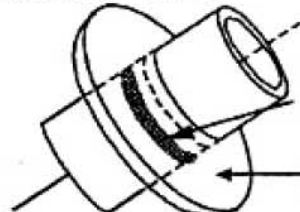
Tubo horizontal ; no se gira al soldar; soldadura plana, vertical y sobre cabeza



Posición de prueba 5G

Tubo fijo inclinado a $45^\circ \pm 5^\circ$ 

Posición de prueba 6G



Posición de prueba 6GR (para conexiones T, Y o K)

Soldadura de prueba
Anillo de restricción

Tubo vertical; soldadura horizontal

Posición de prueba 2G

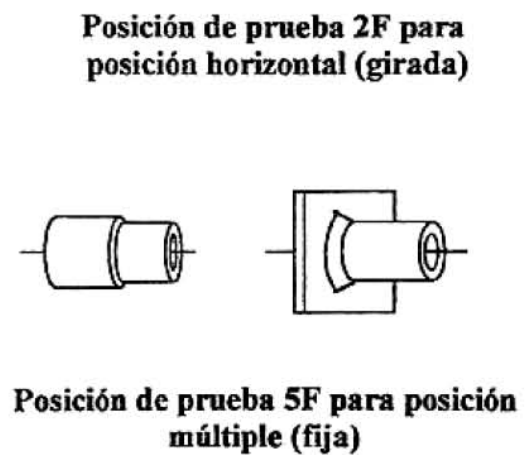
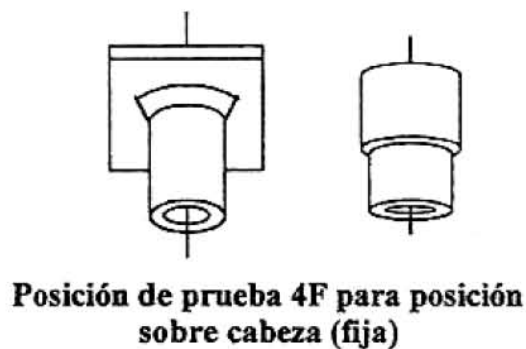
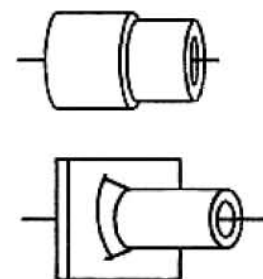
Posiciones de prueba para soldaduras de ranura en tubo

FIG. 8.1 POSICIONES DE PRUEBA DE SOLDADURA sigue...





Posiciones de prueba de soldaduras de filete en placa



Posiciones de prueba de soldaduras de filete en tubo

FIG. 8.1 POSICIONES DE PRUEBA DE SOLDADURA



Asimismo, cada norma particular, en sus tablas de 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 estén establecidas las limitaciones a las variables antes citadas, obedece a que la soldadura de estos aceros no presupone 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 inoxidables 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 solamente a las tablas de variables esenciales y variables esenciales suplementarias incluidas en las normas, sino a las recomendaciones de los fabricantes de los metales base involucrados, y a bibliografía especializada sobre metalurgia e ingeniería de soldadura.

Tratamiento térmico posterior a la soldadura (postweld heat treatment)

Las variables más comunes son:

- *Inclusión u omisión del tratamiento térmico posterior*
- *El 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 de la temperatura superior de transformación. Un tratamiento de este tipo es el normalizado (aplicable sólo 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 de revenido (sólo aplicable a metalesferrosos)*
- *Un tratamiento térmico entre las temperaturas inferior y superior de transformación (aplicable sólo a metales baseferrosos)*
- *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 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 contruidos de acuerdo con la Sección VIII, División I del Código ASME, los requisitos correspondientes están contenidos en el párrafo UW-40 y las tablas Nos. DCS-56, Uill-56, UNF56 YUHA-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 contruidos 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 éste.

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 de la composición de la mezcla de gases*
- ⊖ *La adición o eliminación de gas de seguimiento (trailing gas), o bien un cambio en su composición*
- ⊖ *Cambios en la velocidad de flujo del gas*
- ⊖ *Adición u omisión del gas de respaldo (backing gas), o cambios en la velocidad de 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 y la pieza de trabajo (stickout or tube-work distance)*
- ⊖ *Número de electrodos (un solo electrodo o electrodos múltiples)*
- ⊖ *Espaciado entre electrodos*
- ⊖ *Ángulo 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 particulares o categorías éstas son aplicables a todos los procesos o metales base o de aporte. Los individuos encargados realizar los trabajos (y también los inspectores o el personal encargado de evaluarlos y aprobarlos) asociados con la 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.



7.09 RESPONSABILIDADES CON RESPECTO A LA CALIFICACIÓN DE PROCEDIMIENTOS Y PERSONAL DE SOLDADURA.

Como se mencionó a lo largo de este capítulo, los contratistas y fabricantes que intervienen 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 éstas y de calificar la habilidad del personal de soldadura que va a emplear tales EPS, así como preparar, archivar 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 de 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 especificados por éste y que cubran todas 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 escrito en las EPS correspondientes, que las calificaciones de procedimiento 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 sólo intervenga personal cuya habilidad esté 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 con 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



TEMA 8

PRUEBAS DESTRUCTIVAS

Introducción

Como todos los productos que se fabrican y construyen, las partes y estructuras soldadas están destinados a realizar un servicio bajo condiciones específicas, y las juntas soldadas de tales productos se diseñan para que posean las propiedades y capacidad apropiadas para operar satisfactoriamente bajo las condiciones de servicio previstas. Con el propósito de asegurar que las juntas cumplirán de manera efectiva la función 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 aún 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 éstas 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 ductilidad, 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 éstas se clasifican de acuerdo a diferentes criterios. Algunas son de naturaleza definitivamente destructiva, mientras que otras no. Desde este 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 las segundas se describen en el siguiente.



Las pruebas destructivas que se realiza 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 las pruebas destructivas consiste en confirmar que éstas 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 cómo relacionarlos con las propiedades de las juntas soldadas de los bienes que inspecciona.

Las pruebas que con más frecuencia 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 antes 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 las 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 sólo 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.

8.01 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.

8.02 PRUEBAS MECÁNICAS

Estas pueden definirse como aquellas que se emplean para determinar propiedades mecánicas, tales como la resistencia, la tenacidad y la ductilidad. 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 éste es apropiado para un servicio mecánico determinado.

Existen pruebas mecánicas estáticas y dinámicas, y la mayor parte de éstas se realizan a temperatura 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.
- Ductilidad (ductility) - La habilidad de 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 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 esfuerzo normal y esfuerzo cortante, respectivamente. Los esfuerzos son
- expresados en términos de fuerza por 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 la define como la habilidad de un metal para resistir a la fractura en presencia de una ranura o entalla, 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, pero el área bajo la curva esfuerzo-deformación de la prueba de resistencia a la tensión también se usa como una 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 que actúan y son producidos por fuerzas cuyas direcciones se apartan de tal plano); también sirve para evaluar la ductilidad 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 que 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 cedencia (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, y 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 más 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 ductilidad del material. La siguiente figura 8.1, una curva típica de esfuerzo-deformación obtenida durante un ensayo de tensión:

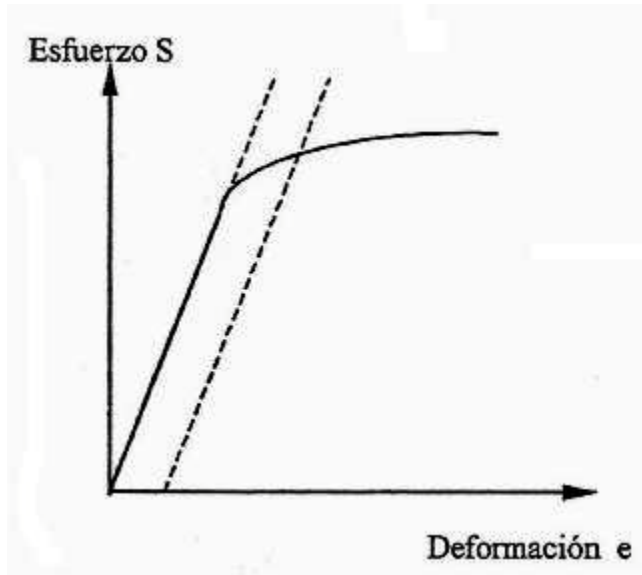


Figura. 8.1 Diagrama esfuerzo deformación para determinar la resistencia de fluencia por el método convencional.

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 soldadura 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 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 soldadura están establecidos en las normas correspondientes. Así, el *Código AWS D1.1 para Soldadura Estructural de Acero*, en su 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 1 contiene los requisitos para los especímenes y los criterios de aceptación (véase 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 prueba de doblado se emplean para evaluar la ductilidad y sanidad (ausencia de defectos) de las juntas soldadas, y la ductilidad por lo general se juzga verificando si el espécimen se fracturó o no bajo las 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 prueba de doblado: libre, guiado, semiguiado y "doblez alrededor de" (wraparound bend test).

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 tensión durante la prueba, pueden ser de doblado de cara, raíz o lateral. La siguiente figura 8.2 un dispositivo para realizar este tipo de pruebas.



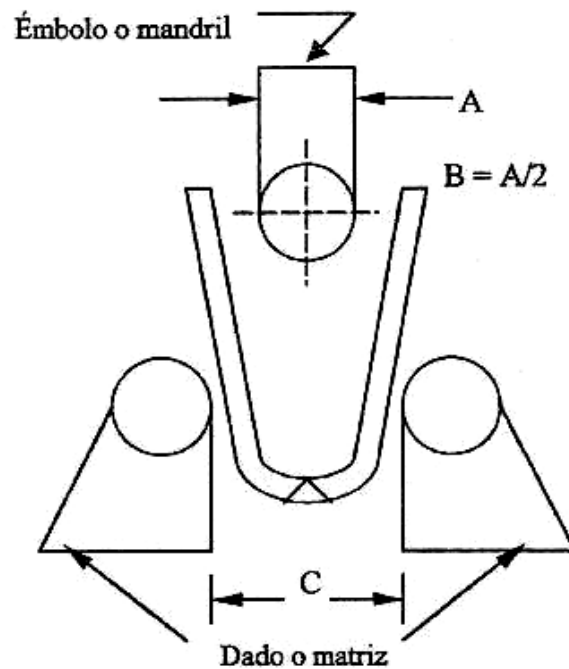


Fig. 8.2 Dispositivo de prueba de doblado guiado y un espécimen de doblado de cara con la soldadura transversal.

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 proceso de calificación) es capaz de producir juntas soldadas con los niveles de ductilidad mínimos especificados por las normas aplicables, y que los soldadores o los operadores de equipo para soldar son capaces de depositar metal de soldadura sin defectos y con el nivel de ductilidad 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 ausencia 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), especificado para cada tipo de material y para cada espesor nominal de espécimen o probeta. La dimensión del radio de doblez especificado varía entre tilla 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 QW466.3.
- Norma API 1104, "Soldadura de Líneas de Tubería e Instalaciones Relacionadas": Figura 9.
- Especificación API 5L para Tubería de Línea: Apéndice G (normativo).

Pruebas de dureza

La dureza es la resistencia que ofrece un material a la deformación, en particular a la deformación permanente, a la depresión (indentation) o al rayado; puede considerarse como la resistencia que ofrece un metal a ser penetrado.

Las prueba 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.

PARA MAS INFORMACION ACERCA DE LAS COMPARACION DE DISTINTOS METODOS VER ANEXO 2, TABLA COMPARATIVA DE DUREZAS

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 esta 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 ductilidad se consideran propiedades distintas (consúltense las definiciones incluidas en la sección "Pruebas mecánicas" de este capítulo).

Adicionalmente, algunos metales, en particular los aceros ferríticos, muestran un cambio de comportamiento (de dúctil a frágil) en el modo de falla al descender la temperatura, al tener



muecas 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 materiales 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 por la máquina de prueba.

Los métodos comunes de prueba para medir esta tenacidad en las juntas soldadas son: impacto Charpy en probeta con ranura en "V" desgarre dinámico, la tenacidad de fractura en plano de deformación (plane strain fracture toughness) y caída de peso (drop weight).

La prueba de tenacidad más empleada es la de impacto Charpy en probeta con ranura en "V"; su utilidad radica en el hecho de 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 se suelen 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 valor de energía igual al 50% de la diferencia entre los valores obtenidos



a 100 por ciento y Opor ciento de fractura de apariencia fibrosa". La figura 8.3 muestra una curva típica de temperatura de transición

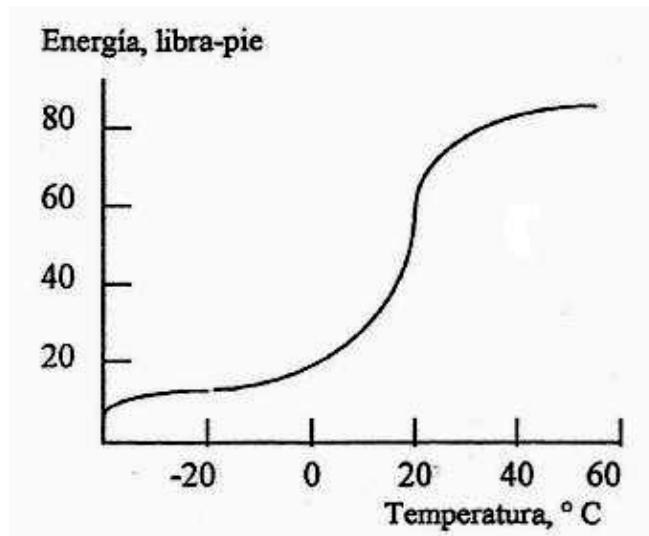


Fig. 8.3 Curva típica de temperatura de transición para una placa de acero al carbono.

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 materiales 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 calificación 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 1; 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).

8.03 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 de 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 Nos. 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, puede decirse que éstas 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 las juntas soldadas puede diferir mucho de aquella de los metales base no soldados debido a que en las primeras, las



regiones del metal depositado y la zona afectada térmicamente tienen 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 hidrógeno (hydrogen attack), fragilización causada por hidrógeno (hydrogen embrittlement) y agrietamiento por corrosión bajo esfuerzo (stress corrosion cracking).

Las normas sobre las pruebas de corrosión más 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 las juntas soldadas; existen normas específicas que tratan sobre pruebas y métodos de control de corrosión, algunas de éstas se citan a continuación:

- *Norma NACE TM0284, "Evaluación de la Resistencia al Agrietamiento Inducido por Hidrógeno (IIIC) en Aceros para Líneas de Tubería y Recipientes a Presión.*
- *Norma NACE TM0177, "Pruebas de Laboratorio para la Resistencia de los Metales a Formas Específicas de Agrietamiento Ambiental en Ambientes de H₂S". 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 la Asociación Nacional de Ingenieros en Corrosión (National Association of Corrosion Engineers).



8.04 PRUEBAS METALOGRAFÍCAS

Las pruebas metalográficas consisten en la obtención, preparación (mediante corte, desbaste y pulido y ataque químico o electroquímico) y evaluación de muestras metálicas representativas de 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 juntas soldadas, los exámenes metalográficos se usan para determinar uno o más de las siguientes aspectos]:

- La sanidad (ausencia de defectos) de las juntas
- La distribución de inclusiones no metálicas en la junta
- El número 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 QW452.5,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 Procesos 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"*

Adicionalmente, los métodos y procedimientos para la realización de exámenes metalográficos macroscópicos y microscópicos que eventualmente el inspector de soldadura pueda 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:

- Prueba 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 se hacen a las normas sobre métodos de prueba y criterios de aceptación, podrán ser de utilidad durante el entrenamiento y funciones del inspector de soldadura.



TEMA 9

EXÁMENES NO DESTRUCTIVOS

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 cuáles son sus responsabilidades y deberes. 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 soldadura 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 soldadura que también estén certificados para realizar uno o más de los exámenes no destructivos que comúnmente se especifican

El inspector de soldadura, como tal, sólo está calificado para realizar la inspección visual de los ensambles soldados, y aún 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 técnica 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 sí esta 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

9.01 EXÁMENES NO DESTRUCTIVOS

Los exámenes no destructivos END son definidos, por la norma ANSI/AWS A3.O, 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 éstas son realizadas por parte del fabricante o 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 inutilizan las piezas sometidas a ensayo ni afectan de manera permanente sus propiedades; su 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 confiabilidad de las partes examinadas. A 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 aún con pruebas destructivas.
- Cada método tiene un ámbito específico de aplicación .determinado 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)
- Partículas magnéticas (MT)
- Ultrasonido (UT)
- Electromagnetismo (Corrientes parásitas 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 Láser

Los primeros seis métodos de examen de la lista anterior son los más 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 clasificados dentro de esta categoría son: prueba de carga, algunos tipos de prueba de 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 subsuperficiales, esto es, que están muy cerca de la superficie pero no afloran a ésta. Una regla práctica para diferenciar a las discontinuidades internas de las subsuperficiales es que las últimas 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 ésta. 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 presión o volumen del fluido de prueba por períodos 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, por 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 10; 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 causó
- *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 describen de manera breve los principios de los métodos más comúnmente empleados y sus principales aplicaciones, ventajas y limitaciones.

