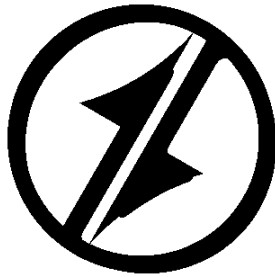


CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



**INFLUENCIA DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA Y SUS PARÁMETROS
DE APLICACIÓN, EN LA FRAGILIZACIÓN POR HIDRÓGENO DIFUSIBLE
DURANTE EL PROCESO DE SOLDADURA EN ACEROS.**

POR

ARMANDO GARCÍA SÁNCHEZ

MONOGRAFÍA

**EN OPCIÓN COMO ESPECIALISTA EN TECNOLOGÍA
DE LA SOLDADURA INDUSTRIAL**

MAYO 2005. SALTILLO COAHUILA.

CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



INFLUENCIA DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA Y SUS PARÁMETROS DE APLICACIÓN, EN LA FRAGILIZACIÓN POR HIDRÓGENO DIFUSIBLE DURANTE EL PROCESO DE SOLDADURA EN ACEROS.

POR

ARMANDO GARCIA SANCHEZ

MONOGRAFÍA

EN OPCIÓN COMO ESPECIALISTA EN TECNOLOGÍA DE LA SOLDADURA INDUSTRIAL

JUNIO 2004 SALTILLO COAHUILA.

SINTESIS

El agrietamiento inducido por hidrógeno es un problema muy significativo en la industria, debido a los costos que ocasiona la ocurrencia de grietas en la zona afectada por el calor, metal base o soldadura. Este fenómeno ocurre cuando en combinación el hidrógeno, esfuerzos de tensión y una microestructura susceptible están presentes durante la soldadura. En la mayoría de los casos el agrietamiento es difícil de detectar ya que este no ocurre directamente o inmediatamente después de soldar, mas bien ocurre horas o días después; de ahí el nombre de agrietamiento en frío (cold cracking). Para evitar este tipo de agrietamiento, es esencial conocer la cantidad de hidrógeno presente bajo condiciones específicas durante la soldadura así como otros factores mismos del proceso de soldadura utilizado que ayudan al agrietamiento. Cuando se suelda mediante proceso de arco eléctrico tales como SMAW, FCAW, SAW, GMAW y GTAW, se debe tener especial cuidado para evitar una excesiva introducción de hidrógeno en el baño metálico. En la presente monografía, se da una explicación de cómo el hidrógeno puede ser introducido y minimizado durante el proceso de soldadura por contaminación del fundente, exceso de exposición a humedad, y gases de protección. Se encontró que el contenido de hidrógeno en los electrodos puede ser incrementado en un factor de 2-3 cuando es expuesto a humedad. Se recomiendan algunas practicas para evitar que esto se de en el proceso FCAW, los parámetros de soldadura tales como , voltaje, corriente, calor de entrada y gases de protección tienen un profundo efecto en la disminución del contenido de hidrógeno difundible en soldaduras de acero. Se encontró que el contenido de hidrógeno difundible, se incrementa casi linealmente al incrementar la corriente. Un estudio del efecto del gas de protección muestra que la soldadura hecha con un gas CO₂ puro, disminuye la cantidad de hidrógeno difundible y la soldadura con mezcla de CO₂ y argón, baja los niveles de hidrógeno difundible comparado cuando se suelda con argón puro.

INDICE

| | PAGINA |
|--|--------|
| SINTESIS | i |
| INDICE | ii |
| 1. OBJETIVOS | 1 |
| 2. JUSTIFICACIÓN | 2 |
| 3. INTRODUCCIÓN | 3 |
| 4. LOS PROCESOS DE SOLDADURA DE ARCO | 4 |
| 4.1 Soldadura por arco de metal protegido (SMAW) | 4 |
| 4.1.1 Definición y descripción general | 4 |
| 4.2 Soldadura por Arco con Núcleo de Fúndente | 8 |
| 4.2.1 Fundamentos del proceso | 8 |
| 4.2.2 Electrodo | 10 |
| 4.3 Soldadura por arco sumergido (SAW) | 13 |
| 4.3.1 Descripción | 13 |
| 4.3.2 Electrodo | 15 |
| 4.3.3 Fundentes | 15 |
| 4.3.4 Variables de operación | 18 |
| 5. FRAGILIZACION POR HIDRÓGENO EN SOLDADURAS | 19 |
| 5.1 Estatus actual del la fragilización por hidrógeno en soldaduras | 19 |
| 5.2 Agrietamiento por hidrógeno en la Zona Afectada por el Calor (ZAC) | 23 |
| 5.3 Agrietamiento en el metal depositado | 24 |
| 5.4 Características y apariencia del agrietamiento por hidrógeno en soldaduras | 26 |
| 5.5 Factores principales de control del agrietamiento inducido por hidrógeno en soldaduras | 28 |
| 6. AGRIETAMIENTO POR HIDRÓGENO EN SOLDADURAS DE ACERO | 29 |
| 6.1 Identificación | 29 |

| | |
|--|----|
| 6.1.1 Apariencia visual del agrietamiento por hidrógeno | 29 |
| 6.1.2 Metalografía | 30 |
| 6.2 Posibles causas | 30 |
| 6.2.1 Hidrógeno en el metal depositado | 31 |
| 6.2.2 Composición del metal base | 35 |
| 6.2.3 Espesor del material | 36 |
| 6.2.4 Esfuerzos actuando en la soldadura | 37 |
| 7. ESTUDIOS SOBRE LA INFLUENCIA DE LOS PARÁMETROS DE SOLDADURA EN EL AGRIETAMIENTO POR HIDRÓGENO | 42 |
| 7.1 Electroodos | 42 |
| 7.1.1 Electrodo para el proceso FCAW-G | 43 |
| 7.2. El precalentamiento | 61 |
| 7.2.1 Guías o métodos alternativos para determinar el precalentamiento en soldaduras de acero al carbono | 61 |
| 7.2.2 Bases para predecir el precalentamiento | 62 |
| 7.3 Tratamiento Térmico Post soldadura | 64 |
| 7.4 Metal base | 67 |
| 7.3.1 Soldabilidad de los aceros de alta resistencia | 67 |
| 8. PREVENCIÓN DEL AGRIETAMIENTO POR HIDRÓGENO EN SOLDADURAS | 71 |
| 8.1 Mejores practicas para evitar el agrietamiento por hidrógeno | 71 |
| 8.2 Detección y remediación | 73 |
| 9. CONCLUSIONES | 75 |
| 10. TRABAJOS FUTUROS | 76 |
| 11. BIBLIOGRAFIA | 77 |

1. OBJETIVOS

Este trabajo tiene como objetivos principales:

- Obtener la correlación de las propiedades metalúrgicas de las uniones soldadas con los parámetros de permeación de hidrógeno y susceptibilidad a la fragilización por hidrógeno.
- Definir características metalúrgicas propias de cada proceso de soldadura.
- Conocer el efecto de los diferentes parámetros de proceso con las características metalúrgicas de la soldadura.
- Estudiar el efecto de las diferentes propiedades metalúrgicas de la soldadura como trampas de hidrógeno.
- Conocer la susceptibilidad al agrietamiento de acuerdo al tipo y parámetros de proceso de soldadura.
- Buscar la causa raíz y efectos de los parámetros de soldadura en la fragilización por hidrógeno en aceros.
- Establecer parámetros y procesos de soldadura apropiados para diferentes tipos de aceros para prevenir el agrietamiento por hidrógeno.
- Conocer la influencia del precalentamiento para prevenir el agrietamiento inducido por hidrógeno.

2. JUSTIFICACION

Actualmente una de las principales causas de fallas en ensambles soldados es debido al agrietamiento. El conocimiento de los efectos del hidrogeno sobre las propiedades de los aceros tanto en el metal, como en la soldadura es fundamental para prevenir problemas en cuanto a la integridad de un componente soldado.

De los diferentes mecanismos de agrietamiento, uno de los más importantes, por su peligrosidad y dificultad para detectar sus inicios, es el causado por el hidrógeno.

La susceptibilidad a que las soldaduras presenten este daño, depende directamente de sus características metalúrgicas, las cuales se adquieren dependiendo del proceso de soldadura y de los parámetros que se apliquen, por lo que es importante tener conocimiento de la relación que existe entre estos parámetros y la susceptibilidad a este daño.

Es de gran importancia conocer el efecto de las propiedades metalúrgicas de las soldaduras, sobre la susceptibilidad a la fragilización por hidrógeno, con el objeto de controlar los parámetros para obtener uniones soldadas con características adecuadas para su uso en todo tipo de ambiente.

Dentro de este contexto, en el presente trabajo , se analizan los resultados de algunos de los estudios realizados relacionados con el agrietamiento o fragilización por hidrogeno en soldaduras, de aceros utilizados en los diversos sectores de la industria, tales como petroquímica y construcción, incluyendo también lo de la reparación de aceros grado herramienta. En los estudios sobre fragilización por hidrogeno en soldaduras realizados se analiza el rol que juegan parámetros tales como: Cantidad de hidrógeno, microestructura y las variables en cuanto al proceso de soldadura y sus parámetros.

3. INTRODUCCION

Antes de entrar en detalles del agrietamiento inducido por hidrogeno en soldaduras, es esencial comprender los fundamentos y alguna terminología de la soldadura . En soldadura, el proceso en si ocasiona un cambio de fase entre los limites adyacentes de las piezas soldadas por la alta presión o el calor intenso. Uno de los procesos mas utilizados en soldadura son los de arco eléctrico y protección de gas, sin embargo casi todos los tipos de soldaduras a altas temperaturas pueden presentar problemas de agrietamiento o fragilización por hidrógeno, y los procesos de arco eléctrico y protección de gas se identifican como los mas propicios para presentar este tipo de problemas.

4. LOS PROCESOS DE SOLDADURA DE ARCO ^[3]

Existen gran cantidad de literatura acerca de la soldadura, desde soldadura por fricción , explosión hasta soldadura por haz de electrones y de arco por plasma. La mayoría de los procesos de soldadura, al igual que en la fundición de los metales, requieren la generación de altas temperaturas para hacer posible la unión de los metales envueltos. El tipo de fuente de calor es básicamente lo que describe el tipo de proceso, por ejemplo soldadura autógena (gas), soldadura de arco (eléctrica). Uno de los principales problemas en soldadura, es el comportamiento de los metales ante la combinación de los agentes atmosféricos y los cambios en su temperatura. El método de proteger el metal caliente del ataque de la atmósfera es el segundo de los mayores problemas a resolver. Las técnicas desarrolladas desde "Protección por fundente" (Flux Covering), hasta la de Protección por gas Inerte, son mas que escudos protectores en muchos casos pero eso es básicamente para lo que fueron creados. En algunas instancias la atmósfera es removida usando sistemas de vacío.