Adicionalmente, al final de este capítulo se ofrecen tablas que resumen algunas aplicaciones y limitantes de varios métodos de examen.



9.02 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 involucra 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 objetos 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 alurios 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 un punto de vista práctico, la mayoría de los END involucran en 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 sencillos, 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; también debe tener conocimientos sobre las características y propiedades de la luz, la iluminación y la visión y los factores que afectan a ésta última durante la inspección. Otros requisitos con 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 acuñado 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 detalle 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 sólo 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 las industrias 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 los



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 llenado, porosidad superficial, grietas abiertas a la superficie, traslapes, tamaños y gargantas de soldadura menores a los especificados, convexidades y alturas de refuerzos excesivos, 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 (abertura de raíz, ángulo de ranura o cara de raíz de tamaños menores o mayores a los especificados, por ejemplo), o permite a 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 su curso el proceso de fabricación. De no efectuarse tal inspección -visual, los problemas y los defectos potenciales ocurrirán y podrían no ser detectados posteriormente, o bien, detectados si está 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 quizá 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 de 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 EDN, 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 indicios 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 EDN
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 está 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 no será capaz de asegurar que todas las operaciones 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 hidrógeno fueron manejados adecuadamente, de manera que no se presenten riesgos de agrietamientos durante servicio

9.03 LÍQUIDOS PENETRANTES

El examen por líquidos penetrantes es uno de 10 más antiguos métodos empleados de ensayos no destructivos. Consiste en aplicar un líquido sobre la superficie a examinar, dejarlo un tiempo sobre ésta 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 revelará la presencia de las discontinuidades, si las hay, sobre un fondo de contraste que intensifica la visibilidad de las indicaciones. La figura 9.1 ilustra el modo en que trabaja esta técnica.



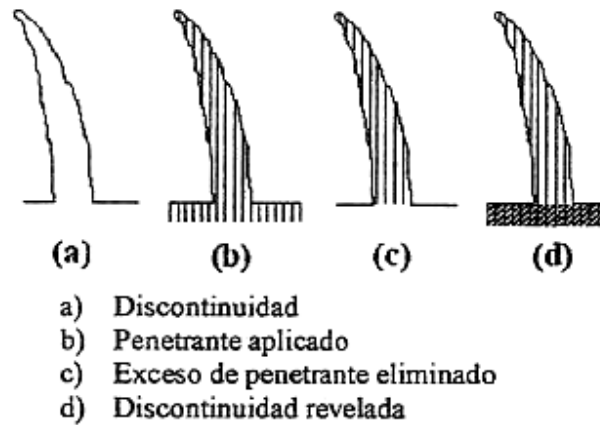


Fig. 9.1 Examen por líquidos Penetrantes.

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; puede 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 el método 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 desarrolló para aplicaciones y niveles de sensibilidad específicos. Por ejemplo, si se necesita detectar discontinuidades muy finas (de un medio milímetro o menos) lo recomendado es un líquido fluorescente post-emulsificable y revelador seco, pero si son lo relativamente gruesas, lo más conveniente es emplear un líquido 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 está basada en la propiedad que tienen 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 por 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 previa
- Aplicación del penetrante
- Eliminación del exceso de penetrante
- 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 deben 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 impedirá 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 contaminantes a remover, como pueden ser grasas, aceites, pinturas, herrumbre, escoria, escamas pesadas de óxidos 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

Ésta 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 del agente 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, éste 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 los establecen, pero para una aplicación específica, este tiempo debe determinarse de manera experimental, y debe estar documentado en los procedimientos de examen correspondientes. 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, misma que, para las técnicas estándar, no debe ser menor de 16°C e (60 °F) ni mayor de 52°C e (125° F).

Eliminación del exceso de 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.

Ésta 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 de 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 solvente se retiran de la superficie con un material absorbente, tela o papel, primero seco y después ligeramente humedecido 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 revelador

Tan pronto como sea posible después de la etapa anterior, una vez secas la superficies, sobre éstas 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 demasiado 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 sólo se deben 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 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 a partir del momento de la aplicación 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 éstas 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 no ferrosos y en no metales. Puede 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 doméstico hasta componentes críticos empleados en la industria aeronáutica.

En inspección de soldadura se usa 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 puede variar 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 constan 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 relativamente fácil de emplear
- Es barata, razonablemente 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 ya 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.



9.04 PARTÍCULAS MAGNÉTICAS

Este método no destructivo permite la detección de discontinuidades superficiales y subsuperficiales en materiales ferromagnéticos, por lo tanto, está 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 magnéticas y metalúrgicas 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 la técnica tienen que ver con el tipo y forma de aplicación 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 aplican partículas ferromagnéticas (medio de examen) a la superficie sometida a ensayo, si ésta contiene discontinuidades perpendiculares a las líneas del campo magnético, este se distorsiona formando polos que atraen a las partículas, mismas que delinean el contorno de las discontinuidades. La figura 9.2 este principio.

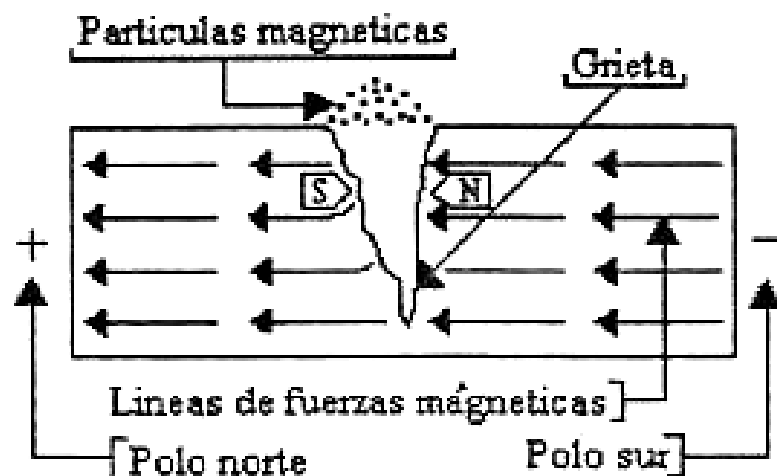


FIG. 9.2 INDICACIÓN PRODUCIDA DURANTE UN EXAMEN POR PARTÍCULAS MAGNÉTICAS



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 y amarillas o fluorescentes. La selección de las partículas adecuadas debe estar basada en el tipo de superficie a examinar y el contraste de éstas 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 secas son más apropiadas para revelar discontinuidades superficiales y subsuperficiales sobre partes con acabados rugosos, mientras que las partículas húmedas dan resultados más satisfactorios cuando se trata de detectar discontinuidades superficiales finas sobre partes 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, éstas 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 se ha cesado la corriente de magnetización. Este método depende del campo magnético remanente y sólo 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 la 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 9.3 A 9.6 muestran algunos tipos de magnetización

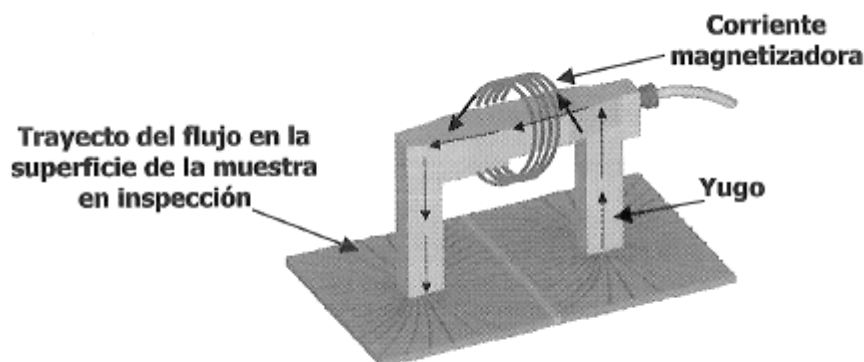


Fig.9.3 Magnetización local por medio de yugo



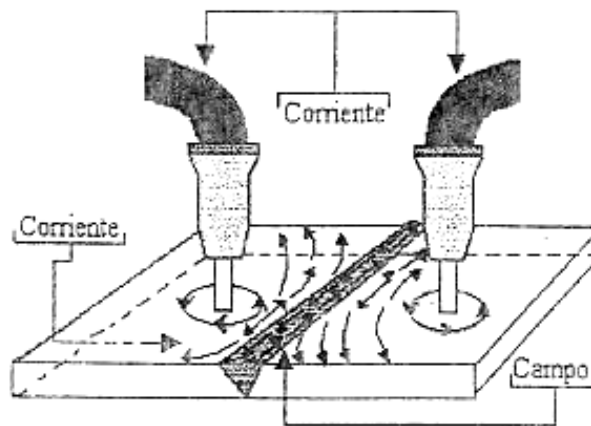


Figura – 94 Magnetización local producida con puntas

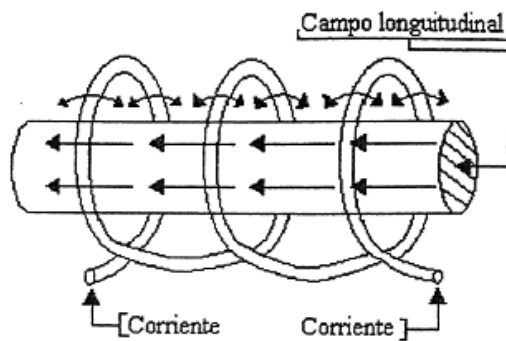


Figura -9.5 Magnetización longitudinal producida con bobina

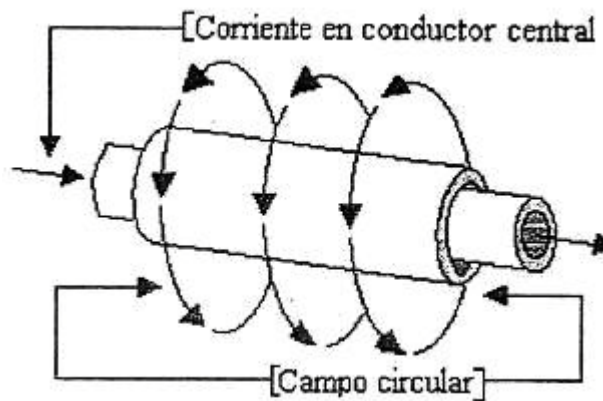


Figura – 9.6 Magnetización circular por medio de conductor central



Las corrientes usadas para magnetizar las piezas pueden ser alterna o directa, 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 faltas 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 generadores o baterías de corriente directa uniforme, mientras que la corriente monofásica rectificadora de media onda ofrece la máxima sensibilidad, dado que el campo pulsante aumenta la movilidad de las partículas, lo que permite que éstas puedan 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, sólo 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 determinadas de manera experimental. A continuación se recomiendan los intervalos de corriente aproximados para varios métodos de magnetización:

- Longitudinal: de 3,000 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 90 a 125 amperios por pulgada de separación entre las puntas, dependiendo del espesor de la pieza
- Por yugo: La intensidad de corriente debe ser suficiente para levantar un peso de 4.5 Kg. (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 la realización de una 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 de materiales que presentan magnetismo residual se desmagneticen una vez terminada la inspección. La desmagnetización puede realizarse 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 (cojinetes y dientes de engranes), evitar soplos de



arco en 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 de cada aplicación, y en algunas situaciones puede bastar con un 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 corriente 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 sólo 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 sólo para detectar discontinuidades perpendiculares al campo magnético
- No proporciona .registro permanente de los resultados de examen
- Los recubrimientos relativamente gruesos pueden enmascarar defectos

9.05 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 o 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 fotografía, con la diferencia principal que en radiografía se emplean rayos x o rayos gamma, cuya naturaleza es similar a la luz visible pero poseen menor longitud de onda y mayor energía y 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 fuentes radioactivas naturales o por isótopos radioactivos artificiales producidos para los 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 gamma, absorben parte de ella y dispersan otra; la radiación que se transmite a través de los cuerpos sirve para registrar la imagen en el medio apropiado. Las cantidades de radiación absorbida y transmitida dependen del espesor del material y de su densidad, así , como de las características de la radiación misma, por lo que si existen discontinuidades en las partes radiografiadas, al ser de diferente densidad que la del material, las zonas con



discontinuidades absorben y transmiten mayor o menor cantidad de radiación, y las variaciones en la radiación transmitida producen áreas de contraste óptico sobre los medios 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 el 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 (exposición) de manera satisfactoria y segura
- Los recursos para procesar la película expuesta o de operar otros medios 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 el isótopo radioactivo más adecuado 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 12.7 mm (1/2") debieran emplearse rayos x (con límites máximos de voltaje para diferentes espesores). Para espesores de 12.7 a 64 mm (de 0.5 a 2.5 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 exposición y procesamiento de las películas 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 exposición correcta depende de una serie de factores como la posición de la fuente y la película con respecto del objeto de prueba, el tiempo de exposición, el tipo 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 la figura 9.7. Cada arreglo resulta apropiado para condiciones y aplicaciones específicas, y el personal encargado de realizar la toma debe elegir el arreglo más adecuado en cada situación.

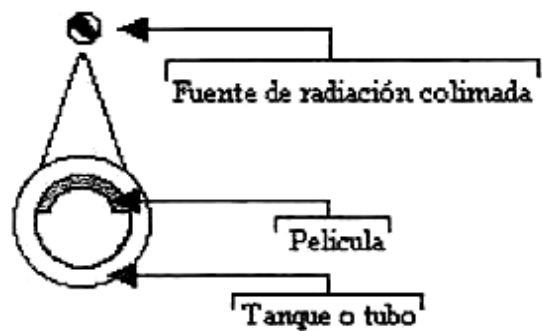
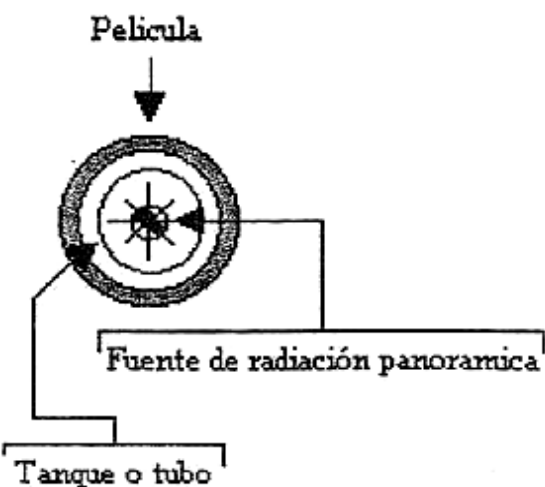
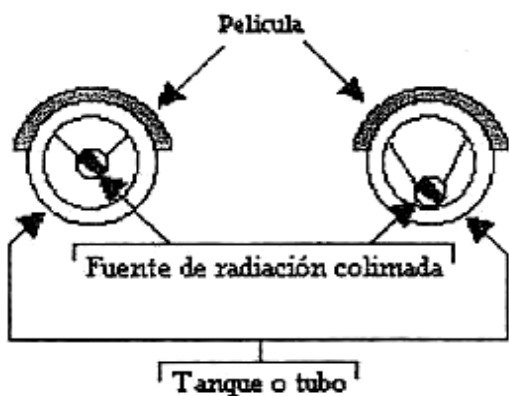


Figura 9.7 Arreglos de exposición radiográfica típicos.



Por otra parte, están los riesgos inherentes al uso y manejo de las fuentes de radiación, por lo que durante las tomas deben seguirse prácticas y procedimientos seguros a fin de evitar que los individuos que toman las 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 exposición 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 válido que tal tarea debe ser realizada por personal debidamente calificado para "leerlas" y evaluarlas. Durante esta actividad se determina la calidad de la exposición, el tipo y número de discontinuidades reveladas y si éstas son toleradas o no por los criterios de aceptación especificados.

Calidad de la imagen radiográfica

Las imágenes radiográficas deben proveer información útil del interior de las partes examinadas a fin de determinar si éstas contienen defectos , y la utilidad de la información está 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 lo 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 últimas 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 que se empleó la técnica adecuada para controlar las variables que afectan a la calidad de las radiografías es el indicador de calidad de imagen (ICI) o penetrámetro.

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 a aquéllas de las partes a 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 9.8.

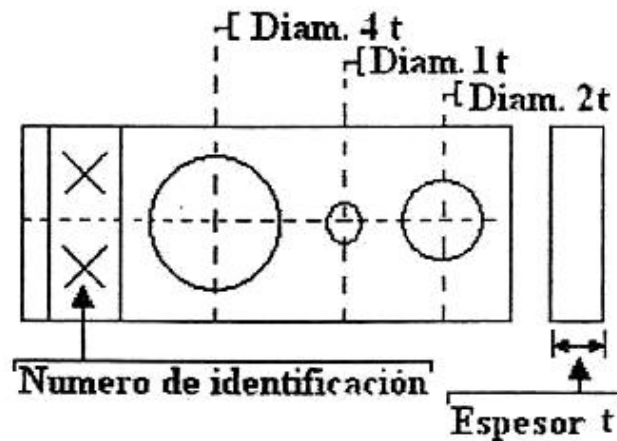


Figura – 9.8 Diseño típico de un indicador de calidad de imagen ASTM

Al radiografiar juntas soldadas, se seleccionan 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 penetrámetro y el tamaño de 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, y 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 1 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 pueda ser detectado, ya que los barrenos de los penetrámetros tienen límites definidos y cambios abruptos en sus dimensiones, mientras que las discontinuidades por 10 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 es 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:

$$D = \log_{10} I_i / I_e$$

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 requisitos que la densidad transmitida por la película a través de la imagen radiográfica del indicador de calidad de imagen y el 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 de más de 30% entre el área de interés de la película y el penetrámento.