Algunos de estos procesos han sido desarrollados para algunas aplicaciones específicas mientras otros se mantienen muy flexibles cubriendo un amplio rango de actividades en la soldadura. Aunque la soldadura es usada principalmente para unir metales similares y hasta partes metálicas no similares es muy usada, de manera muy notable, para reparar y reconstruir partes y componentes averiados o gastados. Existe también, un crecimiento notable en el uso de diferentes aplicaciones para tratar las superficies con una capa de alto endurecimiento (hardfacing) de partes nuevas, que provee una superficie altamente resistente a la corrosión, abrasión, impacto y desgaste. el proceso de arco se mantiene como el mas usado de todos los grupos de las técnicas de soldadura. Como el mismo nombre lo sugiere, es un arco eléctrico que se establece entre las partes a ser soldada y un electrodo metálico. La energía eléctrica, convertida en calor, genera una temperatura en el arco cerca

de 7,000 grados centígrados (10,000 °F), causando la fusión de los metales y después la unión. El equipo puede variar en tamaño y complejidad, siendo la diferencia principal entre el proceso de arco, el método usado para separar la atmósfera o crearla, y el material consumible empleado para ser aportado al proceso.

Entre los procesos de arco, se incluyen la soldadura de electrodo cubierto, conocido como MAA/SMAW (Manual Metal Arc/ Shielded Metal Arc Welding), GMAW (Gas Metal Arc Welding) o también conocido como MIG, (Metal Inert Gas), el proceso FCAW (flux Cored Arc Welding) que es el proceso de soldadura de microalambre con núcleo de fundente, y el sistema de alta depositación por Arco Sumergido, SAW (Submerged Arc Welding).

Existen Otras variantes como el PAW (Plasma Arc Welding), Soldadura por Plasma, EW (Electro Slag) electro escoria y la soldadura (sin arco eléctrico) por fricción FSW (Friction Stir Welding) que forman parte de los nuevos avances tecnológicos, que se adelantan en los procesos de soldaduras para crear alternativas adaptadas a los procedimientos de alta producción, y limitaciones especiales de ciertos procesos o materiales.

4.1 SOLDADURA POR ARCO DE METAL PROTEGIDO (SMAW)

4.1.1 DEFINICIÓN Y DESCRIPCIÓN GENERAL

La soldadura por arco de metal protegido (Shielded Metal Arc Welding SMAW)^[3] es un proceso de soldadura por arco en el que se produce coalescencia de metales por medio del calor de un arco eléctrico que se mantiene entre la punta de un electrodo cubierto y la superficie del metal base en la unión que se está soldando.

El núcleo del electrodo cubierto consiste en una varilla de metal sólida de material o colado, o bien una varilla fabricada encerrando metal en polvo en una funda metálica. La varilla del núcleo conduce la corriente eléctrica al arco y suministra metal de aporte a la unión. Las funciones principales de la cobertura del electrodo son estabilizar el arco y proteger el metal derretido de la atmósfera, por medio de los gases que se crean cuando el recubrimiento se descompone por el calor del arco.

La protección empleada, junto con otros ingredientes del recubrimiento y del alambre del núcleo, controlan en gran medida las propiedades mecánicas, la composición química y la estructura metalúrgica del metal de soldadura, así como las características de arco del electrodo. La composición de la cobertura del electrodo varía dependiendo del tipo de este.

La soldadura se inicia cuando se enciende un arco eléctrico entre la punta del electrodo y la pieza de trabajo que se ilustra en la Figura 4.1. El intenso calor del arco derrite la punta del electrodo y la superficie del trabajo cerca del arco. En la punta del electrodo se forma con rapidez pequeños glóbulos de metal fundido, los cuales se transfieren a través del arco hasta el charco de soldadura fundida.

De esta forma se deposita metal de aporte conforme el electrodo se va consumiendo. El arco se mueve sobre la pieza de trabajo con una longitud de arco y velocidad de desplazamiento apropiadas, fundiendo una porción del metal base y añadiendo continuamente metal de aporte.

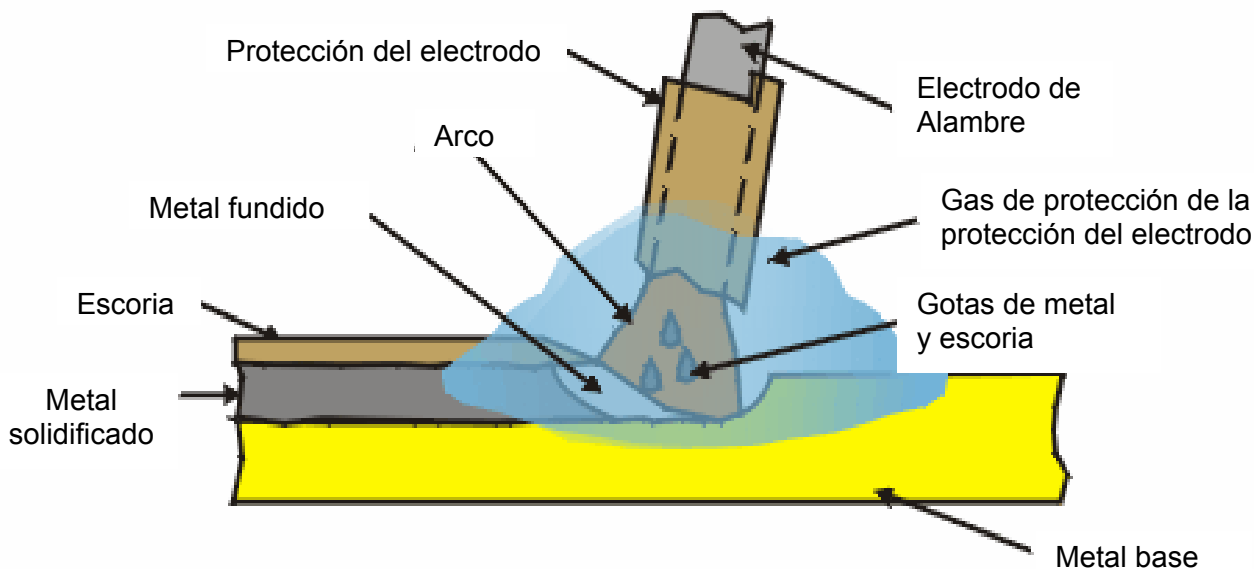


Figura 4.1 Soldadura por arco de metal protegido SMAW

Los electrodos, en particular, tienen su propio código en todas las asociaciones que los clasifica, que los separa de los demás productos y los hace identificables de manera específica, el código que la Sociedad Americana de la Soldadura (AWS) usa para esto, y que probablemente sea el más popular en Latino-América se ha convertido en la referencia que más comúnmente se usa para Clasificar (ver Tabla 4-1), son el AWS A 5.1 (Specification for Carbon Steel Electrodes for Shielded Metal Arc Welding) para los electrodos de acero al carbono, y el AWS A 5.5 (Specification for Low Alloy Steel Electrodes for Shielded Metal Arc Welding) para los electrodos de acero de baja aleación (alto contenido de carbono), muchos los identifican separándolos erróneamente como "Electrodos de Bajo Hidrogeno y Electrodos de Alto Hidrogeno" respectivamente, pero algunas variaciones de los electrodos en ambas clasificaciones contienen en sus fundentes altas o bajas cantidades de Hidrogeno que los excluye de esa referencia. Ver tabla 4-2.

| Tipo de electrodo | Especificaciones de la AWS |
|-----------------------------------|-----------------------------------|
| Acero al carbono | A 5.1 |
| Acero de baja aleacion | A 5.5 |
| Acero resistente a la corrosion | A 5.4 |
| Hierro colado | A 5.15 |
| Aluminio y aleaciones de aluminio | A 5.3 |
| Cobre y aleaciones de cobre | A 5.6 |
| Níquel y aleaciones de níquel | A 5.11 |
| Recubrimientos | A 5.13 y A 5.21 |

Tabla 4-1. Especificaciones AWS para los electrodos recubiertos ^[3]

| Clasificación | Corriente | Arco | Penetración | Recubrimiento y escoria | Polvo de hierro | |
|----------------------|------------------|-------------|--------------------|--------------------------------|---------------------------------|--------|
| F3 | EXX10 | CDEP | Fuerte | Profunda | Celulosa-sodio | 0-10% |
| F3 | EXXX1 | CA y CDEP | Fuerte | Profunda | Celulosa-potasio | 0 |
| F2 | EXXX2 | CA y CDEN | Medio | Medio | Rutilo-sodio | 0-10% |
| F2 | EXXX3 | CA y CD | Ligero | Ligero | Rutilo-potasio | 0-10% |
| F2 | EXXX4 | CA y CD | Ligero | Ligero | Rutilo-polvo de hierro | 25-40% |
| F4 | EXXX5 | CDEP | Medio | Medio | Bajo hidrógeno-sodio | 0 |
| F4 | EXXX6 | CA y CDEP | Medio | Medio | Bajo hidrógeno-potasio | 0 |
| F4 | EXXX7 | CA y CDEP | Medio | Medio | Bajo hidrógeno-polvo de hierro | 25-40% |
| F1 | EXX20 | CA ó CD | Medio | Medio | Oxido de hierro-sodio | 0 |
| F1 | EXX24 | CA ó CD | Ligero | Ligero | Rutilo-polvo de hierro | 50% |
| F1 | EXX27 | CA ó CD | Medio | Medio | Oxido de hierro-polvo de hierro | 50% |
| F1 | EXX28 | CA y CDEP | Medio | Medio | Bajo hidrógeno-polvo de hierro | 50% |

Nota: el porcentaje del polvo de hierro esta basado en el peso del recubrimiento

Tabla 4-2 Significado del último dígito de identificación de los electrodos para el proceso SMAW. ^[3]

4.2 SOLDADURA POR ARCO CON NÚCLEO DE FÚNDENTE (FCAW)

4.2.1 FUNDAMENTOS DEL PROCESO

La soldadura por arco con núcleo de fúndente (Flux Cored Arc Welding FCAW)^[3] es un proceso de soldadura que aprovecha un arco entre un electrodo continuo de metal de aporte y el charco de soldadura. Este proceso se emplea con protección de un fúndente contenido dentro del electrodo tubular, con o sin un escudo adicional de gas de procedencia externa, y sin aplicación de presión.

El electrodo con núcleo de fúndente es un electrodo tubular de metal de aporte compuesto que consiste en una funda metálica y un núcleo con diversos materiales pulverizados. Durante la soldadura, se produce un manto de escoria abundante sobre la superficie de la franja de soldadura.

El aspecto que distingue al proceso FCAW de otros procesos de soldadura por arco es la inclusión de compuestos fundentes dentro de un electrodo de alimentación continua.