Aplicaciones

La radiografía industrial en la fabricación de partes y estructuras metálicas se emplea principalmente para 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

El 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, en cierta medida grietas y fusión incompletas) pueden no ser detectadas, o detectadas con confiabilidad marginal si no están alineadas con el haz de radiación; no es un método que deba aplicarse para detectar laminaciones o traslapes, 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 manejo de las fuentes requiere de instalaciones, cuidados y entrenamiento rigurosos.



- Requiere de personal altamente entrenado, capacitado y con experiencia
- No indica la profundidad a 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 poco confiables
- La operación del equipo representa riesgos de salud si no se observan las normas de seguridad pertinentes.

9.06 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 material es casi constante, por lo que pueden medirse las distancias recorridas; la amplitud de los pulsos de sonido 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 inspección oscilan entre 0.25 y 25 Mega Hertz, 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 por medio de materiales transductores como el cuarzo o el titanato de bario, que transforman la energía eléctrica en energía mecánica y viceversa (efecto piezoeléctrico).



Un transductor es un cristal polarizado que aumenta sus dimensiones cuando se le aplica un pulso eléctrico, y cuando se le deja de aplicar, el cristal recupera sus dimensiones originales. Cuando el transductor es conectado a un generador de pulsos de alta frecuencia, las dimensiones del 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 vibraciones 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 le denomina paplador. Hay tres modos 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**. Éstas 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 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 la 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 atenúa 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 en la entre-cara de materiales de diferente densidad
- Su comportamiento difiere de aquél de la luz en que en el mismo medio pueden ocurrir diferentes modos de vibración y velocidades.

Debido a que el ultrasonido se atenúa severamente en el aire y éste 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 sino que será 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 éste hasta que encuentre un obstáculo, que puede ser la superficie de la pared posterior de la pieza en 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 debido a la atenuación. Si existe una discontinuidad en la pieza, habrá una reflexión intermedia, misma que se detecta como otro pico entre los ecos principal y de fondo. La anchura y amplitud de este pico depende del tamaño y orientación de la discontinuidad (una superficie de reflexión).

La figura 9.9 de manera sencilla el método anteriormente descrito.

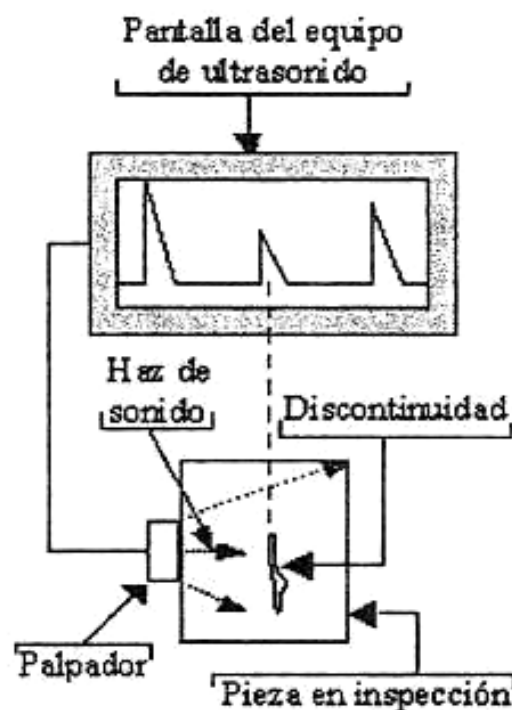


FIGURA - 9.9 DETECCIÓN DE UNA DISCONTINUIDAD CON EL MÉTODO PULSO-ECO



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 viajará preferentemente de forma longitudinal; si tiene cierta inclinación (entre el primero y segundo ángulos críticos de la ley de Snell), viajará predominantemente de forma transversal; y si 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 9.10 ilustra un palpador de haz recto, y la figura 9.11 uno de haz angular.

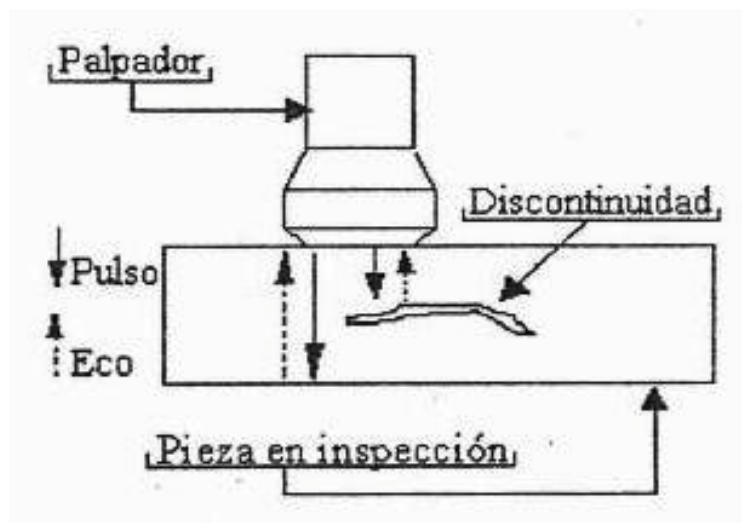


FIGURA 9.10 INSPECCIÓN CON
PALPADOR DE HAZ RECTO



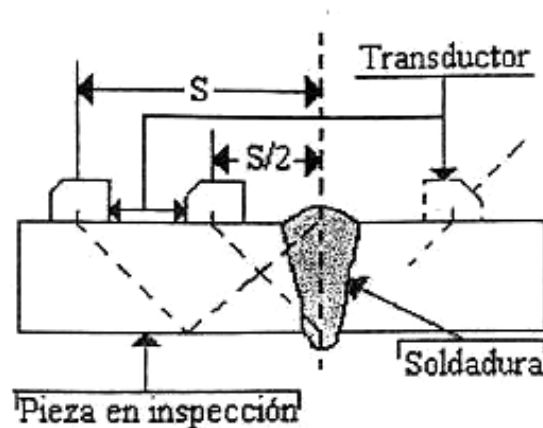


FIGURA 9.11 INSPECCIÓN CON PALPADOR DE HAZ ANGULAR

Calibración

Debido a que los exámenes por medio de ultrasonido básicamente son evaluaciones comparativas, es necesario calibrar de manera cuidadosa los equipos antes de cada uso. Existen varios bloques estándar de calibración, y estos deben ser de un material similar, desde el punto de vista acústico, al material a probar.

Para el examen de soldaduras se emplea ampliamente el bloque de calibración del Instituto Internacional de Soldadura (IIW).

Aplicaciones

Con este método pueden inspeccionarse productos de materiales ferrosos y no ferrosos de formas diversas y fabricados mediante varios procesos, y de espesores o dimensiones que varían desde 1 mm hasta varios metros. Se emplea para examinar productos nuevos y en servicio y también para medición de espesores y detección de zonas corroídas. También se emplea en la inspección de materiales compuestos.

En las aplicaciones de soldadura se usa para detectar grietas, inclusiones de escoria, porosidades, fusión incompleta, penetración incompleta en la junta, laminaciones y desgarres laminares.



Equipo

En el mercado existe una gran variedad de equipos y accesorios disponibles, útiles para aplicaciones específicas.

La selección del equipo adecuado para las necesidades del usuario debe hacerse cuidadosamente tomando en cuenta factores como la forma, tamaño y cantidad de partes a inspeccionar, el tipo de discontinuidades que se necesitan detectar y los criterios de aceptación aplicables, así como el servicio de mantenimiento y calibración que ofrecen los proveedores, y la disponibilidad de refacciones. Además del equipo principal, también deben considerarse los bloques de calibración, los palpadores y los cables coaxiales adecuados.

Ventajas

Las principales ventajas asociadas a este método son las siguientes:

- Gran sensibilidad para las discontinuidades aplanadas
- Pueden detectarse discontinuidades internas y superficiales
- Solo se necesita tener acceso por un lado del material a inspeccionar
- Tiene alta capacidad de penetración
- Los resultados de prueba son conocidos inmediatamente
- Pueden determinarse el tamaño, localización y orientación de las discontinuidades
- El equipo es portátil (también hay equipos automáticos fijos)
- La mayor parte de los equipos no requieren de alimentación eléctrica de la red durante su operación

Limitaciones

La aplicación de este método está limitada por la geometría y la estructura interna de los materiales a inspeccionar.

Otras limitaciones o desventajas son las siguientes:

- Las soldaduras pequeñas y los materiales delgados son difíciles de examinar
- El acabado de las superficies debe ser apropiado para acoplar los palpadores
- Requiere de materiales acoplantes



- La calificación del personal requiere de mayor entrenamiento y experiencia que en los otros métodos no destructivos
- Son necesarios patrones de referencia
- La correcta interpretación de las indicaciones requiere de experiencia y entrenamiento relativamente extensos
- Es difícil la detección de discontinuidades que no son perpendiculares al haz ultrasónico
- El costo del equipo es relativamente alto

Las aplicaciones y limitaciones de los métodos anteriores en la detección de las discontinuidades más frecuentes en las juntas soldadas se resumen en la tabla 9.1 en la que también se indica qué métodos son completamente aplicables en diferentes juntas soldadas, y cuáles son las juntas en las que son más efectivos los métodos de examen considerados

9.07 REQUISITOS DE CALIFICACIÓN PARA EL PERSONAL DE END

Las sociedades técnicas y las normas nacionales e internacionales reconocen unánimemente que la efectividad de la aplicación de los exámenes no destructivos depende de las habilidades del personal que los realiza y de quienes son responsables de su ejecución. De hecho, la anterior es la primera declaración de las normas sobre la calificación y certificación del personal de pruebas no destructivas.

Algunas de las normas más empleadas sobre esta materia son las siguientes:

- Práctica Recomendada No. SNT-TCIA, "Calificación y Certificación del Personal de Ensayos no Destructivos". Ésta es emitida por la Sociedad Americana de Ensayos no Destructivos (The American Society for Nondestructive Testing, Inc. - ASNT) y la edición actual es la de 2001.
- "Norma ANSI/ASNT CP-189 para la Calificación y Certificación de personal de Ensayos no Destructivos". La edición de esta norma vigente a la fecha es la de 1995. Esta norma tiene requisitos más rigurosos que la anterior.



- Norma Internacional ISO 9712:1999 :E, "Pruebas no destructivas – Calificación y certificación de persona

En términos generales, estas normas establecen los requisitos mínimos de escolaridad, entrenamiento, experiencia y exámenes con que deben cumplir los individuos para que puedan ser calificados y certificados como inspectores en cada uno de los niveles de competencia establecidos para los diferentes métodos de examen no destructivo. También establecen las definiciones pertinentes, los esquemas de entrenamiento, calificación y certificación, los programas de entrenamiento y las responsabilidades asociadas con cada uno de los aspectos considerados.

Los niveles básicos de calificación o competencia establecidos en las normas antes citadas son los siguientes:

Nivel I. Un individuo de nivel 1 en END es aquel que es capaz de llevar a cabo adecuadamente calibraciones específicas de equipo, pruebas no destructivas y evaluaciones de aceptación o rechazo específicas de acuerdo con instrucciones escritas, así como registrar los resultados. Un individuo de nivel 1 debe recibir las instrucciones Y supervisión de individuos certificados a niveles II o III.

Nivel II. Un individuo de nivel II en END está calificado 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 está 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 de 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 está calificado, y debe ser capaz de interpretar y evaluar los resultados en términos de las normas existentes. El individuo de nivel ID 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 ASNT-TC-1A, establece que el personal de tal nivel debiera 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 del personal en entrenamiento (trainee), que es considerado como aquel individuo que está en proceso de ser entrenado, calificado y certificado por primera vez.

Las consideraciones anteriores son sólo 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



Discontinuidad o tipo de junta	Aplicabilidad de varios métodos de END		
	Aplicables	Aplicables marginalmente *	No aplicables
Porosidad	Radiografía Líquidos penetrantes (1) Inspección visual (1)	Ultrasonido Partículas magnéticas (2) Electromagnetismo	
Inclusiones de escoria o tungsteno	Radiografía Ultrasonido	Partículas magnéticas (2) Electromagnetismo	Inspección visual Líquidos penetrantes
Fusión incompleta	Ultrasonido	Radiografía Partículas magnéticas (2) Electromagnetismo	Inspección visual Líquidos penetrantes
Penetración incompleta en la junta	Radiografía Ultrasonido	Partículas magnéticas Electromagnetismo	Inspección visual Líquidos penetrantes
Socavado	Radiografía Inspección visual	Ultrasonido Líquidos penetrantes Partículas magnéticas Electromagnetismo	
Taslape (cordón traslapado)	Líquidos penetrantes Partículas magnéticas	Ultrasonido Inspección visual Electromagnetismo	Radiografía
Grietas	Ultrasonido Líquidos penetrantes (1) Partículas magnéticas (2) Inspección visual (1) Electromagnetismo	Radiografía	
Desgarre laminar	Ultrasonido	Líquidos penetrantes (1, 3) Partículas magnéticas (1, 3) Inspección visual (1, 3)	Radiografía Electromagnetismo
Laminaciones	Ultrasonido Líquidos penetrantes (1, 3) Partículas magnéticas (2, 3) Inspección visual (1, 3)		Radiografía Electromagnetismo
Junta a tope	Radiografía Ultrasonido Líquidos penetrantes Partículas magnéticas Inspección visual Electromagnetismo		
Junta en esquina	Ultrasonido Líquidos penetrantes Partículas magnéticas Inspección visual	Radiografía Electromagnetismo	
Junta en "T"	Ultrasonido Líquidos penetrantes Partículas magnéticas Inspección visual	Radiografía Electromagnetismo	
Junta en traslape	Líquidos penetrantes Partículas magnéticas Inspección visual	Radiografía Ultrasonido Electromagnetismo	

* 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 9.1 - MÉTODOS DE END APLICABLES EN LA DETECCIÓN DE ALGUNAS DISCONTINUIDADES Y EN CUATRO TIPOS DE JUNTAS SOLDADAS



9.08 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 TEMA 5 (página 119).

A fin de complementar la información sobre estos asuntos, conviene añadir otros requisitos asociados con la realización de los END, los cuales pueden ser ilustrados por medio de algunas referencias al Código ASME para Calderas y Recipientes a Presión.

La Sección VIII, División 1, en su párrafo UW-5I, "Examen Radiográfico y Radioscópico 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 la Sección V, esta contiene los requisitos y métodos de exámenes no destructivos a aplicarse durante en la fabricación de los recipientes y calderas cubiertas por el Código.

Consta de dos 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 hecha 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 de 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 AS1M, 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".



TEMA 10

INSPECCIÓN DE SOLDADURA

Introducción

Las 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 citó, 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 específicos, o los de algún otro documento. La insistencia en citarla otra vez obedece al hecho de 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 especifica(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 realice en un cien por ciento de la producción, y en otros, que ésta se lleve a cabo por medio de muestreo, es decir, a través de



la inspección y pruebas de muestras representativas de la producción, y por medio de éstas, llegar a conclusiones válidas sobre la calidad 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.

10.01 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. Esto se debe a que una vez que han sido soldados los productos, es difícil evaluar su calidad total, o. tomar las acciones correctivas y preventivas que permitan asegurar el cumplimiento completo de los requisitos especificados: Si la inspección no se llevó 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 personal con la habilidad requerida, o si se emplearon los metales base especificados.

En general, la inspección debe de realizarse en tres etapas de producción o construcción bien definidas: antes de la soldadura y durante y después de ésta.



Las actividades que deben llevarse a cabo en cada una de estas etapas se indica a continuación, aunque debe tomarse en cuenta que ésta es un guía, y en cada caso específico pudiera no ser aplicable una o más de tales actividades.

Inspección antes de la soldadura

Las actividades a realizar en esta etapa son las siguientes:

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 materiales base cumplen con la especificación aplicable, están identificados, no presentan defectos y que son almacenados y manejados de manera que se asegure que no se deterioren
- Asegurar que los materiales de soldadura (electrodos, metales de aporte, gases y fundentes) especificados están disponibles y que existen las previsiones 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 el procedimiento de soldadura. Los principales aspectos a revisar son: ángulo de ranura, abertura de raíz, cara de ranura, alineación de la junta, respaldos, insertos consumibles limpieza, puntos (tack welds) de soldadura y las superficies y bordes de corte con oxígeno de las partes preparadas de metal base
- 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 y 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 éstas
- En aplicaciones en las que es un requisito el control del calor aportado por paso, asegurarse de que este control es efectivo
- Asegurar que los soldadores estén calificados para las operaciones, procedimientos y variables de soldadura específicos en cada junta
- 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 ranura soldadas por los dos lados, asegurar que antes de que se suelde el segundo lado, se prepara adecuadamente la raíz de la junta
- Verificar que la limpieza inicial, entre pasos y final es la adecuada
- Comprobar que la secuencia de pasos de soldadura es la correcta
- 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

Durante esta etapa el inspector debe:

- Examinar la apariencia [mal de las soldaduras
- Medir el tamaño final de las soldaduras
- Determinar la longitud de las soldaduras
- Al efectuar las actividades indicadas en este inciso y los dos anteriores, se deben detectar e identificar las discontinuidades presentes en las uniones soldadas, así como evaluarlas y decidir, de acuerdo con los criterios aplicables, su aceptación o rechazo.