El Proceso FCAW tiene dos variaciones principales que difieren en su método de protección del arco y del charco de soldadura contra la contaminación por gases atmosféricos (oxígeno y nitrógeno). Una de ellas, FCAW con autoprotección, protege el metal fundido mediante la descomposición y vaporización del núcleo fúndente en el calor del arco. El otro tipo, la FCAW con escudo de gas, utiliza un flujo de gas protector además de la acción del núcleo fúndente. En ambos métodos, el material del núcleo del electrodo proporciona una cubierta de escoria sustancial que protege el metal depositado durante su solidificación.

Normalmente, la soldadura por arco con núcleo de fundente es un proceso semiautomático, aunque también se emplea para soldadura automática y mecanizada.

El método con escudo de gas Figura. 4.3, el gas protector por lo regular dióxido de carbono o una mezcla de argón y dióxido de carbono o una mezcla de Argón y nitrógeno del aire, forma una envoltura alrededor del arco y sobre el charco de soldadura.

Las composiciones de los electrodos incluyen desoxidantes que se combinan con cantidades pequeñas de oxígeno en el escudo de gas.

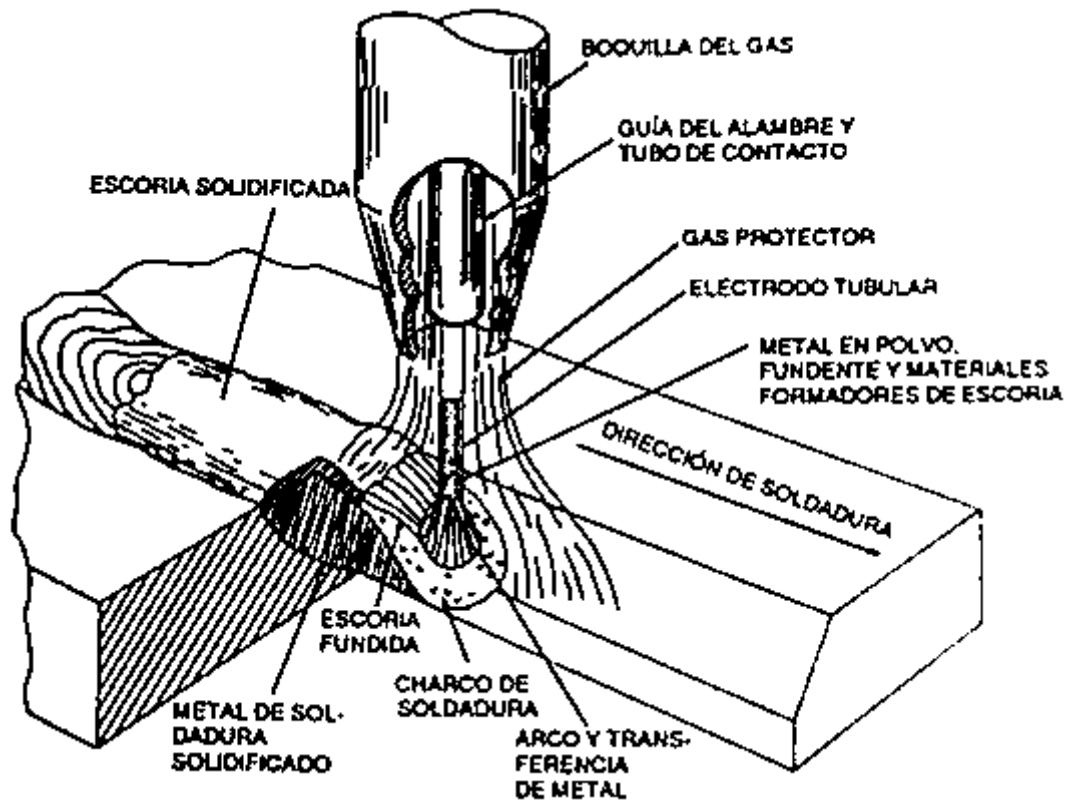


Figura 4.3 Soldadura por arco con núcleo de fundente con gas

En el método con autoprotección que se muestra en la Figura 4.2, la protección se obtiene a partir de ingredientes vaporizados del fundente que desplazan el

aire y por la escoria que cubre las gotas del metal derretido y el charco de soldadura durante la operación. La aplicación de CO_2 y la introducción de agentes desoxidantes y desnitrurantes que proceden de ingredientes del fúndente justo en la superficie del charco de soldadura, explican por qué los electrodos con autoprotección pueden tolerar corrientes de aire mas fuertes que los electrodos con escudo de gas.

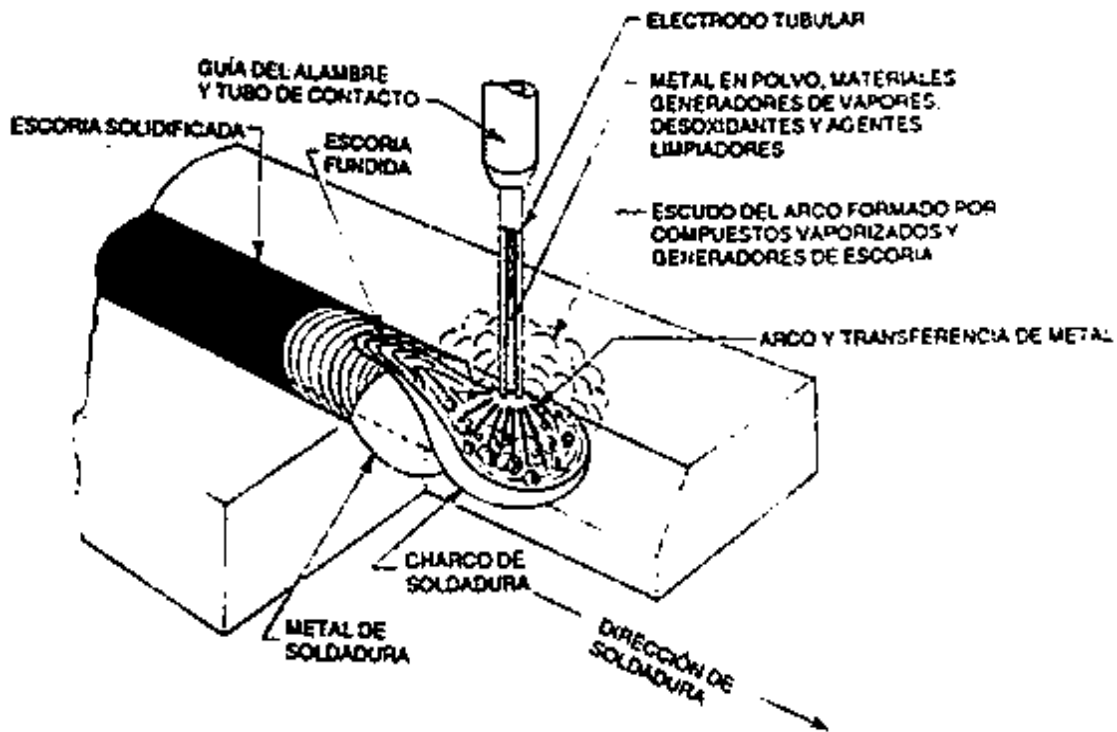


Figura 4.4 Soldadura por arco con núcleo de fúndente y autoprotección

4.2.2 ELECTRODOS

La soldadura por arco con núcleo de fúndente debe buena parte de su flexibilidad a la amplia variedad de componentes que se pueden incluir en el núcleo de un electrodo tubular. El electrodo por lo regular consiste en una funda de acero de bajo carbono o de aleación que rodea un núcleo de

materiales fundentes y de aleación. La composición del núcleo de fúndente varía de acuerdo con la clasificación del electrodo y al fabricante.

Las funciones primarias de los componentes del núcleo de fúndente son las siguientes:

1. Conferir al metal de soldadura ciertas propiedades mecánicas, metalúrgicas y de resistencia a la corrosión mediante un ajuste de la composición química.
2. Promover la integridad del metal de soldadura depositado protegiendo el metal fundido del oxígeno y el nitrógeno del aire.
3. Extraer impurezas del metal fundido mediante reacciones con el fúndente.
4. Producir una cubierta de escoria que proteja el metal del aire durante la solidificación y que controle la forma y el aspecto del cordón de soldadura en las diferentes posiciones para las que es apropiado el electrodo.
5. Estabilizar el arco proporcionándole un camino eléctrico uniforme, para así reducir las salpicaduras y facilitar la deposición de cordones lisos, uniformes y del tamaño correcto.

La mayor parte de los electrodos de acero al carbono para FCAW se clasifican de acuerdo con los requisitos de la última edición de ANSI/AWS A5.20, Especificación para electrodos de acero al carbono destinados a soldadura por arco con núcleo de fúndente. El sistema de identificación sigue el patrón general de clasificación de electrodos y se ilustra en la tabla 4-3. Puede explicarse considerando una designación típica, E70T-1.



Tabla 4-3 Sistema de Identificación para electrodos de Acero para FCAW

En la tabla 4-4 explica el significado del ultimo dígito de las designaciones para FCAW.

| Clasificación de la AWS | Medio protector externo | Corriente y polaridad |
|-----------------------------|-------------------------|------------------------|
| EXXT-1 (múltiples pasadas) | CO ₂ | cc, electrodo positivo |
| EXXT-2 (pasada única) | CO ₂ | cc, electrodo positivo |
| EXXT-3 (pasada única) | Ninguno | cc, electrodo positivo |
| EXTT-4 (múltiples pasadas) | Ninguno | cc, electrodo positivo |
| EXTT-5 (múltiples pasadas) | CO ₂ | cc, electrodo positivo |
| EXTT-6 (múltiples pasadas) | Ninguno | cc, electrodo positivo |
| EXTT-7 (múltiples pasadas) | Ninguno | cc, electrodo positivo |
| EXTT-8 (múltiples pasadas) | Ninguno | cc, electrodo positivo |
| EXXT-10 (pasada única) | Ninguno | cc, electrodo positivo |
| EXTT-11 (múltiples pasadas) | Ninguno | cc, electrodo positivo |
| EXTT-G (múltiples pasadas) | * | * |
| EXXT-GS (pasada única) | * | * |

* Según lo convenido entre el proveedor y el usuario.

Tabla 4-4. Requerimientos de protección y polaridad para electrodos de FCAW de acero al carbono.

En el mercado están disponibles electrodos con núcleo de fúndente para soldar aceros de baja aleación. Se describen y clasifican en la edición más reciente de ANSI/AWS A5.29, “Especificación para electrodos de acero de baja aleación destinados a soldadura por arco con núcleo fúndente”. Los electrodos están diseñados para producir metales de soldadura depositados con composición química y propiedades mecánicas similares a las que se obtienen con electrodos de SMAW de acero de baja aleación.