- Verificar la precisión dimensional de las piezas soldadas completas, ya que aunque las uniones soldadas no presenten defectos, si las piezas están fuera de las tolerancias dimensionales especificadas, no son útiles para el servicio para el que fueron diseñadas y deben rechazarse
- 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 (relevado de esfuerzos la mayor parte de las veces) especificado
- Verificar que la limpieza previa a las pruebas no destructivas y la limpieza final es la adecuada
- Asegurar que se llevan a cabo las pruebas (destructivas, no destructivas, hidrostáticas, etc.) especificadas, y que 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

10.02 DISCONTINUIDADES DE LAS JUNTAS SOLDADAS

Éstas 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 la zona afectada térmicamente, y no en el sentido de los cambios de la estructura metalográfica con 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 tienen 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 de metales de aporte o fundentes contaminados.

Las causas principales de la porosidad son la suciedad, el herrumbe y la humedad en la superficie del metal base, contaminación en los electrodos y en los gases de protección o en el equipo de soldadura (por ejemplo en los rodillos o en el alimentador de alambre o en los dispositivos de sujeción de las bobinas del electrodo).

La porosidad puede evitarse mediante el uso de materiales limpios y equipo de soldadura en buen estado, evitando soplos de arco eléctrico y velocidades, corrientes y longitudes de arco eléctrico inadecuado.

Porosidad distribuida uniformemente (uniformly scattered porosity)

Porosidad esparcida de manera uniforme en el metal de soldadura; también se le llama porosidad distribuida al azar. Ver figura 10.1

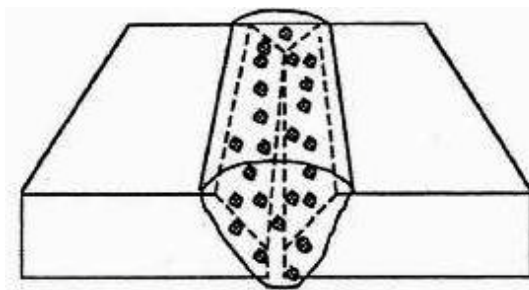


Figura 10.1 - Porosidad distribuida uniformemente

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 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 metal de soldadura sano ver figura 10.2.

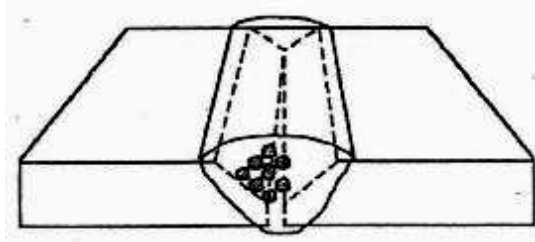


Figura 10.2 - Porosidad agrupada

Causa probables: Iniciación o terminación inadecuada del paso de 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 10.3

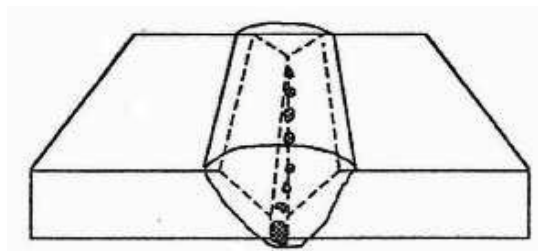


Figura 10.3 - Porosidad lineal

Causas probables: Contaminación que reacciona químicamente y genera gases en las zonas contaminadas, soplo de arco



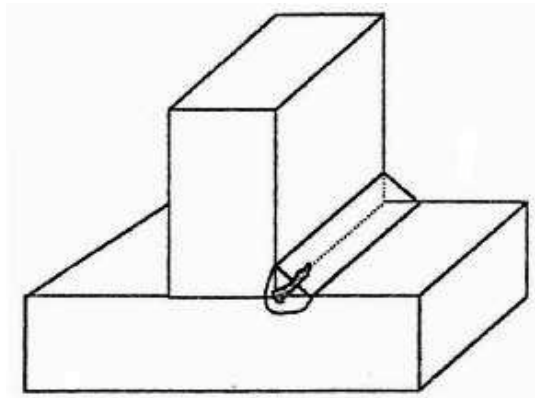
Porosidad tubular o cilíndrica (piping porosity)

Figura 10.4 - Porosidad tubular o cilíndrica

Es una cavidad alargada que se extiende de la raíz de la soldadura hacia la superficie. Ocurre principalmente en soldaduras de filete pero también en soldaduras de ranura. Generalmente los poros superficiales están asociados con porosidad debajo de la superficie. Figura 10.4

Causas: Contaminación superficial

Inclusiones de escoria (slag inclusion)

Materiales sólidos no-metálicos que quedan atrapados en el metal de soldadura o entre el metal de soldadura y el metal base. Una vez que se forma la escoria (a partir del fundente y las reacciones de éste 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 10.5



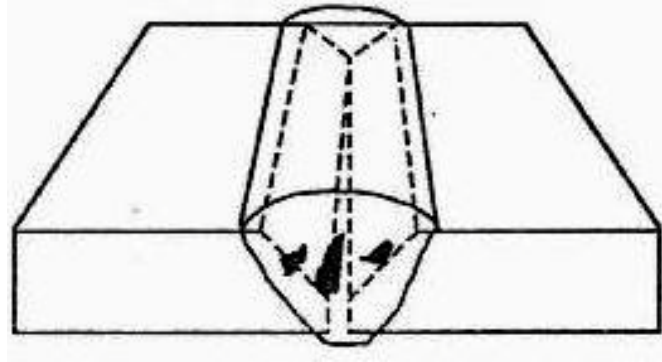


Figura 10.5 - Inclusión de escoria

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 10.6

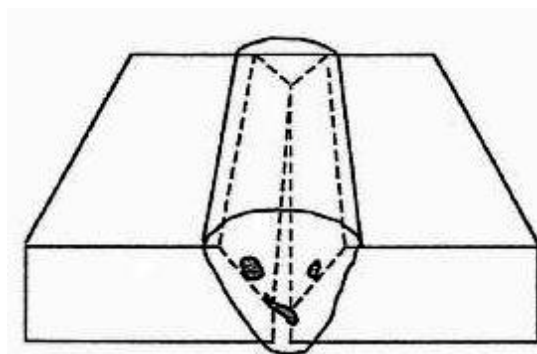


Figura 10.6 - Inclusión de tungsteno



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, emplear 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 10.7

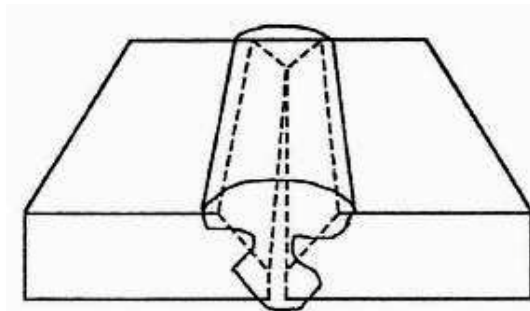


Figura 10.7 - Fusión incompleta

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 doblez, 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 doblez, 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. Ver figura 10.8

Nota: Las consideraciones anteriores son aplicables a las situaciones en las que se especifica 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 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, éste 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.

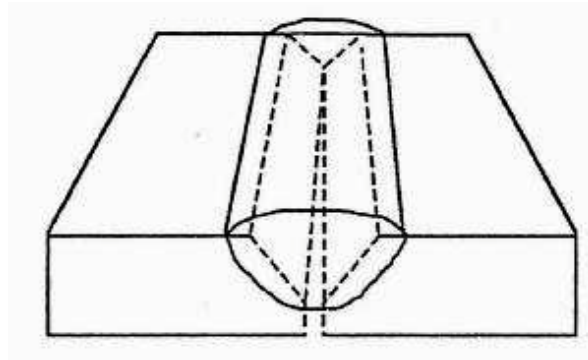


Figura 10.8 - Penetración incompleta en la junta

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 cara 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 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 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 sólo lado pueden emplearse soleras o anillos de 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 a 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. Ver figura 10.9

Todas las soldaduras tienen alguna forma de socavado, pero cuando éste 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.

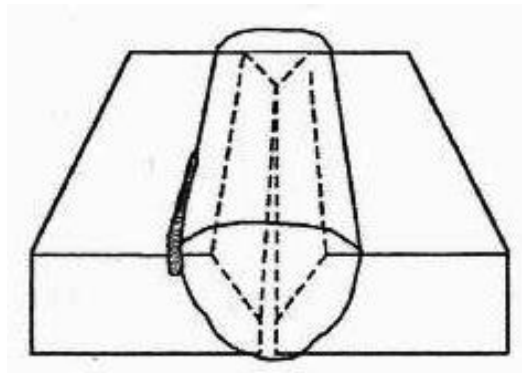


FIGURA 10.9 - SOCAVADO

Causas probables: Corriente excesiva de soldadura y longitud de arco (voltaje) muy alto, técnica 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 10.10

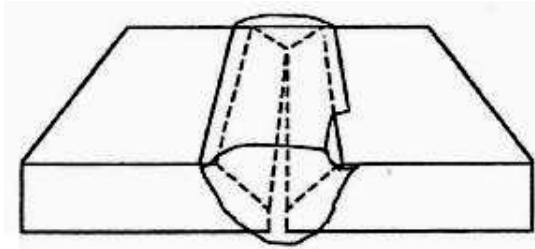


Figura 10.10 - Llenado incompleto

Causas probables: Falla del soldador para llenar 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 10.11

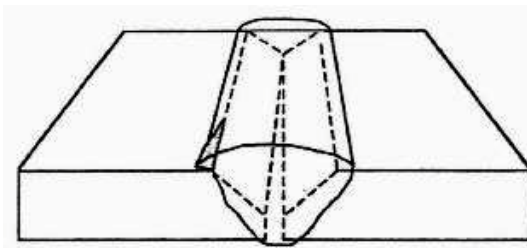


Figura 10.11 - Cordón traslapado

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 10.12

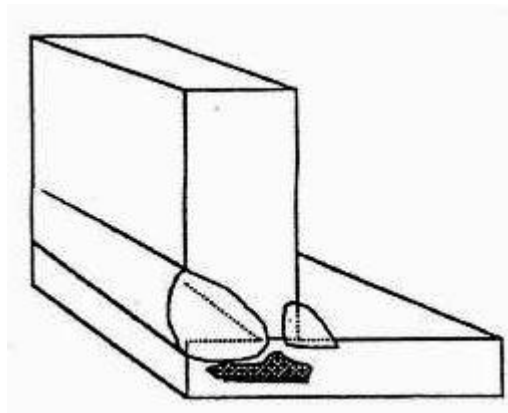


FIGURA 10.12 - DESGARRE LAMINAR

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 grueso 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 cerca de muescas mecánicas relacionadas con el diseño del ensamble soldado. Algunos de los factores que favorecen su aparición son los esfuerzos residuales altos 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 metales de soldadura y base tienen alta ductilidad bajo esfuerzos uniaxiales, no la tienen cuando son sometidas a esfuerzos biaxiales o triaxiales, y la contracción causada por las operaciones de soldadura 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 microestructuras susceptibles 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 a su punto de fusión y se propagan entre los granos (intergranularmente), 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 propagara 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 templeado 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 10.13

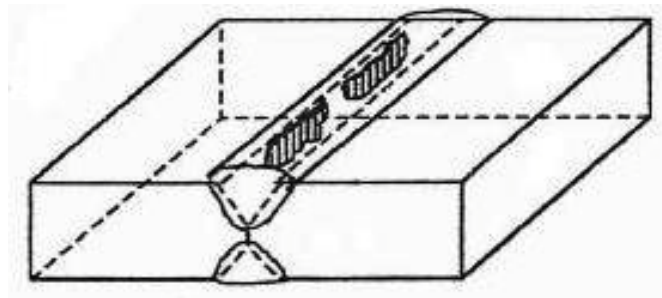


FIGURA 10.13 - GRIETAS LONGITUDINALES



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 estar localizadas 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 10.14

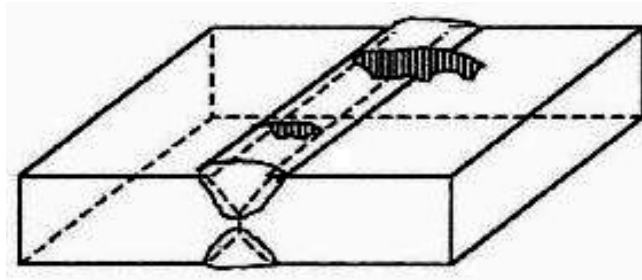


Figura 10.14 - Grietas transversales

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 10.15



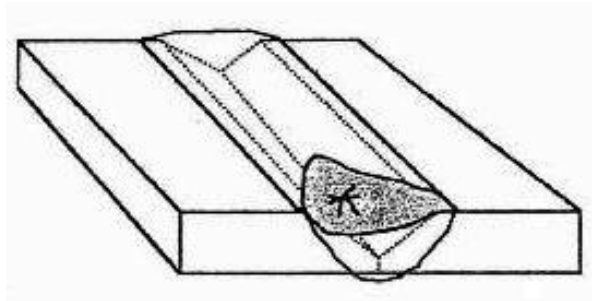


FIGURA 10.15 - GRIETAS EN EL CRÁTER

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 inoxidable 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 fría. Figura 10.16



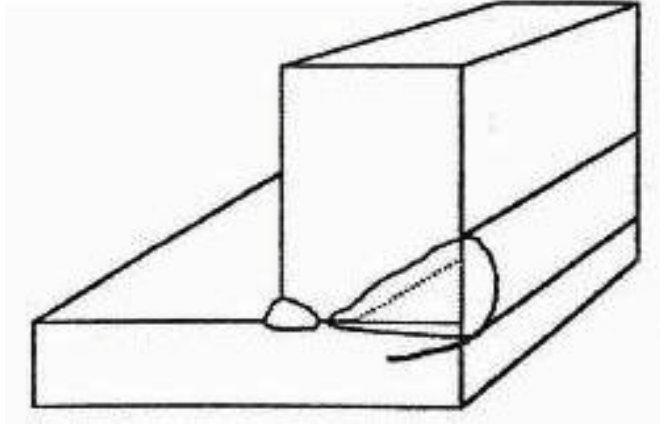


Figura 10.16 - Grietas en el pie de la soldadura

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 10.17

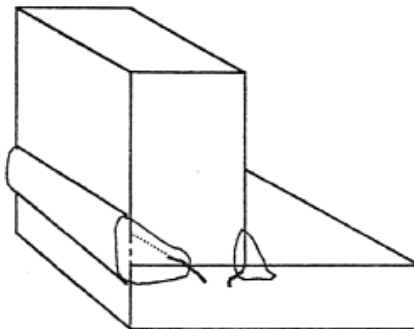


Figura 10.17 - Grietas en la raíz



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, delineando 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 tienen una ductilidad relativamente baja y 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 seccione). Figura 10.18

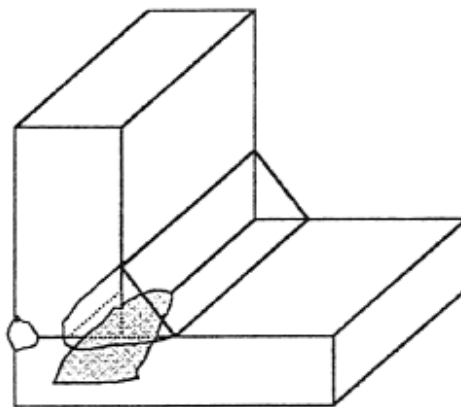


FIGURA 10.18 - GRIETAS BAJO EL CORDÓN



Diferentes fuentes y autores describen otras discontinuidades pertenecientes a este grupo Q. 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 otras fuentes, pueden mencionarse las concavidades en la raíz, la penetración excesiva, las "quemadas" (hum through), las huellas de carreta (wagon tracks) y la penetración incompleta asociada con la falta de alineación (hi-low) de los miembros del metal base.

En la Tabla 10.1 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 por arco sumergido	X	X	X	X	X	X	X
GTAW- Soldadura por arco de tungsteno protegido con gas	X		X	X			X
GMAW- Soldadura por arco metálico protegido con gas	X	X	X	X	X	X	X
FCAW- Soldadura de arco con electrodo tubular	X	X	X	X	X	X	X
SMAW- Soldadura por arco con electrodo protegido	X	X	X	X	X	X	X
CAW- Soldadura de arco con electrodo al carbón.	X	X	X	X	X	X	X
Por resistencia							
RSW- Soldadura de resistencia por puntos			X				X
RSEW- Soldadura de resistencia por costura			X				X
PW- Soldadura por proyección.			X				X
FW- Soldadura por chispa			X				X
UW- Soldadura por recalcado			X				X
Con gas combustible y oxígeno							
OAW- Soldadura con oxiacetileno	X		X	X	X	X	X
OHW- Soldadura con oxihidrógeno	X		X	X			X
PGW- Soldadura por gas a presión	X		X				X
En estado sólido							
CW- Soldadura en frío			X				X
DFW- Soldadura por difusión			X				X
EXW- Soldadura por explosión			X				
FOW- Soldadura por forjado			X				
FRW - Soldadura por fricción			X				
USW - Soldadura por ultrasonido			X				
Otros							
EBW- Soldadura por haz de electrones	X		X	X			X
ESW- Soldadura por electroescoria	X	X	X	X	X	X	X
IW -Soldadura por inducción			X				X
LBW- Soldadura por haz láser	X		X				X
PEW- Soldadura por percusión			X				
TW- Soldadura por termita o aluminotérmica	X	X	X				X

TABLA 10.1 DISCONTINUIDADES COMÚNMENTE ENCRONTADAS EN LAS SOLDADURAS DEPOSITADAS CON DIFERENTES PROCESOS



10.03 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 [mal. 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 éstas se han enfriado y causan algún grado de distorsión, que puede llegar a ser tan severa como para exceder 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 las secuencias de soldadura apropiadas, usar los diseños de junta más convenientes y los dispositivos de sujeción que permitan fijar rígidamente las partes a soldar. El trabajo mecánico por medio de pequeños impactos (peening) 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 adición de metal de soldadura en áreas específicas
- 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 establecen diseños de 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 las 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 mayor al especificado), se consideran defectuosas y deben ser detectadas y corregidas. Su detección se realiza por medio de inspección visual y con calibradores para soldadura, y es una de las funciones del inspector realizar tal detección. En el Tema 3, que trata sobre el significado de los términos, se establecen las definiciones de tamaño de 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 constituyen defectos de soldadura, mismos que deben ser identificados, rechazados y reportados por el inspector 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.

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 de que inicie la fabricación, por el diseñador, el inspector y el fabricante.



10.04 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 de metal de soldadura permanente.

Consisten en pequeñas áreas localizadas de metal refundido 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 indeseables 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 definición, las salpicaduras son partículas lanzadas lejos de los metales base y de soldadura pero algunas de éstas realmente se adhieren al metal base contiguo. 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 utilidad 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 microestructura 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

10.05 DISCONTINUIDADES DEL METAL BASE

Por su parte, las placas, los tubos, las piezas forjadas y fundidas y 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 las contienen, si estos no cumplen los criterios especificados.

Algunas discontinuidades que presentan los metales base, tales como 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 más 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, laminas y perfiles.

Las laminaciones se forman como resultado de porosidades, cavidades de contracción o inclusiones no metálicas en el lingote original a partir del cual se fabricó el producto laminado; el proceso de laminado provoca que tales discontinuidades se unan, 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 sólo pueden detectarse con inspección ultrasónica; también pueden extenderse a los extremos y bordes y resultar 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 través de la dirección del espesor, por lo que el tamaño y frecuencia de las laminaciones están restringidas 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 afloran 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 10.19



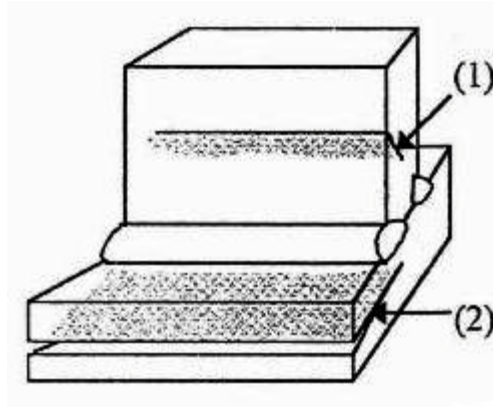


Fig.10.19- Costura o pliegue (1) y laminación (2) en metales base

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.

10.06 USO DE CALIBRADORES DE SOLDADURA

A continuación se ilustra el modo en que se deben emplear dos de los instrumentos más populares para la evaluación de tamaños y discontinuidades de soldadura.

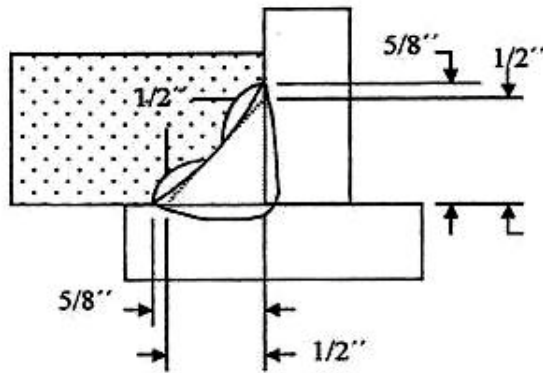
Calibrador de soldaduras de filete

Las soldaduras de filete pueden tener perfiles cóncavos, convexos o planos, y al determinar el tamaño de 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 inscrito dentro de la sección transversal de la soldadura; para soldaduras de filete de piernas desiguales, el tamaño corresponde a las longitudes de las piernas o catetos del mayor triángulo rectángulo que puede inscribirse en su sección transversal.

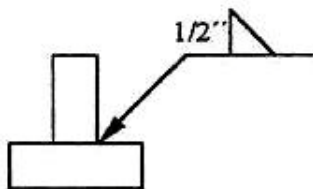
De acuerdo con lo anterior, al medir las soldaduras de filete, el inspector debe determinar la longitud de los catetos de los triángulos rectángulos que pueden inscribirse en sus secciones transversales.



Estas mediciones se realizan de manera práctica con calibradores de soldadura de filete, que son de dos tipos, uno para medir filetes cóncavos y otro para medir filetes convexos y planos. Las siguientes figuras 10.20 a 10.23 el uso de cada tipo



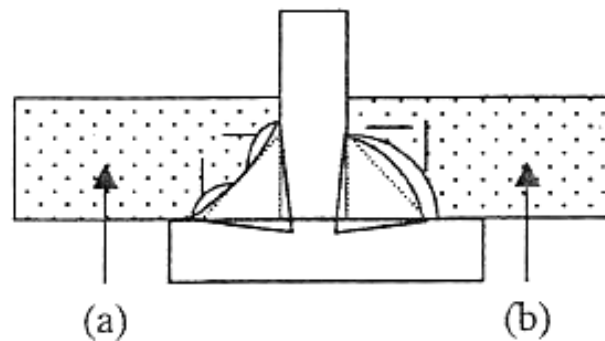
Nota 1: Este es el tipo de calibrador que debe usarse para filetes cóncavos. Es incorrecto medir un filete cóncavo con calibrador para filetes convexos



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 10.20- Calibradores de soldaduras de filete



- (a) Calibrador de filetes cóncavos
- (b) Calibrador de filetes convexos y planos

Figura 10.21 - Medición de una soldadura de filete cóncava



Nota 1: 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.

Nota 2: Para soldaduras de filete de piernas iguales (por especificación), deben medirse las dos piernas del filete; el tamaño real es el del cateto menor.

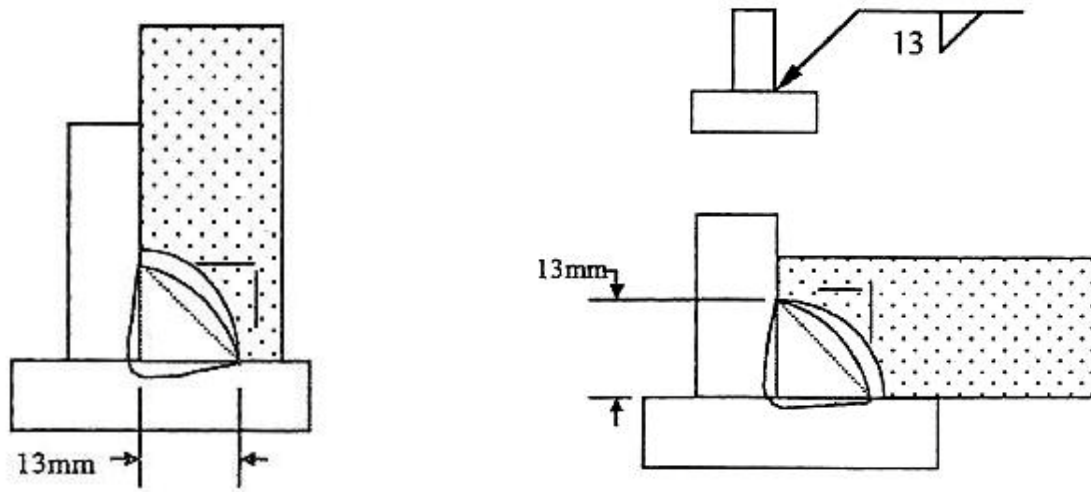


Figura 10.23 - Medición de una soldadura de filete convexa

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 10.24 a 10.26

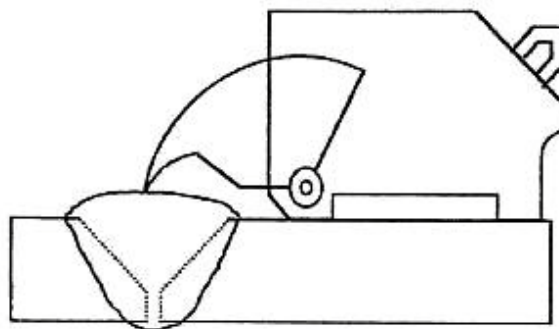


Figura 10.24 - Determinación de la altura del refuerzo de soldadura



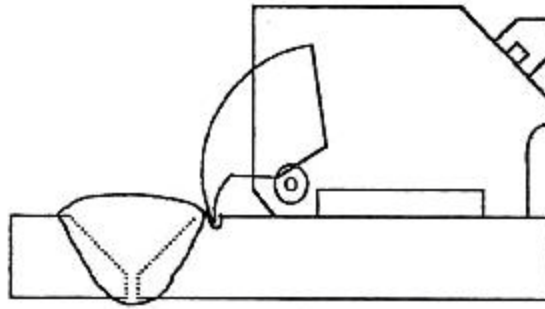


Figura 10.25 - Medición de la profundidad de un socavado

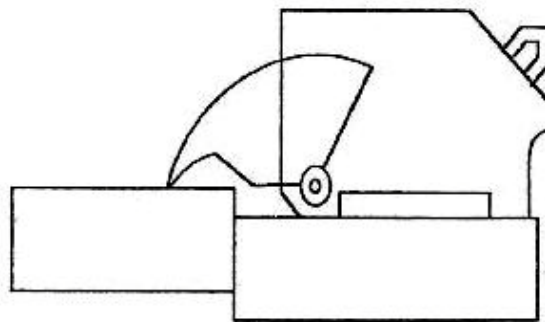


Figura 10.26 - Evaluación del alineamiento en una junta a tope antes de ser soldada

10.07 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 una "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 10.2 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 *ANSIIAWS D1.1 Y la Sección VIII División 1 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" (3.96 mm).

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 ANSI/AWS D1.1 establece como rechazables los refuerzos de soldadura mayores de 118" (3.2 mm), y para algunas condiciones de carga y tipo de conexión soldada, no acepta socavados de profundidad mayor de 0.010" (0.25 mm).

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 refuerzo excesivo) 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 se 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 tubería 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 BPV, Sec.VIII, División I Recipientes a Presión	API 1104 Líneas de tubería para gas y petróleo
Grietas	No aceptable	No aceptable	5/32" (4 mm) para grietas en el cráter (detectadas con otro método no destructivo)
Fusión incompleta	No aceptable	No aceptable	1" de longitud (detectadas con ayuda de otro método no destructivo)
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" (3.2 mm)	De 1/32" (0.8 mm) a 5/16" (8 mm) dependiendo del tipo de junta (véase UW-35)	De 1/32" (0.8 mm) a 1/16" (1.6 mm)
Socavado Máxima profundidad y longitud permitidas	1/32" (0.8 mm) para espesores < 1" (se permite 1/16" (1.6 mm) máximo para una longitud acumulada 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" (0.25 mm) 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" (0.8 mm) o 10% (lo que resulte menor) del espesor nominal de las superficies adyacentes de la soldadura,	1/32" (0.8 mm) o 12.5% del espesor de pared. 1/64" (0.4 mm) o de 6.5 a 12.5 % del espesor de pared, de un máximo 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 y partículas) permitida. 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" (3.2 mm)	De 1/4 del espesor de pared a 3/4", dependiendo de la categoría y del espesor de la junta (véase Tabla UW-33)	1/16" (1.6 mm)
Penetración incompleta en la junta	No aceptada en juntas de penetración completa	No aceptable	1" de longitud (detectada con ayuda de radiografía)

TABLA. 10.2 COMPARACIÓN DE LOS CRITERIOS DE ACEPTACIÓN DE ALGUNAS NORMAS PARA



ANEXO 1

ESPECIFICACIONES ESTÁNDAR ASTM, RELACION DE LOS METALES
BASE Y LOS TIPOS DE ELECTRODOS.



ESPECIFICACIONES ESTÁNDAR ASTM

ACEROS				Recomendación INDURA		
ASTM	Grado	Producto	Tipo de Metal	Arco Manual	MIG-MAG-TIG	Tubular FCAW
A3-78	1,2	Barras	Acero al carbono	6012, 6013, 7014, 7018, 7024	ER-70S-2, 3, 6	E-70T-X, E-71T-X
A27-81a	Todas	Fundición	Acero	7018		
A36-81a		Estructural	Acero	6012, 6013, 7014, 7018, 7024		
A53-81a	A y B	Cañerías	Acero	6010, 6011, 7018		
A82-79		Reforzado	Acero	7018		
A105-81		Cañerías	Acero	Similar a A53		
A106-80	A y B	Cañerías	Acero	Similar a A53		
	C	Cañerías	Acero	7018		
A109-81		Fleje	Acero	Similar a A36		
A123-78		Chapa, Fleje	Acero	7018		
A131-81a		Estructural	Acero	Similar a A36		
A134-80		Cañerías	Acero	Similar a A53		
A135-79	A y B	Cañerías	Acero	Similar a A53		
A139-74	Todas	Cañerías	Acero	Similar a A53		
A148-81	80-40, 80-50	Fundición	Baja Aleación	8018C3	ER-80S-Ni1	E-8XT-1, Ni1
	90-60		Baja Aleación	9018M	ER-100S-1	E-9XT1-Ni2
	105-85		Baja Aleación	11018M	ER-110S-1	E-110TX-K3
	120-95		Baja Aleación	12018M	ER-120S-1	E-120T5-K4
	150-125, 174-145		Baja Aleación			
A161-83		Tuberías	Acero	Similar a A53	ER-70S-2, 3, 4	E-70T-X, E-71T-X
A167-81a	302B					
	304L	Chapa, Fleje	Inoxidable	308L	ER-308L	E-308LT-X
	309S, 309	Chapa, Fleje	Inoxidable	309	ER-309	ER-309T-X
	310S, 310	Chapa, Fleje	Inoxidable	310	ER-310	E-310T-X
	316	Chapa, Fleje	Inoxidable	316	ER-316L, HISII	E-316LT-X
	316L, 317L	Chapa, Fleje	Inoxidable	316L	ER-316L	E-316LT-X
	317	Chapa, Fleje	Inoxidable	317		
	321	Chapa, Fleje	Inoxidable			
	347, 348	Chapa, Fleje	Inoxidable	347	ER-347	E-347LT-X
	XM-15	Chapa, Fleje	Inoxidable	310	ER-310	E-310T-X
A176-81	403, 405, 409	Chapa, Fleje	Inoxidable	410	ER-310	
	410, 410S	Chapa, Fleje	Inoxidable	410	ER-310	
	429, 430	Chapa, Fleje	Inoxidable	308	ER-310	
	442, 446	Chapa, Fleje	Inoxidable	309	ER-309	E-309T-X
A177-80		Chapa, Fleje	Inoxidable	308	ER-308L, HISII	E-308LT-X
A178-79b	A	Tuberías	Acero	7018	ER-70S-2, 3, 6	E-70T-X, E-71T-X
	C	Tuberías	Acero	Similar a A53	ER-70S-2, 3, 6	E-70T-X, E-71T
A179-79		Tuberías	Acero	Similar a A53	ER-70S-2, 3, 6	E-70T-X, E-71T
A181-81	60	Cañería, Fittings	Acero	Similar a A53	ER-70S-2, 3, 6	E-70T-X, E-71T-X
	70	Cañería, Fittings	Acero	7018	ER-70S-2, 3, 6	E-70T-X, E-71T-X
A182-81A	F1	Cañería, Fittings	Acero al Cr/Mo	7018A1	ER-80S-B2	E-8XTX-A1
	F2, F11, F12	Cañería, Fittings	Acero la Cr/Mo	8018B2	ER-80S-B2	E-8XTX-A1
	F5, F5a, F21, F22	Cañería, Fittings	Acero al Cr/Mo	9018B3	ER-90S-B3	E-9XTX-B3
	F6	Cañería, Fittings	Inoxidable	410		
	F304, F304H	Cañería, Fittings	Inoxidable	308	ER-308L, HISII	E-308LT-X
	F304L	Cañería, Fittings	Inoxidable	308L	ER-308L	E-308LT-X
	F310	Cañería, Fittings	Inoxidable	310	ER-310	E-310T-X
	F316L	Cañería, Fittings	Inoxidable	316L	ER-316L	E-316LT-X
	F321, F321H, F347	Cañería, Fittings	Inoxidable			
	F347H, F348, F348H	Cañería, Fittings	Inoxidable	347	ER-347	E-347T-X
	F10	Cañería, Fittings	Inoxidable	310	ER-310	E-310T-X
	F9	Cañería, Fittings	Acero al Cr/Mo			
A184-79	40	Reforzado	Acero	7018	ER-70S-2, 3, 6	E-70T-X, E-71T-X
	50, 60	Reforzado	Baja Aleación	9018M	ER-100S-1	E-9XT-1-Ni2