4.3 SOLDADURA POR ARCO SUMERGIDO

4.3.1 DESCRIPCION

En la soldadura por arco sumergido (Submerged Arc Welding SAW) ^[3] el extremo de un electrodo continuo de alambre desnudo se inserta en un montículo de fúndente que cubre el área o la unión que se va a soldar, el cual enciende el arco. A continuación, un mecanismo alimentador de alambre comienza a introducir el electrodo en la unión a una velocidad controlada, y el alimentador se desplaza manual o automáticamente a lo largo de la soldadura. En la soldadura mecanizada o automática, el trabajo puede desplazarse debajo de un alimentador de alambre estacionario.

En todo momento, se alimenta fúndente adicional adelante del electrodo y a su alrededor y se distribuye continuamente sobre la unión. El calor producido por el arco eléctrico derrite progresivamente parte del fúndente, el extremo del alambre y los bordes adyacentes del metal base, creando un charco de metal fundido debajo de una capa de escoria líquida. El baño fundido cerca del arco presenta mucha turbulencia, y burbujas de gas ascienden rápidamente a la superficie del charco. El fúndente flota sobre el metal derretido y protege por completo de la atmósfera la zona de soldadura.

El manto de fúndente que flota sobre el charco de soldadura evita que los gases atmosféricos contaminen el metal de soldadura y disuelve las impurezas del metal y el electrodo, que entonces flotan sobre el charco. Además, el fúndente puede agregar ciertos elementos de aleación al metal de soldadura, o extraerlos de él.

Al avanzar la zona de soldadura a lo largo de la unión, el metal de soldadura primero y luego el fúndente líquido se enfrían y solidifican, formando una capa protectora de escoria encima. El proceso de arco sumergido se ilustra en la figura 4.5.

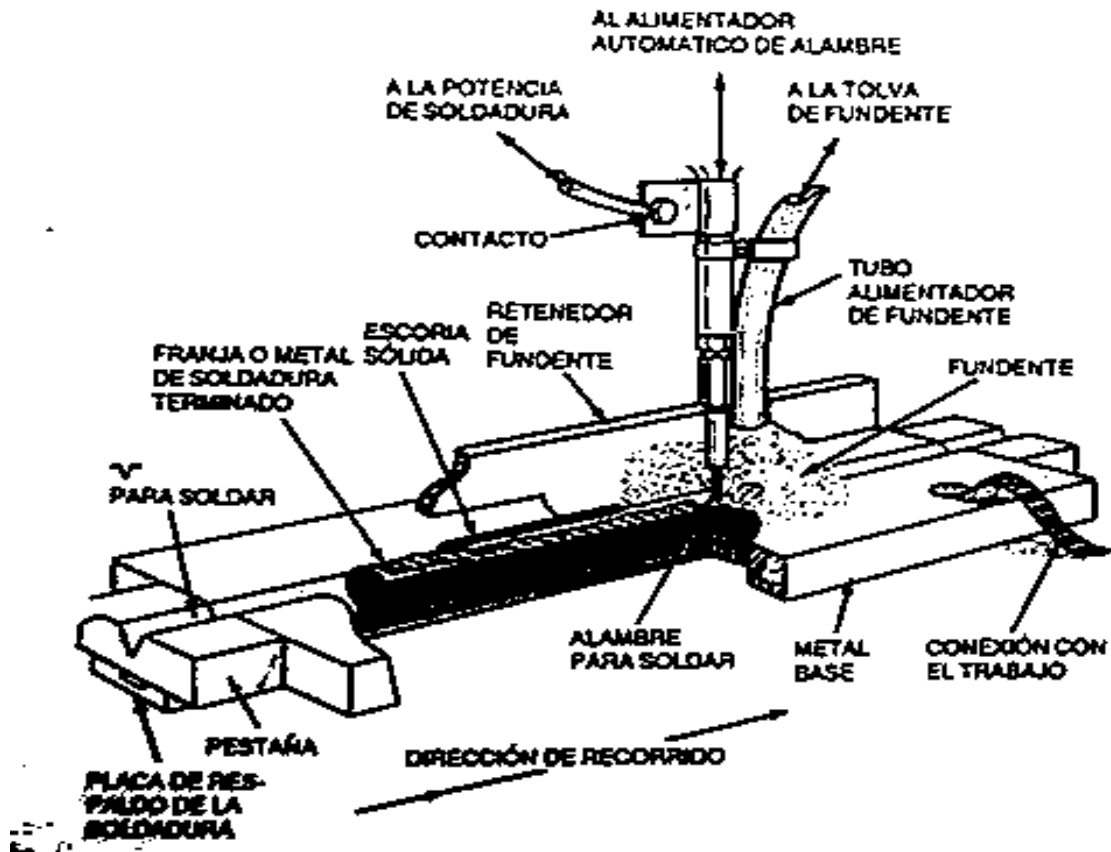


Figura 4.5 Proceso de soldadura por arco sumergido SAW

Los tipos generales de metales base que se pueden soldar:

1. Aceros de carbono con contenido de carbono de hasta 0.29%
2. Aceros de baja aleación [con resistencia de hasta 100 Ksi (690MP)]
3. Aceros al cromo-molibdeno (0.5 a 9% de Cr y 0.005 a 1% de Mo).
4. Aceros inoxidable
5. Aleaciones con base de níquel.

4.3.2 ELECTRODOS

Los electrodos para arco sumergido producen depósitos de soldadura que coinciden con los metales base de acero al carbono, aceros de baja aleación, aceros alto carbono, aceros de aleación especial, aceros inoxidable, aleaciones de níquel y aleaciones especiales para aplicaciones de recubrimiento. Estos electrodos se suministran como alambre sólido desnudo y como electrodos compuestos con núcleo metálico (similares a los electrodos para soldadura por arco con núcleo de fundente).

4.3.3 FUNDENTES

Los fundentes protegen el charco de soldadura de la atmósfera al cubrir el metal con escoria fundida (fundente fusionado). Los fundentes limpian el charco de soldadura, modifican la composición química del metal de soldadura e influyen en la forma que adquirirá el cordón de soldadura y en las propiedades mecánicas que tendrá. Los fundentes son compuestos minerales granulares que se mezclan de acuerdo con diversas formulaciones. Dependiendo del método de fabricación elegido, los diferentes tipos de fundentes se fusionan, aglomeran o mezclan por medios mecánicos.

La especificación AWS A.5.17 prescribe los requisitos que deben cumplir los electrodos y fundentes para soldadura por arco sumergido de aceros al

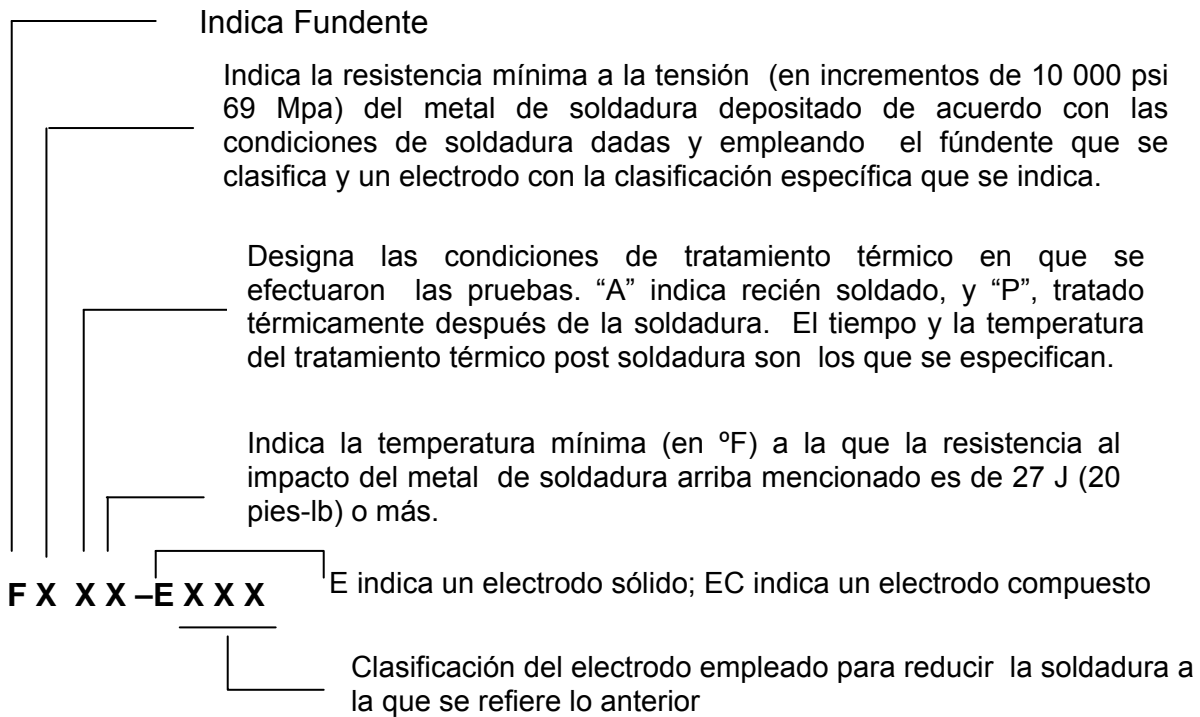
carbono. Los electrodos sólidos se clasifican según la química del depósito. Los fundentes se clasifican con base en las propiedades del metal de soldadura que se obtienen cuando se usan con electrodos específicos. En la Tabla 4.5 se muestra el sistema de clasificación para las combinaciones fundente-electrodo.

Los fundentes se clasifican con base en la composición química y en las propiedades mecánicas del metal de soldadura depositado con un electrodo de una clasificación específica. La selección de los consumibles de SAW dependerá de las propiedades químicas y mecánicas que deba tener el componente que fabrica, de la posición de soldadura (1G, 2G, 2F), y de la preparación que deba recibir la superficie del acero para soldar.

Los fabricantes de consumibles para SAW producen combinaciones del electrodo/fúndente formuladas para satisfacer requisitos específicos de propiedades químicas y mecánicas y de condiciones de solubilidad. Al seleccionar los consumibles para SAW, conviene tener presentes los siguientes aspectos:

1. Conveniencia de escoger un fúndente “neutral” o “activo”. Un fúndente neutral añade pocos elementos de aleación o ninguno, al depósito de soldadura, en tanto que un fúndente activo agrega elementos de aleación al metal de soldadura depositado.
2. Si los fundentes que se están considerando tienen una composición química debidamente equilibrada para usarse con una clasificación de electrodo dada.
3. Los requisitos de propiedades mecánicas exigidos. Esto incluye las propiedades de impacto CVN, así como la resistencia mecánica y la ductilidad del depósito resultante.
4. Aplicabilidad de una combinación electrodo/fúndente dada, lo que incluye la capacidad para mojar las paredes de la unión sin socavamiento ni traslape

en frío, la capacidad para soldar sobre hollín e incrustaciones y la facilidad de eliminación de la escoria.



EJEMPLOS

F7A6-EM12K es una designación completa. Se refiere a un fundente que produce metal de soldadura que, en la condición recién soldada, tiene una resistencia a la tensión de por lo menos 70 000 psi (480 Mpa) y resistencia al impacto Charpy de muesca en "V" de por lo menos 27 J (20 ft-lb) a -51°C (-60°F) cuando se produce con un electrodo EM12K en las condiciones que prescribe esta especificación.

F7A4-EC1 es una designación completa para un fundente cuando también cuando también se indica la marca del electrodo empleado para la clasificación. Se refiere a un fundente que con dicho electrodo produce metal de soldadura que, en la condición recién soldada, tiene una resistencia a la tensión de por lo menos 70 000 psi (480 Mpa) y energía Charpy de muesca en "V" de por lo menos 27 J (20 pies -lb) a -40°C (-40°F), cuando se produce en las condiciones que prescribe esta especificación.

Tabla 4.5 Sistema de clasificación para combinaciones Fundente-electrodo.

La especificación ANSI/AWS A5.23 prescribe requisitos para los electrodos sólidos y compuestos y los fundentes que se usan para soldar aceros de baja aleación. Los fundentes se clasifican de acuerdo con las propiedades del metal de soldadura que se obtienen cuando se usan con electrodos específicos.

La especificación ANSI/AWS A5.9 cubre los metales de aporte para soldar aceros al cromo y al cromo-níquel resistentes a la corrosión o al calor. Esta especificación incluye aceros en los que el cromo excede el 4% y el níquel no excede el 50% de la composición. Los electrodos de alambre sólido se clasifican con base en su composición química de fábrica, y los electrodos compuestos, con base en el análisis químico de una muestra fusionada.

4.3.4 VARIABLES DE OPERACIÓN

El control de las variables de operación en la soldadura por arco sumergido es indispensable para obtener tasas de producción elevadas y soldaduras de buena calidad. Estas variables, en orden aproximado de importancia, son las siguientes:

1. Amperaje de soldadura
2. Tipo de fúndente y distribución de partículas
3. Voltaje de soldadura
4. Velocidad de soldadura
5. Tamaño del electrodo
6. Extensión del electrodo
7. Tipo de electrodo
8. Anchura y espesor de la capa de fúndente.

5. FRAGILIZACION POR HIDRÓGENO EN SOLDADURAS

5.1 Estatus actual de la fragilización por hidrógeno en soldaduras ^[11]

En la soldadura de arco, el hidrógeno generado y atrapado durante la solidificación del metal depositado, puede difundir a varias regiones del ensamble mientras se enfría. Dependiendo de la microestructura, la concentración del hidrógeno difundible y del nivel de esfuerzos residuales, el riesgo del agrietamiento en los aceros ferríticos incrementa cuando la soldadura se enfría por debajo de la región entre 150-100°C. Normalmente el agrietamiento por hidrógeno es de acción retardada, es decir, las grietas pueden aparecer varios días después de que la soldadura fue completada. Normalmente se sitúan en el metal base, en la zona afectada por el calor, o en el metal depositado. Uno de los métodos más efectivos contra este fenómeno, es el precalentamiento, calentando lo suficiente, una junta de un ensamble estructural antes de soldar, o en el caso de pasos múltiples, mantener la temperatura de interpasos elevada a lo largo de toda la operación de soldadura.

Actualmente las técnicas de producción de aceros son más modernas y se fabrican aceros de mayor calidad, en cuanto a la composición y contenido de impurezas, aumentando la resistencia del metal base en la zona afectada por el calor, al agrietamiento por hidrógeno. Consecuentemente con el incremento en la resistencia del metal base y aporte, se requiere de precalentamiento para disminuir el riesgo de agrietamiento.

Este tipo de agrietamiento es un problema mayor en la industria ya que los costos por la reparación de soldaduras agrietadas por este fenómeno (HIC) son muy elevados. En la mayoría de los casos el agrietamiento es difícil de detectar ya que este no ocurre directamente o inmediatamente después de

soldar, más bien ocurre horas o días después; de ahí el nombre de agrietamiento de acción retardada.

Para evitar este tipo de agrietamiento, es esencial conocer la cantidad de hidrógeno presente bajo condiciones específicas durante la soldadura así como otros factores mismos del proceso de soldadura utilizado que ayudan a el agrietamiento. Existen generalmente cuatro condiciones que cuando se combinan una con otra favorecen el agrietamiento inducido por hidrógeno. Estas son las siguientes:

1. Presencia de hidrógeno: debido a la humedad presente en el fundente del electrodo o la atmósfera, los cuales permiten la difusión de hidrógeno en el baño de soldadura y en la Zona Afectada por el Calor (ZAC).
2. Esfuerzos de tensión: estos surgen de contracciones térmicas de la soldadura y el metal base durante el enfriamiento y solidificación.
3. Microestructuras susceptibles a ZAC: La transformación de ferrita a austenita y viceversa, durante ciclos térmicos provoca fragilización por hidrógeno en la microestructuras susceptibles. Ver figura 6.1.
4. Temperatura ambiente baja: el riesgo de agrietamiento es mayor cuando la pieza de trabajo es enfriada a bajas temperaturas, donde el hidrógeno atómico puede combinarse y formar hidrógeno molecular H_2 .

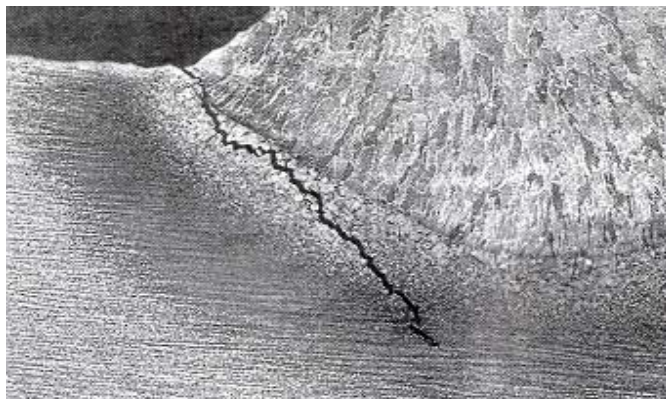


Figura 5.1. Microestructura susceptible a la fragilización por Hidrógeno en una soldadura ^[9].

El mayor riesgo de agrietamiento ocurre cuando la soldadura se enfría por debajo y temperaturas entre los 150-100°C, arriba de estas temperaturas el riesgo de inicio es poco probable, en aceros ferríticos estructurales. Como se mencionó anteriormente, una de las características del agrietamiento en frío, es su efecto retardado, el inicio de la grieta y especialmente su propagación, puede ser en varias horas, o algunas veces días incluso semanas, después de haber soldado. El riesgo también se aumenta cuando se incrementa la resistencia del metal base y aporte, y el espesor de la placa, requiere de pasos múltiples.

En general, existe poca información del riesgo de agrietamiento del metal depositado en soldadura de pasos múltiples, sobre las cuales sólo se han derivado guías para soldar en condiciones seguras. Estas guías o estándares, son bastante limitadas en cuanto a como evitar el agrietamiento por hidrógeno. AWS D1.1:2004 ^[6], asesora sobre como conducir las pruebas, donde puede haber riesgo. BS 5135:1984 (Process of Arc Welding of Carbon and Carbon Manganese Steels), proporciona dos conceptos, uno, el uso de consumibles con un contenido menor a 2.5 ml/100g de hidrógeno, o segundo, la aplicación de un postcalentamiento a 200°C por 2-3 horas. Mientras se incrementan las capacidades de los consumibles de cada proceso, SMAW, SAW y FCAW, para dejar a un lado propuestas indeseables en soldadura por ejemplo, aumentar los costos. Recientemente estándares europeos como el EN 1011-1 :1998 (Welding - Recommendations for welding of metallic materials - Part 1: General guidance for arc welding) y EN 1011-2:2001 (Welding - Recommendations for welding of metallic materials - Part 2: Arc welding of ferritic steels), no proporciona una guía confiable de cómo calcular el precalentamiento necesario cuantitativamente. Estos estándares consideran la posibilidad del agrietamiento por hidrógeno bajo ciertas condiciones sin embargo no dan al usuario algo unificado, esencialmente una metodología validada para el cálculo de la temperatura de precalentamiento de un nivel seguro. ^[10]

Actualmente se realizan pruebas para evaluar el agrietamiento inducido por hidrógeno en aceros estructurales, los principales experimentos realizados son depósitos de paso sencillo y son: Y-Groove Tekken Test, tensile restraint cracking test (TRC), the gapped bead on plate (G-BOP) y la Welding Institute of Canada test (WIC). Aplicando solamente a pequeña escala pruebas de pases de soldadura sencillos no se puede tener la certeza de que es igual para ensambles de soldadura de estructuras de pases múltiples. Probar productos a escala completa, por otra parte, indica solo la susceptibilidad al agrietamiento por hidrógeno, de un a estructura en particular bajo ciertas condiciones de soldadura, pero los resultados no necesariamente tienen una relevancia general en otros casos.

Las pruebas en soldadura de pasos sencillo dan poca asistencia en cuanto a establecer un procedimiento guía para soldaduras de pasos múltiples, principalmente debido a las características de un volumen mas alto de retención de hidrógeno de la soldadura de pasos múltiples, y debido a parámetros como tiempo y temperatura de interpasos. Por lo tanto la confiabilidad de los datos obtenidos en una prueba de pases sencillos, para evaluar el riesgo de agrietamiento por hidrógeno en una soldadura de pases múltiples, puede ser cuestionada.

Actualmente no existe un consenso acerca de los parámetros relevantes que deberían considerarse en los procedimientos de soldadura, por ejemplo, existen diferentes puntos de vista si el espesor de la placa es considerado o no, y si incrementando el “heat input” actualmente resulta en efectos benéficos o adversos con respecto al riesgo de agrietamiento en el metal depositado.

Si el agrietamiento toma lugar en el metal depositado o en la zona afectada por el calor, depende de la composición química actual del metal de aporte en relación con el metal base, así como el nivel de resistencia en cuestión. Generalmente a mayor resistencia y contenido de elementos aleantes en el

metal de aporte tiende a favorecer el agrietamiento en el metal depositado, a expensas del agrietamiento en la zona afectada por el calor.

5.2 Agrietamiento por hidrógeno en la Zona Afectada por el Calor (ZAC)

[11]

En aceros CMn y aceros microaleados alta-resistencia baja-aleación, el agrietamiento en la zona afectada por el calor es más común. En la práctica esto incluye aceros con una cedencia entre 350 hasta 600 MPa. El tipo más común de grietas en la ZAC asociadas con los procesos de soldadura comunes son “root crack”, (grietas en la raíz), “toe crack” (grietas en el pie de la soldadura y “underbead crack” (grietas entre cordones).