ESPECIFICACIONES ESTÁNDAR ASTM

ACEROS				Recomendación INDURA		
ASTM	Grado	Producto	Tipo de Metal	Arco Manual	MIG-MAG-TIG	Tubular FCAW
A185-79		Reforzado	Baja Aleación	7018	ER-70S-2, 3, 6	E-70T-X, E-71T-X
A192-80		Tuberías	Acero	7018	ER-70S-2, 3, 6	E-70T-X, E-71T-X
A199-79a	T3b, T4, T22	Tuberías	Cr/Mo	9018B3	ER-90S-B3	
	T5, T2	Tuberías	Cr/Mo			
	T11	Tuberías	Cr/Mo	8018B2	ER-80S-B2	E-8XTX-B2
	T9	Tuberías	Cr/Mo			
A200-79a		Tuberías	Cr/Mo	Similar a A1 99		
A202-78	A y B	Estanque a pres.	Baja Aleación	9018M	ER-100S-1	E-9XT-1-Ni2
A203-81	All	Estanque a pres.	Ac. níquel	8018-C3	ER-80-Nil	E-80TS-K1
A204-79a	A y B	Estanque a pres.	Cr/Mo	7018A1	ER-80S-B2	E-8XTX-B2
	C	Estanque a pres.	Baja Aleación	10018M	ER-110S-1	E-110TX-K3
A209-79a		Tuberías	Acero	7018	ER-70S-2, 3, 6	E-70T-X, E-71T-X
A210-79a	A-1	Tuberías	Acero	Similar a A161	ER-80S-D2	E-70T-1, E-71T-1
	C	Tuberías	Acero	E7018		
A211-75		Cañerías	Acero	Similar a A53		
A213-81a	T2, T11, T12, T17	Tuberías	Cr/Mo	E8018B2		E-80C-B2
	T3b, T22	Tuberías	Cr/Mo	E9018B3		E-90C-B3
	T5, T5b, T5c, T21	Tuberías	Cr/Mo			E-502T-1
	T9	Tuberías	Cr/Mo			E-505T-1
	TP304, TP304H	Tuberías	Inoxidables	308	ER-308L, HiSiI	E-308LT-X
	TP304L	Tuberías	Inoxidables	308L	ER-308L	E-308LT-X
	TP310	Tuberías	Inoxidables	310	ER-310	E-310LT-X
	TP316, TP316H	Tuberías	Inoxidables	316	ER-316L, HiSiI	E-316LT-X
	TP316L	Tuberías	Inoxidables	316L	ER-316L	E-316LT-X
	TP321, TP321H, TP347, TP347H, TP348, 348H	Tuberías	Inoxidables	347	ER-347	E-347T-X
A214-75		Tuberías	Acero	Similar a A 161		
A216-79	WCA	Fundición	Acero	6012, 6013, 7014, 7024	E-70S-3, 6	E-70T-1, E-71T-1
	WCB, WCC		Acero	7018, 7024	E-80S-D2, E-70S-3, 6	E-70T-X, E-71T-X
A217-81	WC1	Fundición	Cr/Mo	7018, 7024	E-80S-D2, E-70S-3, 6	E-70T-X
	WC4, WC5, WC6	Fundición	Cr/Mo	8018B2	E-80S-D2	E-80C-B2
	WC9	Fundición	Cr/Mo	9018B3		E-90C-B3
	C5	Fundición	Cr/Mo			E-502T-1
A225-79	C	Estanque a pres.	Baja Aleación	11018M, 12108M		E-110T1-G, E-110T5-K4
	D	Estanque a pres.	Baja Aleación	8018C3	ER-80S-D2	E-81Ti-N2
A226-80		Tuberías	Acero	Similar a A 161		
A234-81a	WPA, WPPB, WPC	Fittings	Acero	Similar a A53		
	WP1	Fittings	Cr/Mo	7018A1	ER-80S-D2	
	WP11, WP12	Fittings	Cr/Mo	8018B2		E-80C-B2
	WP22	Fittings	Cr/Mo	9018B3		E-90C-B3
	WP5	Fittings	Cr/Mo			E-502T-1
A236-9a	C, D, E, F, G	Forjados	Baja Aleación	9018M		E-110T1-G
	H	Forjados	Baja Aleación	1201M		E-120C-G
A240-81a	302, 304, 304H	Estanque a pres.	Inoxidable	308	ER-308L, HiSiI	E-308LT-X
	305	Estanque a pres.	Inoxidable	308	ER-308L, HiSiI	E-308LT-X
	304L	Estanque a pres.	Inoxidable	309	ER-309	E-309LT-X
	309S	Estanque a pres.	Inoxidable	310	ER-310	E-310LT-X
	310S	Estanque a pres.	Inoxidable	310	ER-310	E-310LT-X
	316H	Estanque a pres.	Inoxidable	316L	ER-316L, HiSiI	E-316LT-X
	316L, 317L	Estanque a pres.	Inoxidable	347	ER-347	E-47T-X
	317	Estanque a pres.	Inoxidable	347	ER-347	
	321, 321 H	Estanque a pres.	Inoxidables			
	347, 347H	Estanque a pres.	Inoxidables			
	348, 348H, XM15	Estanque a pres.	Inoxidables	310	ER-310	E-310T-X
A240-79		Estanque a pres.	Inoxidables			



ESPECIFICACIONES ESTANDAR ASTM

ACEROS				Recomendación INDURA		
ASTM	Grado	Producto	Tipo de Metal	Arco Manual	MIG-MAG-TIG	Tubular FCAW
A242-81	Tipos 1 y 2	Estructural	Acero	7018,7024	ER-70S-3,6	E80T1-W,E70T-1,E71T-1
A249-81a	304,304H,305	Tuberías	Inoxidables	308	ER-308L,HiSil	E308LT-X
	304L	Tuberías	Inoxidables	308L	ER-308L	E308LT-X
	309	Tuberías	Inoxidables	309	ER-309	E309LT-X
	310	Tuberías	Inoxidables	310	ER-310	E310T-X
	316,316H	Tuberías	Inoxidables	316	ER-316L,HiSil	ER316LT-X
	316L	Tuberías	Inoxidables	316L	ER-3616L	E316LT-X
	317	Tuberías	Inoxidables	317	ER-317	
A250-79a		Tuberías	Mo	7018A1	ER-80S-D2	E70T-X,E71T-X
A252-81	1,2	Cañerías	Acero	Similar a A53		
	3	Cañerías	Acero	7018	ER-80S-D2	E70T-X,E71T-X
A263-79	405,410,410S	Chapa, Fleje	Inoxidables	410		E410T-1
A266-78	1,2,3,4	Forjados	Acero	7018,7024	ER-70S-3,6	E70T-X,E71T-X
A268-81	TP405,TP409,TP410	Tuberías	Inoxidables	410		E410T-1
	TP409			410		E409T-2G
	TP329	Tuberías	Inoxidables	309	ER-309	E309LT-X
A269-81	TP304	Tuberías	Inoxidables	308L	ER-308,HiSil	E308LT-X
	TP304L	Tuberías	Inoxidables	308L	ER-308L	E308LT-X
	TP316	Tuberías	Inoxidables	316	ER-316L,HiSil	E316LT-X
	TP316L	Tuberías	Inoxidables	316L	ER-316L	E316LT-X
	TP317	Tuberías	Inoxidables	317		
	TP321,TP347	Tuberías	Inoxidables	347	ER-347	
	TP348					
A270-80		Tuberías	Inoxidables	308	ER-308L,HiSil	E308LT-X
A271-80	TP304	Tuberías	Inoxidables	308	ER-308L,HiSil	E308LT-X
	TP304H	Tuberías	Inoxidables	308	ER-308L,HiSil	E308LT-X
	TP321	Tuberías	Inoxidables	347	ER-347	
	TP321H	Tuberías	Inoxidables	347	ER-347	
	TP347	Tuberías	Inoxidables	347	ER-347	
	TP347H	Tuberías	Inoxidables	347	ER-347	
A273-64	C1010 a C1020	Forjados	Acero	7018,7024	ER-70S-3,6	
A276-79a	302,304,305,302B	Barras	Inoxidables	308	ER-308L,HiSil	E308LT-X
	304L	Barras	Inoxidables	308L	ER-308L	E308LT-X
	309,309S	Barras	Inoxidables	309	ER-309	E309LT-X
	310,310S	Barras	Inoxidables	310	ER-310	
	316	Barras	Inoxidables	316	ER-316L,HiSil	E316LT-X
	316L	Barras	Inoxidables	316L	ER-316L	E316LT-X
	317	Barras	Inoxidables	317		
	321,347,348	Barras	Inoxidables	347	ER-347	
	TP403	Barras	Inoxidables	410		E410T-1
	TP405	Barras	Inoxidables	410		E410T-1
	TP410	Barras	Inoxidables	410		E410T-1
	TP414	Barras	Inoxidables	410		E410T-1
	TP420	Barras	Inoxidables	410		E410T-1
	TP446	Barras	Inoxidables	309,310		
A283-81	A,B,C,D	Estructural	Acero	Similar a A36		
A284-81	C,D	Estructural	Acero	Similar a A36		
A285-81	A,B,C	Estanque a Pres.	Acero	7018,7024	ER-70S-3,6	E70T-X,E71T-X
A288-68	1	Forjados	Acero	7018,7024	ER-70S-3,6	E70T-X,E71T-X
	2	Forjados	Baja Aleación	9018M	ER-100S-1	E110T1-G, E110T5-K4
	3	Forjados	Baja Aleación	11018M	ER-70S-3,6	E120C-G
	4,5,6,7,8	Forjados	Ac. aleación			E4130T-1
A289-70a	A y B	Forjados	Inoxidables	308	ER-308,HiSil	E308LT-X
A297-81	HF	Fundición	Inoxidables	308,308L		
	HH	Fundición	Inoxidables	309	ER-308L,HiSil	E308LT-X



ESPECIFICACIONES ESTANDAR ASTM

ACEROS				Recomendación INDURA		
ASTM	Grado	Producto	Tipo de Metal	Arco Manual	MIG-MAG-TIG	Tubular FCAW
A299-79b A302-80 A312-81a	HI, HK	Fundición	Inoxidables	310	ER-309	E309LT-X
	HE	Fundición	Inoxidables	312	ER-310	
		Estanque a Pres.	Baja Aleación	9018M		
	A, B, C, D	Estanque a Pres.	Baja Aleación	9018M		
	TP304, TP304H	Cañerías	Inoxidables	308	ER-308, HiSi	E308LT-X
	TP304L	Cañerías	Inoxidables	308L	ER-308L	E308LT-X
	TP309	Cañerías	Inoxidables	309	ER-309	E309LT-X
	TP310	Cañerías	Inoxidables	310	ER-310	
	TP316, TP316H	Cañerías	Inoxidables	316	ER-316L, HiSi	E316LT-X
	TP316L	Cañerías	Inoxidables	316L	ER-316L	E316LT-X
A328-81 A333-81a A334-79 A335-81a	TP317	Cañerías	Inoxidables	317		
	TP321, TP321H, TP347, TP347H, TP348, TP348H	Cañerías	Inoxidables	347	ER-347	
		Pilotes	Acero	7018	ER-70S-3,6	E70T-X, E71T-X
	1 y 6	Cañerías	Baja Aleación	8018C3		
	3, 4, 7, 9	Cañerías	Baja Aleación	8018C2		E80C-Ni3
	1 y 6	Tuberías	Baja Aleación	8018C3		E81Ti-Ni2
	3, 7, 9	Tuberías	Baja Aleación	8018C2		E80C-Ni3
	P1, P15	Cañerías	Cr/Mo	7018A1	ER-80S-D2	
	P2, P11, 12	Cañerías	Cr/Mo	8018B2		E80C-B2
	P5, P5b, P5c	Cañerías	Cr/Mo	502		E502T-1
A336-81a	P9	Cañerías	Cr/Mo			E505T-1
	P22	Cañerías	Cañerías	9018B3		E90C-B3
		Estanque a Pres.	Baja aleación	7018A1		
	F5, F5a	Estanque a Pres.	Cr/Mo			E502T-1
	F6	Estanque a Pres.	Inoxidables	410		E410T-1
	F22, F22a	Estanque a Pres.	Cr/Mo	9018B3		E90C-B3
	F30	Estanque a Pres.	Cr/Mo	8018B2		E80C-B2
	F31		Aleac. Níquel	8018C2		E80C-Ni3
	F32	Estanque a Pres.	Cr/Mo			E502T-1
	FS, FS2, FS4	Estanque a Pres.	Inoxidables	308	ER-308L, HiSi	E308LT-X
A350-81 A351-81	F8M	Estanque a Pres.	Inoxidables	316	ER-316L, HiSi	E316LT-X
	F10, F25	Estanque a Pres.	Inoxidables	310	ER-310	
	LF1, LF2	Fittings	Aleac. Níquel	8018C3		E80C-Ni2, E81M-Ni2
	LF3, LF4	Fittings	Aleac. Níquel	8018C2		E80C-Ni3
	CF8, CF8A, CF8C	Fundición	Inoxidables	308	ER-308L, HiSi	E308LT-X
	CF3, CF3A	Fundición	Inoxidables	308L	ER-308L	E300LT-
	CF8M, CF10MC	Fundición	Inoxidables	316L	ER-316L	E316LT-X
	CF3M, CF3MA					
	CH8, CH10, CH20	Fundición	Inoxidables	309	ER-309	E309LT-X
	CK20, HK30, HK40	Fundición	Inoxidables	310	ER-310	
A352-81 A356-77 A358-81	CN7M	Fundición	Inoxidable	320CB		
	LC2	Fundición	Aleac. Níquel	8018C1		E80C-Ni2, E81Ti-Ni2
	LC3	Fundición	Aleac. Níquel	8018C2		E80C-Ni3
	1	Fundición	Acero	Similar a A27		
	2	Fundición	C/Mo	7018A1	ER-80S-D2	
	5, 6, 8	Fundición	Cr/Mo	8018B2		E80C-B2
	10	Fundición	Cr/Mo	9018B3		E90C-B3
	304	Cañerías	Inoxidables	308	ER-308L, HiSi	E308LT-X
	309	Cañerías	Inoxidables	309	ER-309	E309LT-X
	310	Cañerías	Inoxidables	310	ER-310	
A361-76 A369-76	316	Cañerías	Inoxidables	316	ER-316L, HiSi	E316LT-X
	321, 347, 348	Cañerías	Inoxidables	347	ER-347	A361-76
		Chapa	Acero	7018	ER-70S-3,6	E70T-X, E71T-X
	FP1	Cañerías	Baja Aleación	701SA1	ER-80S-D2	