De estas, las grietas entre cordones son generalmente asociados con tiempos cortos de difusión y niveles altos de hidrógeno, los otros dos tipos están condicionados a otros factores constantes. Por lo tanto, bajando el contenido de hidrógeno efectivamente, prevenimos el agrietamiento entre cordones, en soldadura de filete y a tope. Sin embargo en soldaduras de pasos múltiples, el agrietamiento entre cordones puede llegar a ser un problema debido al efecto de la distorsión angular (en el caso de que no haya sido prevenida), esto ha sido atribuido a la secuencia de soldadura. En lo que concierne a la ZAC, el principal problema de agrietamiento tanto en soldadura de pases sencillos y múltiples de soldaduras a tope es normalmente el agrietamiento en la raíz y/o entre cordones. Los esfuerzos térmicos son más altos después de depositar el primer paso. El factor de concentración de esfuerzos es generalmente mayor en la raíz que en el pie, por lo que se acentúa la aparición de grietas en la raíz a expensas del agrietamiento en el pie de la soldadura.

La formación de grietas en la raíz y entre cordones en la ZAC es esencialmente gobernada por los esfuerzos transversales σ_{net} a la soldadura encontrados con los cortantes transversales, los cuales a su vez son determinados por los esfuerzos internos y la resistencia del metal de aporte.

Puesto que la rigidez estructural en placas delgadas es muy baja como para causar esfuerzos internos estructural y transversal altos, para promover el agrietamiento en la ZAC, el agrietamiento en la raíz y entre cordones representa un riesgo potencial simplemente en placas de acero de alta resistencia de espesores que excedan los 30 mm. Esto aplica para aceros con una resistencia a la cedencia en un rango de 355 – 460 MPa, mientras que para aceros extra alta resistencia y con resistencia a la cedencia que excedan 600 MPa, el espesor crítico para que ocurra agrietamiento en la raíz y entre cordones, baja a 20 - 25 mm. Otro campo de la industria donde enfrentan este problema es en la soldadura circunferencial de tubería de conducción.

El rol de los esfuerzos transversales σ_{net} es decisivo en el caso del agrietamiento en raíz y entre cordones, y la concentración de esfuerzos en la raíz es relativamente simple para un modelo numérico y/o calcular analíticamente la geometría de la ranura, muchos de los métodos numéricos actuales pueden predecir temperaturas de precalentamiento seguras, para evitar completamente el agrietamiento.

5.3 Agrietamiento en el metal depositado.

Para aceros extra alta resistencia y con resistencia a la cedencia que excedan 600 MPa, o materiales semejantes en cuanto a la resistencia, el agrietamiento por hidrógeno en el metal depositado llega a ser de una forma predominante. Este agrietamiento ocurre longitudinal o transversal a la dirección de la soldadura, la orientación de la grieta depende de los huecos y ranuras y la dirección que controla los esfuerzos. En general, la susceptibilidad al agrietamiento por hidrógeno en el metal depositado aparentemente incrementa con la resistencia y el hidrógeno difundible en el metal depositado. Se deben tomar las consideraciones necesarias para evitarlo en particular cuando se trata de soldaduras a tope, de pases múltiples.

En el caso de soldaduras de pases simples, la preparación del bisel y la raíz misma, proporcionan una concentración de esfuerzos, con respecto a los esfuerzos transversales de la soldadura. Esto lleva al agrietamiento por hidrógeno en el metal depositado, el cual es un agrietamiento predominante en las soldaduras de tubería de conducción de alta resistencia, donde se pueden encontrar grietas, no solamente en soldadura de pase sencillo, sino también en la raíz de la soldadura de pases múltiples.

En el caso de soldaduras de pases múltiples de aceros de alta resistencia y placas relativamente gruesas y bajo esfuerzos térmicos, el agrietamiento por hidrógeno generalmente ocurre transversal a la dirección de la soldadura, creciendo a lo largo de su superficie o en una orientación a 45° en dirección al espesor de la soldadura depositada. Esta morfología es llamada grietas chevron. En esta forma de agrietamiento, los altos esfuerzos tensiles causan deslizamiento de las bandas para formar un ángulo de 45° en dirección del espesor de la soldadura y la concentración de una deformación plástica en el límite de grano de la ferrita proeutectoide, acoplado con el transporte de hidrógeno hacia estas regiones, originando la iniciación de la grieta, fig. 6.2.

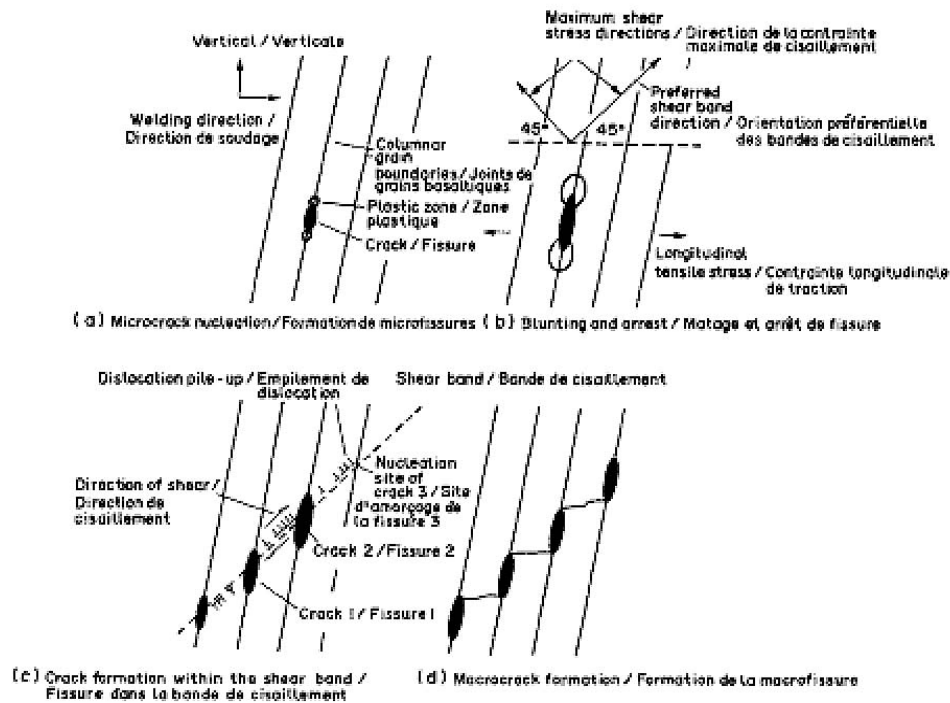


Figura 5.2. Mecanismo de formación de grietas chevron asociado con las bandas de dislocación de corte: a) nucleación de microgrietas, b) afilada y retenida, c) formación de grietas con bandas de corte, d) formación de macrogrieta^[11]

5.4 Características y apariencia del agrietamiento por hidrógeno en soldaduras

Las exámenes fractográficos han revelado que el agrietamiento por hidrógeno no está asociado con algún micro mecanismo identificado, pero el agrietamiento puede ocurrir de varios modos, por ejemplo, clivaje, quasi-clivaje, coalescencia de micro huecos o de forma intergranular a lo largo de los límites de grano de la austenita pobre. De acuerdo con la teoría de la microplasticidad en una "lattice ahead", la punta de la grieta es asistida y promovida por cualquier deformación microscópica. El modo de fractura en cuestión por lo tanto dependerá de:

- a) La microestructura de la soldadura,
- b) La intensidad de los esfuerzos en la punta de la grieta
- c) La concentración del hidrógeno

Una característica del agrietamiento por hidrógeno es que la fase de propagación de la grieta, usualmente incluye ambas morfologías de fractura, intergranular y transgranular. La más alta susceptibilidad al agrietamiento por hidrógeno se asocia tradicionalmente con el agrietamiento intergranular, y la más baja a la coalescencia de microhuecos, por ejemplo, formación de hoyuelos o poros. Con el incremento de la intensidad de esfuerzos, la transición de intergranular a clivaje/quasi-clivaje la coalescencia de microporos, ocurre en las primeras etapas de fractura, por ejemplo, un mecanismo de falla que involucra una insignificante plasticidad a aquella asociada con los altos niveles de deformación plástica. Investigaciones de superficie de fracturas agrietadas de especímenes, han revelado que la cantidad de área cristalina (semejando una fractura por clivaje/quasi-clivaje) incrementa con el contenido de carbono equivalente de la soldadura, y el esfuerzo.

Las grietas por hidrógeno pueden variar en longitud, normalmente de pocos micrones hasta varios milímetros. Las grietas pequeñas fácilmente escapan a la detección por métodos de ensayos no destructivos normales, tales como radiografía, partículas magnéticas y ultrasonido. En el caso de la soldadura de aceros extra alta resistencia las microgrietas pueden ser de varias décimas de mm hasta pocos milímetros, y pueden llegar a ser críticas desde el punto de vista de la integridad estructural del componente. El agrietamiento por hidrógeno en ensambles puede presentarse después como falla de manufactura o en servicio, por ejemplo, desgarre laminar (lamellar tearing), fatiga o fractura frágil.

5.5 Factores principales de control del agrietamiento inducido por hidrógeno en soldaduras ^[13]

De acuerdo con el conocimiento actual las tres principales causas de agrietamiento por hidrógeno en la soldadura han sido identificadas como:

- a) Concentración de hidrógeno en la soldadura lo suficientemente alta, generalmente expresada en términos de contenido de hidrógeno difundible inicial, H_D o H_O
- b) Microestructura susceptible, descrita normalmente en términos de fases microestructurales ferrita proectectoide (pro-eutectid GBF- grain-boundary ferrite) y/o la dureza del metal depositado HV ó la resistencia a la tensión R_M
- c) El nivel de esfuerzos tensiles residuales (axialmente) de la soldadura algunas veces asumido equivalente a la resistencia a la cedencia actual del metal depositado $R_{e(WM)}$

Como hemos visto anteriormente, las micro grietas por hidrógeno, aparecen en las soldaduras de pasos múltiples, cuando el contenido de hidrógeno excede cierto nivel crítico que depende de la resistencia del metal, espesor de la placa o soldadura depositada, y/o los esfuerzos residuales de la soldadura. Estas microgrietas tienden a localizarse mayormente debajo de la capa o cordón final de soldadura, es decir en la segunda o tercer capa donde el hidrógeno es más probable que se acumule y permanezca. Estas micro grietas pueden gradualmente extenderse en su longitud y crecer mas lejos en forma transversal a la soldadura.

6. AGRIETAMIENTO POR HIDRÓGENO EN ENSAMBLES SOLDADOS DE ACERO

La principal característica de este tipo de agrietamiento es que ocurre en aceros ferríticos y generalmente inmediatamente o después de un corto tiempo de haber soldado, pero usualmente dentro de las 48 horas siguientes.