ESPECIFICACIONES ESTANDAR ASTM

ACEROS				Recomendación INDURA		
ASTM	Grado	Producto	Tipo de Metal	Arco Manual	MIG-MAG-TIG	Tubular FCAW
A369-79a	FP2,FP11,P12	Cañerías	Cr/Mo	8018B2		E80C-B2
	FP5	Cañerías	Cr/Mo			E502T-1
	FP22,FP38	Cañerías	Cr/Mo	9018B3		E90C-B3
	FP21,FP22					
A372-81	FPA,FPB	Cañerías	Baja Aleación	7018	ER-70S-3,6	E70T-X,E71T-X
	FP9	Cañerías	Cr/Mo			E505T-1
	I	Forjados	Acero	7018	ER-70S-3,6	E-70T-X,E71T-X
	II,III	Forjados	Baja Aleación	9018M		
A376-81	IV	Forjados	Baja Aleación	11018M		E110T5-K4,E110Ti-G
	V	Forjados	Ac. Aleación	12018M		E120C-G
	VI	Forjados	Ac. Aleación	1001SD2		
	VII, VIII	Forjados	Ac. Aleación			E4130T-1
A381-81	TP304,TP304H	Cañerías	Inoxidables	308	ER-308L,HiSil	E308LT-X
	TP304NTP316,	Cañerías	Inoxidables	316	ER-316L,HiSil	E316LT-X
	TP316H,TP316N					
	TP321,TP321H,	Cañerías	Inoxidables	347	ER-347	
A387-79b	TP347,347H,348					
	Y35 a Y50	Cañerías	Acero	Similar a A53		
	Y52,Y56	Cañerías	Acero	7018	ER-80S-D2	
	Y60,Y65	Cañerías		9018M		
A389-77a	A,B,C	Estanque a Pres.	Cr/Mo	8018B2		E80C-B2
	D,E	Estanque a Pres.	Cr/Mo	9018B3		E90C-B3
	C23	Fundición	Cr/Mo	8018B2		E80C-B2
	WP304,WP304H	Fittings	Inoxidables	308	ER-308L,HiSil	E308LT-X
A403-81	WP304L	Fittings	Inoxidables	308L	ER-308L,HiSil	E308LT-X
	WP309	Fittings	Inoxidables	309	ER-309	E309LT-X
	WP310	Fittings	Inoxidables	310	ER-316L,HiSil	E316LT-X
	WP316,WP316H	Fittings	Inoxidables	316	ER-316L,HiSil	E316LT-X
A405-81	WP317	Fittings	Inoxidables	317		
	WP321,WP321H	Fittings	Inoxidables	347	ER-347	
	WP347H,WP348					
	P24	Cañerías	Cr/Mo	9018B3		E90C-B3
A409-77	TP304,TP304L	Cañerías	Inoxidables	308	ER-308L,HiSil	E308L
	TP309	Cañerías	Inoxidables	309	ER-309	E309LT-X
	TP310	Cañerías	Inoxidables	310	ER-310	
	TP316,TP316L	Cañerías	Inoxidables	316	ER-316L,HiSil	E316LT-X
A412-81	TP317	Cañerías	Inoxidables	317		
	TP32,TP347,TP348	Cañerías	Inoxidables	347	ER-347	
	201,202	Chapa, Fleje	Inoxidables	308	ER-308L,HiSil	E308LT-X
	PC,BBB	Cadena	Acero	7018	ER-70S-3	E70T-X,E71T-X
A413-72	A,B,C,D,E,F,G	Chapa Acero	6012,6013,7014,7024		ER-70S-3,6	E70T-X,E71T-X
A414-79	WPL6	Fittings	Acero	8018C3		E81Ti-Ni2
	WPL9	Fittings	Ac.Niquel	8018C1		E80C-Ni2,E81Ti-Ni2
	WPL3	Fittings	Ac.Niquel	8018C2		E80C-Ni3
	1	Tuberías	Cr/Mo	8018B2		E80C-B2
A420-81a	2	Tuberías	Ac.Niquel	8018C3		E@N12,ESIIVNI2
	CP1,CP15	Cañerías	Cr/Mo	7018A1	ER-80S-D2	
	CP2,CP11,CP12	Cañerías	Cr/Mo	8018B2		E80C-B2
	CP5,CP5B	Cañerías	Cr/Mo			E502T-1
A423-79a	CP21,CP22	Cañerías	Cr/Mo	9018B3		E90C-B3
	CPCA15	Cañerías	Inoxidables	410		E410T-1
	CP9	Cañerías	Cr/Mo			E505T-1
	FP304,FP304H	Cañerías	Inoxidables	308	ER-308L,HiSil	E308LT-X
A426-80	FP304N					
	FP316,FP316H,	Cañerías	Inoxidables	316	ER-316L,HiSil	E316LT-X
A430-79						



ESPECIFICACIONES ESTANDAR ASTM

ACEROS				Recomendación INDURA		
ASTM	Grado	Producto	Tipo de Metal	Arco Manual	MIG-MAG-TIG	Tubular FCAW
	FP316N FP321,FP321H FP347,FP347H	Cañerías	Inoxidables	347	ER-347	
A441-81		Estructural	Acero	Similar a A36		
A442-79b	55,60	Estanque a pres.	Ac. Níquel	8018C3	ER-309	E309LT-X
A447-79		Fundición	Inoxidables	309	ER-309	E309LT-X
A451-80	CPF8CPF8C CPF8M,CPF10MC CPH8,CPH20 CPK20	Cañerías Cañerías Cañerías Cañerías	Inoxidables Inoxidables Inoxidables Inoxidables	308 309Mo 309 310	ER-308L,HiSil ER-309 ER-310	E30SLT-X E309LT-X
A452-79	TP304H TP316H TP347H	Cañerías Cañerías Cañerías	Inoxidables Inoxidables Inoxidables	308 316 347	ER-308L,HiSil ER-316L,HiSil ER-347	E308LT-x E316LT-X
A458-81a		Estanque a Pres.	Baja Aleación	9018M		
A457-71	761	Chapa Fleje	Inoxidable	347	ER-347	
A469-71	1,2	Forjado	Ac.Níquel	8018C2		E80C-Ni3
A470-65	1,2	Forjado	Ac.Níquel	8018C2		E80C-Ni3
A479-81	302,304,304H 304L 310,310S 316,316H 316L 321,321H,347,347H 348,348H	Barras Barras Barras Barras Barras Barras	Inoxidables Inoxidables Inoxidables Inoxidables Inoxidables Inoxidables	308 308L 310 316L 316L 347	ER-308L HiSil ER-308L ER-310 ER-316L HiSil ER-316L ER-347	E308LT-X E308LT-X E316LT-X E316LT-X
A486-74	70 90 120	Fundición Fundición Fundición	Acero Baja Aleación Ac.Aleación	7014,7018,7024 9018M 12018M	ER-70S-3,6	E70T-X,E71T-X E110TI-G,E110T5-K4 E120C-G
A487-81	1N,2N,4N,8N,9N 1Q, 2Q 3Q,4Q, 5Q, 4QA, 7Q 8Q, 9Q,10Q,5N,6N 10N	Fundición Fundición Fundición	Baja Aleación Ac.Aleación	9018M 12018M		E110T1-G,E110T5-K4 E120C-G
A493-80a	302,304,305 316 321,347 410	Barras Barras Barras Barras	Inoxidables Inoxidables Inoxidables Inoxidables	308 316 347 410	ER-308 ER-316 ER-347	E308LT-X E316LT-X E410T-1
A496-78		Reforzado	Baja Aleación	9018M		
A497-79		Reforzado	Baja Aleación	9018M		
A500-81a	A,B,C	Tuberías	Acero	Similar a A36		
A501-81		Tuberías	Acero	Similar a A161		
A508-81	1,1a 2,3 4,5	Forjado Forjado Forjado	Acero Baja Aleación Baja Aleación	7018 9018M 11018M	ER-70S-3,6	E70T-X,E71T-X E110T5-K4 E120C-G,E110TS-K4, E110T1-X E120C-G
A511-79	5a,4a MT302,MT304, MT305 MT304L MT309,MT309S MT310,MT310S WT316 MT316L MT317 MT321,MT347 MT410	Forjado Tuberías Tuberías Tuberías Tuberías Tuberías Tuberías Tuberías Tuberías Tuberías	Baja Aleación Inoxidables Inoxidables Inoxidables Inoxidables Inoxidables Inoxidables Inoxidables Inoxidables Inoxidables	12018M 308 308L 309 310 316 316L 317 347 410	ER-308L,HiSil ER-308L ER-309 ER-310 ER-316L,HiSil ER-316L ER-347	E308LT-X E308LT-X E309LT-X E316LT-X E316LT-X E410T-1
A512-79	MT1010 a MT1020	Tuberías	Acero	Similar a A216		
A513-81	1008 a 1022	Tuberías	Acero	Similar a A161		



ACEROS				Recomendación INDURA		
ASTM	Grado	Producto	Tipo de Metal	Arco Manual	MIG-MAG-TIG	Tubular FCAW
A514-81	4130	Tuberías	Ac. Aleación	11018M, 12018M		E4130T-1
A515-79b		Plancha	Baja Aleación	7018	ER-70S-3	E120C-G, E110T5-K4
A516-79b		Estanque a Pres.	Acero	7018	ER-70S-3	E70T-1, E71T-1
A517-81		Estanque a Pres.	Baja Aleación	11018M		E70T-1, E81Ti-Ni2, E71T-1
A519-80	1008 a 4130	Tuberías	Acero	Similar a A161		E120C-G, E110T5-K4, E110T1-G
A521-70	CA, CC, CC1	Forjado	Acero	7018	ER-70S-3,6	E4130T-1
	AA, AB, CE, CF, AC, AD, CF1, CG	Forjado	Baja Aleación	9018M		E70T-1, 4, 7, 8, E71T-1
	AE	Forjado	Baja Aleación	11018M		E120C-G, E110T5-K4, E110T1-G
	AG, AH	Forjado	Ac. Aleación			E4130T-1
A523-81		Cañería	Acero	Similar a A53		
A524-80		Cañerías	Acero	Similar a A53		
A526-80		Chapa	Galvanizada	7018	ER-70S-6	E71T-11, E71T-GS
A527-80		Chapa	Galvanizada	7018	ER-70S-6	E71T-11, E71T-GS
A528-80		Chapa	Galvanizada	7018	ER-70S-6	E71T-11, E71T-GS
A529-75		Estructural	Acero	Similar a A36		
A533-81	A1, B1, C1, D1, A2, B2, C2, D2, A3, B3, C3, D3	Estanque a Pres.	Baja Aleación	9018M		
		Estanque a Pres.	Baja Aleación	10018M		
A537-80	1	Estanque a Pres.	Acero	7018	ER-70S-3,6	E71T-1
	2	Estanque a Pres.	Ac, Niquel	8018C3		E80C-Ni2, E81Ti-Ni2
A539-79		Tuberías	Acero	Similar a A161		
A541	1,1a	Forjado	Acero	7018	ER-70S-3,6	E71T-1, E70T-4, 7, 8
	2, 3, 4, 5, 6	Forjado	Cr/Mo	8018B2		E80C-B2
	6A, 7, 7A, 8, 8A	Forjado	Baja Aleación	12018M		E120C-G
A542-79	1,2	Estanque a Pres.	Cr/Mo	9018B3		E90C-B3
A643-79a	A, B	Estanque a Pres.	Baja Aleación	12018M		E120C-G
A554-81	MT301, MT302, MT304, MT305	Tuberías	Inoxidables	308	ER-308L, HiSi	E30SLT-X
	MT304L	Tuberías	Inoxidables	308L	ER-308L	E308LT-X
	MT309, MT309S	Tuberías	Inoxidables	309	ER-309	E309LT-X
	MT309S-CB	Tuberías	Inoxidables	309CB		
	MT310, MT310S	Tuberías	Inoxidables	310	ER-310	
	MT316	Tuberías	Inoxidables	316	ER-316L, HiSi	E316LT-X
	WT316L	Tuberías	Inoxidables	316L	ER-316L	E16LT-X
	MT317	Tuberías	Inoxidables	317		
	MT321, MT347	Tuberías	Inoxidables	347	ER-347	
	MT330	Tuberías	Inoxidables	330		
	MT429, MT430	Tuberías	Inoxidables	430		
A556-79	A2, B2	Tuberías	Inoxidables	Similar a A1 61		
	C2	Tuberías	Acero	7018	ER-80S-D2, ER-70S-6	E71T-1
A557-79		Tuberías	Acero	Similar a A556		
A562-79a		Estanque a pres.	Acero	7018	ER-70S-3,6	E70T-1, E71T-1
A569-72		Chapa, Fleje	Acero	6012, 6013, 6022, 7014	ER-70S-3,6	E71T-1, 11E71T-GS
A570-79	30, 36, 40, 45	Chapa, Fleje	Acero	Any E60 o E70 electrodos	ER-70S-3,6	E70T-1, E71T-1
A572-81a	50	Chapa, Fleje	Acero	7018, 7024	ER-70S-3,6	E70T-4, 7, 8, E71T-1
	42 a 55	Estructural	Acero	Similar a A36		
	60 a 65	Estructural	Baja Aleación	8018C2		
A573-81		Estructural	Acero	Similar a A36		
A587-78		Cañerías	Acero	Similar a A53		
A588-81		Estructural	Acero	7018	ER-70S-3,6	E80T1-W, E80C-Ni2, 3
A589-81a		Cañerías	Acero	Similar a A53		E70T-6
A591-77		Acero	Galvanizado	7018	ER-70S-6	E71T-11, E71T-GS

ESPECIFICACIONES ESTANDAR ASTM

ACEROS				Recomendación INDURA		
ASTM	Grado	Producto	Tipo de Metal	Arco Manual	MIG-MAG-TIG	Tubular FCAW
A592-74	A,E,F	Estanque a pres.	Baja Aleación	12018M		E120C-G
A595-80	A,B,C	Tuberías	Acero	7018	ER-70S-3,6	E71T-1
A606-75		Chapa	Baja Aleación	7018	ER-70S-3,6	E70T-1,4,7,8,E71T-1
A607-75	45	Chapa	Baja Aleación	6010,6012,6012, 6013 7014,7018, 7024	ER-70S-3,6	E70T-1,4,7,8, E71T-1,11,E71T-GS
	50	Chapa	Baja Aleación	7018	ER-70S-3,6	E70T-1,4,7,8
	55	Chapa	Baja Aleación			E71T-1,11,E71T-GS
	60	Chapa	Baja Aleación	8018C3		
	65	Chapa	Baja Aleación			
	70	Chapa	Baja Aleación	9018M		
A611-72	A,B,C,D	Chapa	Acero	E60xx, E70xx electrodos	ER-70S-3,6	E70T-1,4,7,8,E71T-1
A611-72	E	Chapa	Acero	9018M	ER-80S-D2	E110T1-G,E110T5-K4
A612-79b		Estanque a pres.	Acero	9018M	ER-80S-D2	E110T1-G,E110T5-K4
A615-81	40	Reforzado	Acero	Similar a A82		
	60	Reforzado	Baja Aleación	9018M		
	75	Reforzado	Baja Aleación	10018M		E110T1-G,E110T5-K4
A616-81a	50,60	Reforzado	Baja Aleación	9018M		
A617-81a	40	Reforzado	Acero	Similar a A82		
	60	Reforzado	Baja Aleación	9018M		
A618-81	1,2,3	Tuberías	Acero	7018	ER-80S-D2	
A619-75		Chapa	Acero			
A620-75		Chapa	Acero	7014,7024	ER-70S-3	E71T-GS,E71T-1
A621-75		Chapa, Fleje	Acero	7018	ER-70S-6	E70T-1,E71T-1
A622-75		Chapa, Fleje	Acero			
A632-80	TP304	Tuberías	Inoxidables	308	ER-308L,HiSil	E308LT-X
	TP304L	Tuberías	Inoxidables	304L	ER-308L	E308LT-X
	TP310	Tuberías	Inoxidables	310	ER-310	
	TP316	Tuberías	Inoxidables	316	ER-316L,HiSil	E316LT-X
	TP316L	Tuberías	Inoxidables	316L	ER-316L	E316LT-X
	TP317	Tuberías	Inoxidables	317		
	TP321	Tuberías	Inoxidables	347	ER-347	
	TP347	Tuberías	Inoxidables	347	ER-347	
	TP348	Tuberías	Inoxidables	347	ER-347	
A633-79a	A,B,C,D	Estructural	Alta resistencia	7018	ER-70S-3,6	E70T-1,4,7,8,11 E71T-GS,E71T-1
			Baja Aleación			E71T-11,E71T-GS
A642-71		Chapa	Galvanizado	7018	ER-70S-3,6	E70T-1,4,7,8,E71T-1
A643-78	A	Fundición	Acero	7018,7024	ER-70S-3,6	E110T1-G,E110T5-K4
	B	Fundición	Acero	10018D2		E80C-B2
	C	Fundición	Acero	9018B3		E409T-2G
A651-79	TP409	Tuberías	Inoxidables	410		
	TPXMB	Tuberías	Inoxidables	347	ER-347	
	TP304	Tuberías	Inoxidables	308	ER-308L,HiSil	E308LT-X
	TP316	Tuberías	Inoxidables	316	ER-316L,HiSil	E316LT-X
A656-81	1,2	Estructural	Baja Aleación	10018D2		E110T5-K4,E110T1-G,E120C-G
A659-72	1015,1016,1017, 1018,1020,1023	Chapa, Fleje	Acero	6012,6013,7018, 7024	ER-80S-D2, ER-70S-3,6	E70T-1,E71T-1
A660-79	WCC,WCA,WCB	Cañerías	Fundición	7018	ER-70S-3,6	E70T-1,E71T-1
			Acero			
A662-79a	A,B	Estanque a pres.	C-Mn,	7018	ER-70S-3,6	E70T-1,4,7,8,E71T-1
A666-80	TP201					
	TP202					
	TP301	Chapa, Fleje	Inoxidables	308	ER-308L,HiSil	E308LT-X
	TP302					
	TP304					
	TP316	Chapa, Fleje	Inoxidables	316	ER-316L,HiSil	E316LT-X



ESPECIFICACIONES ESTANDAR ASTM

ACEROS				Recomendación INDURA		
ASTM	Grado	Producto	Tipo de Metal	Arco Manual	MIG-MAG-TIG	Tubular FCAW
A669-79a		Tuberías	Ac. Aleación	316L	ER-316L	E316LT-X
A672-82	A45,A50,A55,B55	Cañerías	Acero			
	B60	Cañerías	Acero			
	B65	Cañerías	Acero	7018	ER-70S-3,6	E70T-1,E71T-1
	B70,C55,C60,C65	Cañerías	Acero			
	C70,D70	Cañerías	Acero			
	D80,E55,E60	Cañerías	Acero	8018C3		E80C-Ni2,E81Ti-Ni2
	H75,H80,J80,J90	Cañerías	Acero	9018M		E110T1-G,E110T5-K4
	J100	Cañerías	Acero	10018M		E110T1-G,E110T5-K4
	K75,K85	Cañerías	Acero	9018M		E110T1-G,E110T5-K4
	L65,L70	Cañerías	Acero	7018A1	ER-80S-D2	E110T1-G,E110T5-K4
	L75	Cañerías	Acero	10018M		E110T1-G,E110T5-K4
	M70,M75,N75	Cañerías	Acero	9018M		E110T1-G,E110T5-K4
A678-75	A	Estructural	Ac. Carbono	7018	ER-70S-3,6	E70T-1,4,7,8,E71T-1
A678-75	B	Estructural	Ac. Carbono	9018M		E110T1-G,E110T5-K4
	C	Estructural	Ac. Carbono	10018M		
A688-81	TP304	Tuberías	Inoxidables	308	ER-308L,HiSil	E308LT-X
	TP304L	Tuberías	Inoxidables	308L	ER-308L	E308LT-X
	TP316	Tuberías	Inoxidables	316	ER-316,HiSil	E316LT-X
	TP316L	Tuberías	Inoxidables	316L	ER-316L	E316LT-X
A691-81	CM65,CM70	Cañerías	C-Ac. aleación	7018A1	ER-80S-D2	E110T1-G,E110T5-K4
	CM75	Cañerías	C-Ac. aleación	10018M		E110T1-G,E110T5-K4
	CMSH70	Cañerías	C-Ac. aleación	7018	ER-70S-3,6	E71T-1
	CMS75	Cañerías	C-Ac. aleación	9018M		E110T1-G,E110T5-K4
	CMSH80	Cañerías	C-Ac. aleación	8018C3		E80G-Ni2E8171-Ni2
	1/2CR	Cañerías	C-Ac. aleación	8018B2		E80C-B2
	1CR,1-1/4CR	Cañerías	C-Ac. aleación	8018B2		E80C-B2
	2-1/4CR	Cañerías	C-Ac. aleación	8018B2		E90C-B3
	5CR	Cañerías	C-Ac. aleación			E502T-1
A692-74		Tuberías	Cr/Mo	7018A1	ER-80S-D2	E110T1-G,E110T5-K4
A694-81	F42,F46,R48	Fittings	C-Ac. aleación	7018	ER-70S-3,6	E70T-1,4,7,8,E71T-1
	F56,F50,F52	Fittings	C-Ac. aleación	7018,7028	ER-70S-3,6	E70T-1,4,7,8,E71T-1
	F60,F65	Fittings	C-Ac. aleación	8018C3	ER-80S-D2	E80C-Ni2,E81Ti-Ni2
A696-81	B,C	Barras	Acero	7018	ER-70S-3,6	E70T-1,4,7,8,E71T-1
A699-77	1,2,3,4	Plancha, Barras	Aleación	10018D2		E110T1-G,E110T5-K4,E120C-G
A704-74	40	Reforzado	Acero	7018	ER-70S-3,6	E70T-1,4,7,8,E71T-1
	60	Reforzado	Acero	9018M		
A706-81		Reforzado	Baja Aleación	8018C3	ER-80S-D2	E80C-Ni2,E81Ti-Ni2
A707-81	L1, L2, L3	Flanges	C.Ac. aleación	7018	ER-70S-3,6	E70T-1,4,7,8,E71T-1
	L4	Flanges	C.Ac. aleación	8018C1		E80C-Ni2
	L5,L6	Flanges	C.Ac. aleación	8018C3		E80C-Ni2,E81Ti-Ni2
	L7,L8	Flanges	C.Ac. aleación	8018C2		E80C-Ni3
A709-81a	36	Estructural	Alta resistencia	6012,6013,7014,	ER-70S-3,6	E70T-1,E71T-1
			Baja aleación	7018,7024		
	50,50W	Estructural	Alta resistencia	7018	ER-70S-3,6	E70T-1,4,7,8,E71T-1
			Baja aleación			
	100, 100W	Estructural	Alta resistencia	11018M		E120C-G,E110T5-K4
			Baja aleación			
A714-81	I,II, III, IV	Cañerías	Baja Aleación	7018	ER-70S-3,6	E70T-1,E71T-1
	V	Cañerías	Baja Aleación	8018C1		E80C-Ni2,E81Ti-Ni2
	VI	Cañerías	Baja Aleación	8018C3		E80C-Ni2,E81Ti-Ni2
A715-81	50	Chapa, Fleje	Acero	6010,6012,6013,	ER-70S-3,6	E70T-1,E71T-1
				7014,7018,7024		
	70	Chapa, Fleje	Acero	8018C3	ER-80S-D2	E70T-1,4,7,8,E71T-1
	80	Chapa, Fleje	Q & T steel	9018M	ER-80S-D2	E110T1-G,E110T5-K4
A724-81	A	Estanque a pres.	Acero	9018M		
A732-80	1A, 2A, 3A	Fundición	Acero	6012,6013,7014	ER-70S-3,6	E70T-1,4,7,8,E71T-1



ANEXO 2

TABLA COMPARATIVA DE DIFERENTES METODOS DE DUREZA



TABLA COMPARATIVA DE DUREZA

Brinell	Vickers	Rockwell		Resistencia a la tracción x 1000 psi	Brinell	Vickers	Rockwell		Resistencia a la tracción x 1000 psi
		C	B				C	B	
898				440	223	223	20	97	110
857				420	217	217	18	96	107
817				401	212	212	17	96	104
780	1150	70		384	207	207	16	95	101
745	1050	68		368	202	202	15	94	99
712	960	66		352	197	197	13	93	97
682	885	64		337	192	192	12	92	95
653	820	62		324	187	187	10	91	93
627	765	60		311	183	183	9	90	91
601	717	58		298	179	179	8	89	89
578	675	57		287	174	174	7	88	87
555	633	55	120	276	170	170	6	87	85
534	598	53	119	266	166	166	4	86	83
514	567	52	119	256	163	163	3	85	82
495	540	50	117	247	159	159	2	84	80
477	515	49	117	238	156	156	1	83	78
461	494	47	116	229	153	153		82	76
444	472	46	115	220	149	149		81	75
429	454	45	115	212	146	146		80	74
415	437	44	114	204	143	143		79	72
401	420	42	113	196	140	140		78	71
388	404	41	112	189	137	137		77	70
375	389	40	112	182	134	134		76	68
363	375	38	110	176	131	131		74	66
352	363	37	110	170	128	128		73	65
341	350	36	109	165	126	126		72	64
331	339	35	109	160	124	124		71	63
321	327	34	108	155	121	121		70	62
311	316	33	108	150	118	118		69	61
302	305	32	107	146	116	116		68	60
293	296	31	106	142	114	114		67	59
285	287	30	105	138	112	112		66	58
277	279	29	104	134	109	109		65	56
269	270	28	104	131	107	107		64	56
262	263	26	103	128	105	105		62	54
255	256	25	102	125	103	103		61	53
248	248	24	102	122	101	101		60	52
241	241	23	100	119	99	99		59	51
235	235	22	99	116	97	97		57	50
229	229	21	98	113	95	95		56	49



ANEXO 3

CONDICIONES DE PRECALENTAMIENTO



PRECALENTAMIENTO

TEMPERATURAS DE PRECALENTAMIENTO PARA DIFERENTES ACEROS

El precalentamiento de las piezas a reparar con soldadura resistente al desgaste puede ser necesario, para evitar grietas en el metal base, como también en el depósito.

La temperatura de precalentamiento para cada aleación está indicada en su descripción respectiva y dependerá del contenido de Carbono y elementos de aleación en el metal base.

Cuanto más alto el contenido del Carbono, mayor debe ser la temperatura de precalentamiento.

Las temperaturas indicadas en esta tabla representan los valores mínimos para cada material, por lo que se recomienda usar siempre la temperatura más alta de las cifras indicadas para el metal base y para el material de aporte.

Aceros	Designación	% Carbono	Precalentamiento Recomendado
ACEROS AL CARBONO	Aceros al Carbono	Bajo 0,20	Sobre 90°C
	Aceros al Carbono	0,20-0,30	90°C - 150°C
	Aceros al Carbono	0,30 - 0,45	150°C - 260°C
	Aceros al Carbono	0,45 - 0,80	260°C - 420°C
ACEROS CARBONO-MOLIBDENO	Aceros Carbono-Molibdeno	0,10 - 0,20	150°C - 260°C
	Aceros Carbono-Molibdeno	0,20 - 0,30	200°C - 320°C
	Aceros Carbono-Molibdeno	0,30 - 0,35	260°C - 420°C
ACEROS AL MANGANESO	Aceros al Mn Medio	0,20 - 0,25	150°C - 260°C
	SAET 1330	0,30	200°C - 320°C
	SAET 1340	0,40	260°C - 420°C
	SAET 1350	0,50	320°C - 480°C
	Ac. Mn. 12% (HADFIELD)	1,25	No requiere
ACEROS DE ALTA RESISTENCIA	Acero Molibdeno-Manganeso	0,20	150°C - 260°C
	Acero T1	0,10 - 0,20	90°C - 200°C
	Aceros Alta Resistencia ARMCO	0,12 Máx.	Sobre 90°C
	Aceros Mayari R	0,12 Máx.	Sobre 150°C
	Aceros DUR-CAP	0,25 Máx.	90°C - 200°C
	Aceros YOLOY	0,05 - 0,35	90°C - 320°C
	Aceros Cr-Cu-Ni	0,12 Máx.	90°C - 200°C
	Aceros CROMO-MANGANESO	0,40	200°C - 320°C
	Aceros Hi	0,12 Máx.	90°C - 260°C



Aceros	Designación	% Carbono	Precalentamiento Recomendado
ACEROS AL NIQUEL	SAE 2015	0,10—0,20	Sobre 150°C
	SAE 2115	0,10—0,20	90°C - 150°C
	Acero Níquel 2 1/2%	0,10—0,20	90°C - 200°C
	SAE 2315	0,15	90°C - 260°C
	SAE 2330	0,20	90°C - 260°C
	SAE 2340	0,30	150°C - 320°C
ACEROS CROMO-NIQUEL	SAE 3115	0,15	90°C - 200°C
	SAE 3125	0,25	150°C - 260°C
	SAE 3130	0,30	200°C - 370°C
	SAE 3140	0,40	260°C - 430°C
	SAE 3150	0,50	320°C - 480°C
	SAE 3215	0,15	150°C - 260°C
	SAE 3230	0,30	260°C - 370°C
	SAE 3240	0,40	370°C - 540°C
	SAE 3250	0,50	480°C - 600°C
	SAE 3315	0,15	260°C - 370°C
	SAE 3325	0,25	480°C - 600°C
	SAE 3435	0,35	480°C - 600°C
	SAE 3450	0,50	480°C - 600°C
ACEROS AL MOLIBDENO	SAE 4140	0,40	320°C - 430°C
	SAE 4340	0,40	370°C - 480°C
	SAE 4615	0,15	200°C - 320°C
	SAE 4630	0,30	260°C - 370°C
	SAE 4640	0,40	320°C - 430°C
	SAE 4820	0,20	320°C - 430°C
ACEROS CROMO-MOLIBDENO	Aceros 2% Cr - 1/2% Mo	Sobre 0,15	200°C - 320°C
	Aceros 2% Cr - 1/2% Mo	0,15 - 0,25	260°C - 430°C
	Aceros 2% Cr - 1% Mo	Sobre 0,15	260°C - 370°C
	Aceros 2% Cr - 1% Mo	0,15 - 0,25	320°C - 430°C
	Aceros 5% Cr - 1/2% Mo	Sobre 0,15	260°C - 430°C
	Aceros 5% Cr - 1/2% Mo	0,15 - 0,25	320°C - 480°C
ACEROS AL CROMO	12 - 14% Cr tipo 410	0,10	150°C - 260°C
	16 - 18% Cr tipo 430	0,10	150°C - 260°C
	23 - 30% Cr tipo 446	0,10	150°C - 260°C
ACEROS INOXIDABLES CROMO - NIQUEL	18% Cr - 8% Ni tipo 304	0,07	Estos aceros no requieren de precalentamiento
	25 - 12 tipo 309	0,07	
	25 - 20 tipo 310	0,10	
	18 - 8 Cb tipo 347	0,07	
	18 - 9 Mo tipo 316	0,07	
	18 - 8 Mo tipo 317	0,07	



ANEXO 4

FACTORES DE CONVERSION



FACTORES DE CONVERSIÓN

Propiedad	Conversión "de"	"A"	Multiplicado por
Presión y esfuerzo	libra fuerza por pulgada cuadrada	Pa	$6.894\,757 \times 10^3$
	bar	Pa	$1.000\,000 \times 10^5$
	Atmósfera	Pa	$1.013\,250 \times 10^5$
	Kip/pulg ²	Pa	$6.894\,757 \times 10^6$
	Libra fuerza/pulg ²	Kg-f/mm ²	7.0307×10^{-4}
Resistividad eléctrica ($\Omega \cdot m$)	$\Omega \cdot cm$	$\Omega \cdot m$	1.000×10^{-2}
	$\Omega \cdot m$	$\Omega \cdot cm$	1.000×10^{-2}
Temperatura	Grados Celsius, t_c	K	$t_k = t_c + 273.15$
	Grados Fahrenheit, t_f	K	$t_k = (t_f + 459.67)/1.8$
	Grados Rankine, t_r	K	$t_k = t_r/1.8$
	Grados Fahrenheit, t_f	°C	$t_c = (t_f - 32)/1.8$
	Grados Kelvin, t_k	°C	$t_c = t_k - 273.15$
Torque	Libra fuerza-pulgada	N·m	$1.129\,848 \times 10^{-1}$
	libras fuerza - pie	N·m	1.355 818
Velocidad angular	revolución por minuto	Rad./s	$1.047\,198 \times 10^{-1}$
	grado por minuto	Rad./s	$2.908\,882 \times 10^{-4}$
	revoluciones por minuto	grados por minutos	$3.600\,000 \times 10^{-2}$
Velocidad lineal	pulgadas/min.	m/s	$4.233\,333 \times 10^{-4}$
	pie/min	m/s	5.08000×10^{-3}
	pulgadas/ min	mm/s	4.233333×10^{-1}
	pie/min	mm/s	5.080 000
	millas/horas	km/h	1.609 344
Volumen	pulgadas ³	m ³	$1.638\,706 \times 10^{-5}$
	pie ³	m ³	$2.831\,685 \times 10^{-2}$
	yarda ³	m ³	$7.645\,549 \times 10^{-1}$
	pulgadas ³	mm ³	$1.638\,706 \times 10^{-4}$
	pie ³	mm ³	$2.831\,685 \times 10^7$
	pulgadas ³	litro	$1.638\,706 \times 10^{-2}$
	pie ³	litro	$2.831\,685 \times 10$
	galón	litro	3.785412



Formulas

$$\text{Calor aportado (joules/pulg)} = \frac{\text{Corriente de Soldadura} \times \text{Voltaje de Soldadura} \times 60}{\text{Velocidad de traslado (pulg/min.)}}$$

$$CE = \frac{\%C}{6} + \frac{\%Mn}{15} + \frac{\%Ni}{5} + \frac{\%Cu}{15} + \frac{\%Mo}{4}$$

$$\% \text{Elongación} = (\text{Longitud final} - \text{Longitud original}) / \text{Longitud original} \times 100$$

$$\% \text{Reducción de área} = (\text{Área original} - \text{Área final}) / \text{Área original} \times 100$$

$$\text{Resistencia a la tensión} = \text{Carga} / \text{Área}$$



BIBLIOGRAFIA

AWS D1.1/D1.1M:2004, An American National Standard, Structural Welding Code-Steel. 19th edición, American Welding Society, 550 N.W. LeJeune Road, Miami, FL 33126. Impreso en Estados Unidos de América.

MANUAL DE SOLDADURA, TOMO 1, TOMO 2 Y TOMO 3. AMERICAN WELDING SOCIETY, editor R. L. O'Brien, Traducción: Ing. Roberto Escalona (M. en C. UNAM) Revisión técnica: Ing. Juan Antonio Torre, Universidad Anáhuac. ED. Prentice-hall hispanoamericana, S.A.

ASME IX, QUALIFICATION STANDARD FOR WELDING AND BRAZING PROCEDURES, WELDERS, 0 BRAZERS, AND WELDING AND BRAZING OPERATORS, AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS.

INSPECCION DE SOLDADURA, PRIMERA EDICION, HECTOR GARCIA GARCIA, Ediciones Técnicas México, D.F. 2001.

INTRODUCCION A LA METALURGIA DE LA SOLDADURA, L. A. de Vedia, H. G. Svoboda, Agosto 2004.

METALURGIA DE SOLDADURA, Instituto mexicano del petróleo, MEXICO, 1982, subdirección general de capacitación y desarrollo profesional, división editorial.

FABRICACION AND WELDING ENGINEERING, Roger Timings, Ed. Newnes 1st edición, 2008.

MANUAL DE SOLDADURA, Leonardo Koellhoffer, August f. manz, Eugene G. Hornberger. ED. Limusa. quinta edición , 2004



INTRODUCTORY WELDING METALLURGY. American welding society, J.R. Kennedy, D.H. marlin, R. Christoffel, firts printing, sept. 1971

SOLDADURA PROCEDIMIENTOS Y APLICACIONES. L. Carl Love. Ed. Diana México. 5 edición Octubre de 1991.

LIQUIDOS PENETRANTES NIVELES I Y II. Alonso R. Garcia Cueto, IMENDE S.A. 2da edición, Mexico 2005.

PARTICULAS MAGNETICAS NIVELES I Y II. Alonso R. Garcia Cueto, IMENDE S.A. 2da edición, Mexico 2006.