6.1 Identificación

6.1.1 Apariencia visual del agrietamiento por hidrógeno

El agrietamiento por hidrógeno puede ser causado por o usualmente presenta las características siguientes:

- En aceros C-Mn, la grieta normalmente se origina en la zona afectada por el calor (HAZ) pero puede también extenderse hacia el metal depositado (soldadura) (fig. 6.1)
- Las grietas pueden también ocurrir entre cordones, normalmente transversales a la dirección de aplicación de la soldadura en un ángulo de 45° de la cara de la soldadura. Siguiendo un patrón recto o en zigzag
- En aceros de baja aleación las grietas pueden ser transversales a la soldadura, perpendiculares a la cara de la soldadura, pero no en forma de ramas sino en forma planar (Defecto Planar).

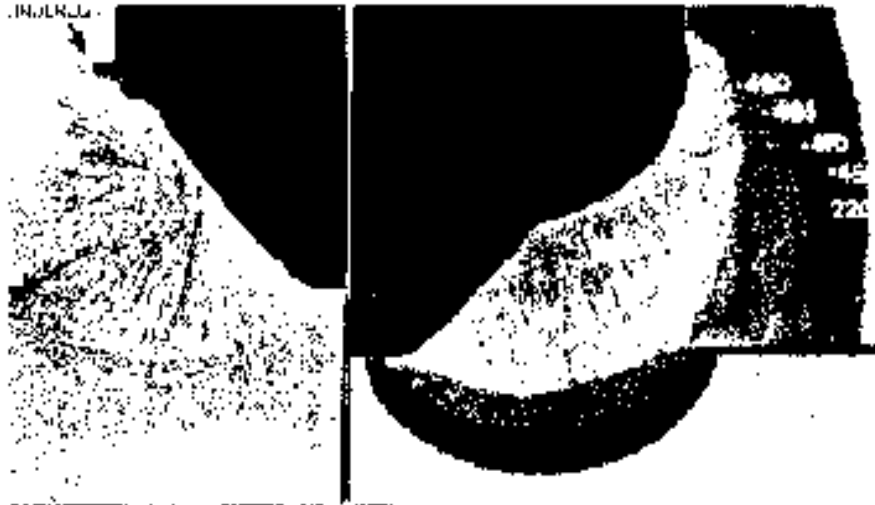


figura 6.1. Origen y apariencia típica de una grieta en una soldadura. Agrietamiento por hidrógeno a lo largo de la microestructura de grano grueso en la HAZ.

6.1.2 Metalografía

Las grietas que se originan en la ZAC, normalmente esta asociadas con la región de grano grueso, (fig. 6.1) las grietas pueden ser intergranular, transgranular o mixto. Las grietas intergranulares son mas fáciles de ocurrir en las estructuras duras de la HAZ formadas en aceros de alto carbono y baja aleación. El agrietamiento intergranular se observa mas comúnmente en estructuras de aceros C-Mn.

En soldaduras de filete, las grietas en la zona afectada por el calor son normalmente asociadas con la raíz de la soldadura y paralelas a esta. En soldaduras a tope las grietas en la HAZ son usualmente orientadas en paralelo al cordón de soldadura.

7.2 Posibles causas

Como se menciona anteriormente los factores que causan el HIC, el agrietamiento es causado por la difusión de hidrógeno en ensamblajes soldados

bajo esfuerzos o endurecidos. En aceros C-Mn, debido al mayor riesgo de formarse una estructura frágil en la ZAC, y la mayoría se localizan en el metal base. Usando un electrodo cuidadosamente seleccionado, el metal depositado tendrá un contenido de carbono mas bajo que el metal base y por lo tanto un carbono equivalente (CE) menor. Por lo tanto las grietas transversales al metal depositado pueden ocurrir en secciones gruesas.

En aceros baja aleación la microestructura del metal depositado es mas susceptible al agrietamiento que la ZAC, y este se puede presentar en los cordones de soldadura.

Los efectos de factores específicos en el riesgo de agrietamiento son:

- Hidrógeno en el metal depositado
- Composición del metal base
- Espesor del material base
- Esfuerzos actuando en la soldadura
- El calor de entrada (heat input)

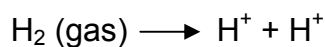
7.2.1 Hidrógeno en el metal depositado

El hidrógeno esta presente en los consumibles de soldadura y se introduce a esta cuando hay humedad presente en los fundentes. Esta humedad proviene de la atmósfera circundante y se difunde dentro del fundente del electrodo en el proceso de arco con electrodo revestido (SMAW), alambre de núcleo de fundente o en el fundente usado en el proceso de arco sumergido (SAW). El tipo de electrodo determina la cantidad de hidrógeno generado. Los electrodos básicos normalmente generan menos hidrógeno que los electrodos de rutilo y celulósicos. Es importante hacer notar que puede haber otras fuentes de hidrógeno por ejemplo la humedad de la atmósfera o la forma en que el material fue procesado o la historia del servicio nos da un acero con un nivel

significativo de hidrógeno. El hidrógeno puede también derivarse de la superficie del metal que se va a soldar o de los mismos consumibles. Las fuentes de hidrógeno incluyen:

- Aceite, grasa y suciedad
- Moho, oxido
- Pinturas y revestimientos
- Líquidos para limpieza

El hidrógeno puede también estar presente como moléculas de H₂O o en compuestos usados en la fabricación de recubrimientos o fundentes. Cuando se suelda en condiciones de poca limpieza, el hidrógeno puede también ser introducido cuando no se toman las debidas precauciones de limpieza, de aceite suciedad o grasa en la superficie del electrodo o de la pieza de trabajo. Cuando se produce el arco eléctrico bajo estas condiciones el hidrógeno puede introducirse rápidamente hasta el baño de soldadura y subsecuentemente al metal base. Las temperaturas presentes en el arco eléctrico son lo suficientemente altas para causar que las moléculas de hidrógeno se ionizen y disocien en átomos individuales de hidrógeno.



Siendo el hidrógeno un elemento de diámetro atómico relativamente pequeño, este puede fácilmente difundir dentro del baño de soldadura y metal base a través de los intersticios, cuando esta sujeta a altas temperaturas del arco eléctrico. La velocidad de difusión del hidrógeno incrementa cuando aumenta la temperatura. Ver figura 6.2.

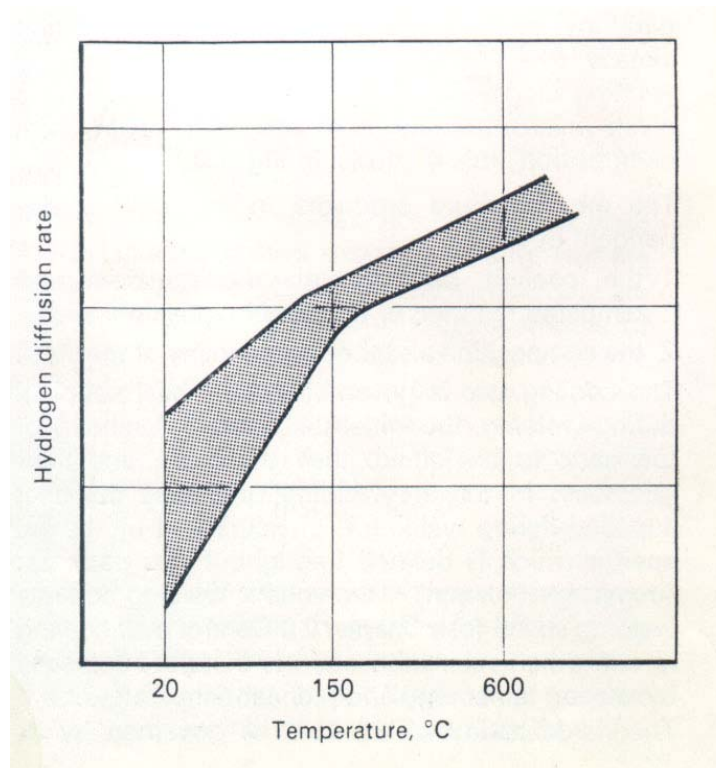


figura 6.2. Relación entre la velocidad de difusión de hidrógeno con respecto a la temperatura, en aceros. [5]

El hidrógeno atómico difundirá en las áreas con vacancias y se combinará con otros átomos de hidrógeno en orden según a la más baja Energía Libre de Gibbs. Estas formas de recombinación del hidrógeno molecular ocurren cuando el material es enfriado a temperatura ambiente. La ZAC es típicamente el área donde ocurre esta recombinación debido a las fluctuaciones térmicas que ocasiona el calentamiento y enfriamiento rápido durante la soldadura.

El hidrógeno molecular tiende a emigrar hacia los huecos del material donde forma pequeñas bolsas de gas, las cuales provocan áreas confinadas de alta presión. Como la cantidad de hidrógeno presente aumenta en estas áreas, la presión también se incrementa. En un intento por aliviar esta presión los huecos se expandirán hasta que la presión interna excede la del material. (figura 6.3) cuando esto ocurre da lugar a la formación de grietas en el

material alrededor de estos huecos, propagándose hasta que el efecto de la presión es abatido.

Una vez que las grietas han iniciado, estas pueden propagarse cuando se aplican esfuerzos de tensión. Las grietas pueden ser indetectables por inspección visual si ocurren en lo ancho del material, por lo cual no se propagan a la superficie. Las grietas internas son generalmente detectadas por técnicas de evaluación no destructiva. Sin embargo esto toma un tiempo considerable, después de la solidificación y enfriamiento a temperatura ambiente, para la formación de huecos o vacancias y bolsas de hidrógeno las cuales provocaran el agrietamiento.



figura 6.3. Origen y apariencia típica de una grieta en una soldadura ^[4]

Los aspectos fundamentales involucrados con la fragilización por hidrógeno fueron descritos anteriormente, sin embargo existe un amplio rango de variables que pueden contribuir al agrietamiento por hidrógeno para ciertos procesos de arco. La variable mas importante es el hidrógeno contenido en el fundente y en los consumibles de soldadura, los cuales inevitablemente provocaran la inducción del hidrógeno en el baño de soldadura. Otra variable que actúa en los procesos de soldadura de arco, tales como el GTAW, GMAW

y FCAW-G, es el tipo y cantidad de gases de protección utilizados. Para cada proceso, el gas de protección específico proporciona diferentes propiedades a la microestructura del metal depositado, penetración, tamaño de cordón y forma. El gas de protección también ayuda en la protección del baño metálico de las condiciones atmosféricas y esto ayuda a limitar el contenido de hidrógeno difusible. Las variables eléctricas tales como el voltaje, la corriente, el tiempo de arco y el calor de entrada (heat input) pueden también contribuir a la cantidad de hidrógeno presente en la soldadura. Por lo tanto cada una de estas variables de los proceso de arco fue examinada a fondo para determinar su efecto en el contenido de hidrógeno difusible en ensambles de acero soldados que provocan la fragilización por hidrógeno.

6.2.2 Composición del metal base

Tiene una gran influencia en la templabilidad, y en altas velocidades de enfriamiento el riesgo de formar microestructuras frágil en la Zona Afectada por el Calor (ZAC) es muy alto. La templabilidad de un material es normalmente expresada en términos del contenido de carbono o cuando otros elementos son tomados en cuenta en el valor del contenido de carbono equivalente.

A mayor contenido de carbono equivalente (CE), es mayor el riesgo de agrietamiento por hidrógeno. Generalmente los aceros con un valor de CE menor a 0.4, no son susceptibles al agrietamiento por hidrógeno en la ZAC cuando se utilizan consumibles y un proceso con bajo hidrógeno. Ver figura 6.4.

$$\text{Contenido de carbono equivalente} = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%Ni}{15} + \frac{\%Cr}{5} + \frac{\%Cu}{13} + \frac{\%Mo}{4}$$

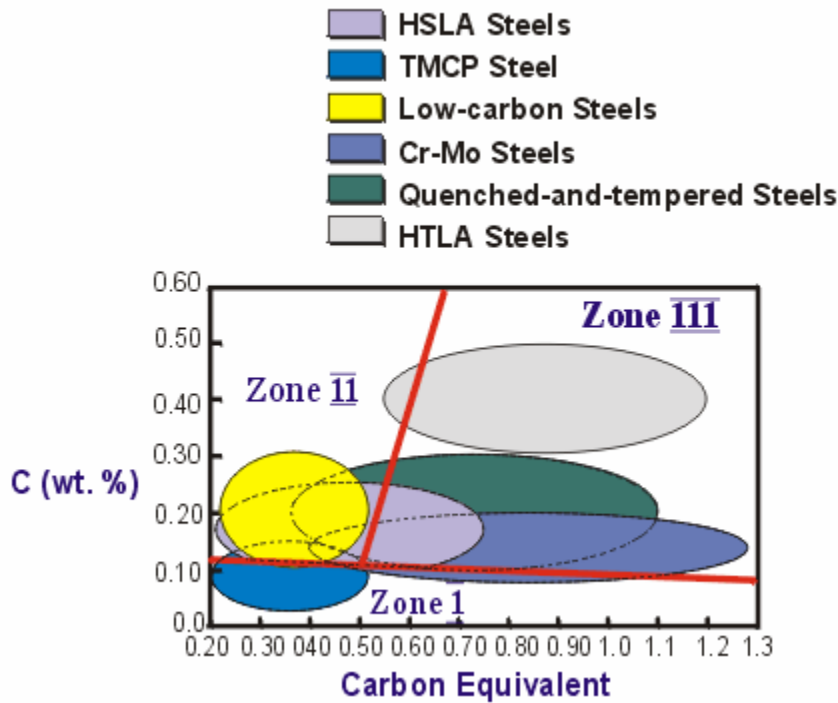


figura 6.4. Carbono equivalente de diferentes aceros ^[8].

6.2.3 Espesor del material

El espesor del material influye en la velocidad de enfriamiento y por lo tanto en el nivel de dureza, la microestructura de la ZAC y en nivel de hidrógeno retenido en el metal depositado.

En espesores de junta combinados o diferentes, por ejemplo, la suma de los espesores de los materiales de juntas alineadas junto con la geometría de la junta determinarán la velocidad de enfriamiento de la ZAC y su dureza. Consecuentemente como se muestra en la figura 6.5, una soldadura de filete tiene mayor riesgo que una soldadura a tope del mismo material.

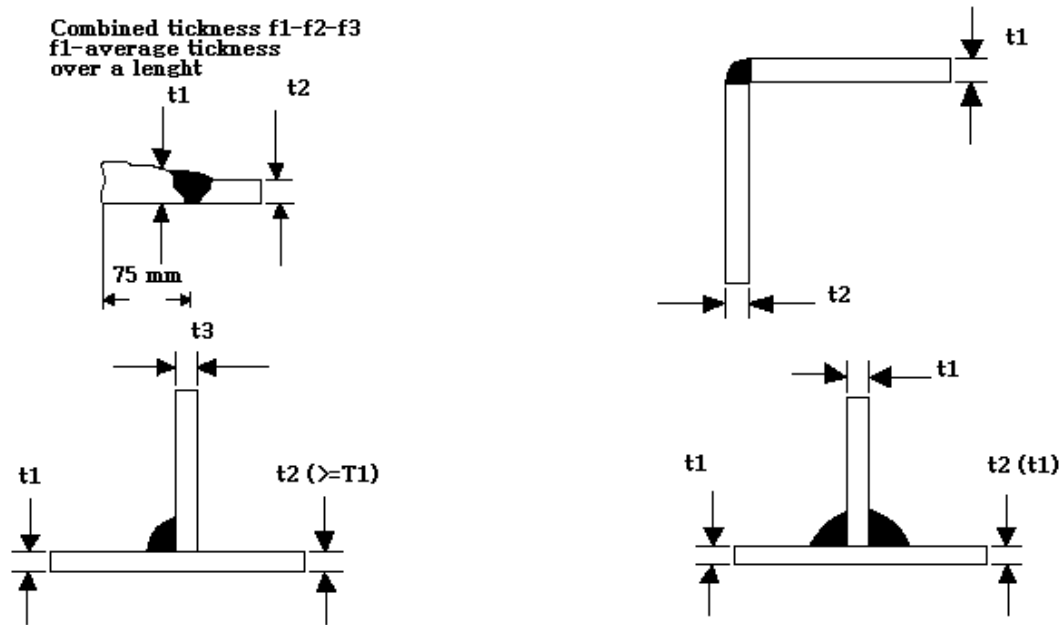


figura 6.5. Medidas de espesores combinados para juntas a tope y de filete (guía general solamente).

6.2.4 Esfuerzos actuando en la soldadura

Los esfuerzos generados transversales a la junta soldada, contracciones, mayormente influenciada por los esfuerzos térmicos, espesor del material, geometría de la junta y ajuste apropiado, las áreas de concentración de esfuerzos son mas propensos a que inicie una grieta en el pie y raíz de la soldadura.

Un ensamble deficiente en las soldaduras de filete incrementa el riesgo de agrietamiento. El grado de esfuerzos que actúan en una junta generalmente incrementa conforme la progresión de la soldadura, debido al incremento en la rigidez durante fabricación.

En las figuras 6.6, 6.7, 6.8 y 6.9 se observa la influencia de la temperatura en las dimensiones y esfuerzos durante la soldadura

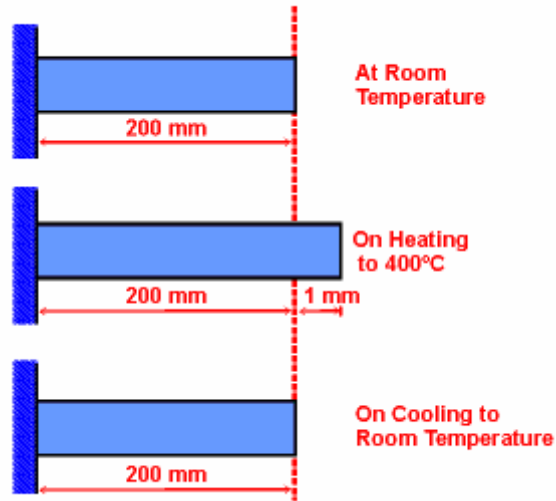


figura 6.6. Dilatación y contracción del material en función de la temperatura.

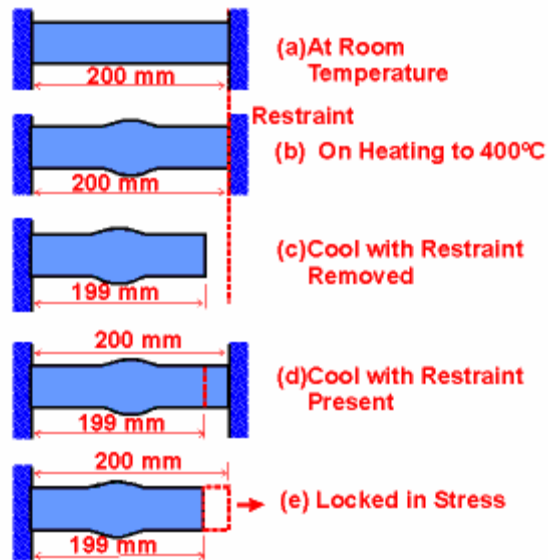


figura 6.7. Influencia de la temperatura en los esfuerzos internos de un material.

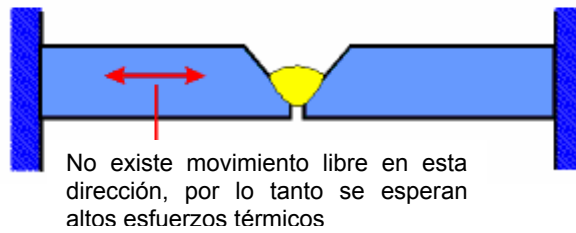


figura 6.8. Esfuerzos internos de un ensamble.

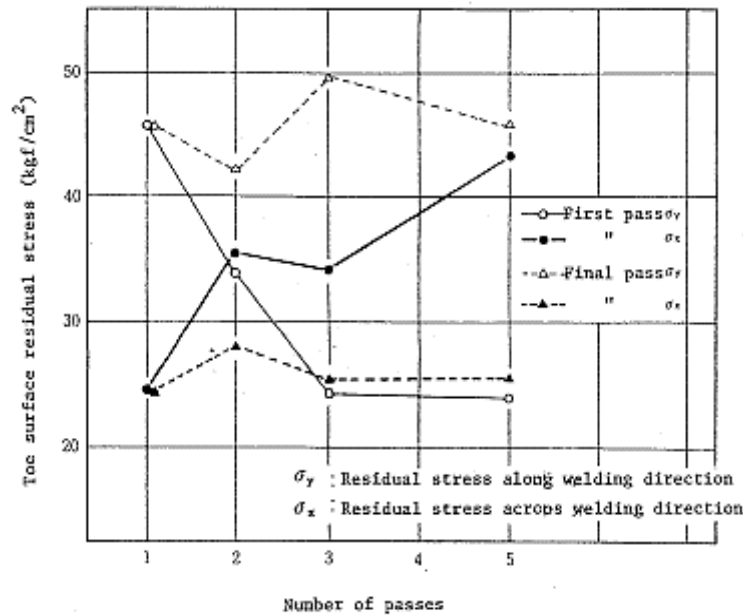


Figura 6.9, Efecto del número de pases de soldadura en los esfuerzos residuales en el pie de una soldadura de pases múltiples^[11]

El "heat input" de un material generado en un proceso de soldadura, junto con el espesor del material y la temperatura de precalentamiento, determinaran el ciclo térmico y la microestructura resultante así como la dureza en el material depositado y ZAC. Ver figura 6.10.

Un calor de entrada alto, reducirá los niveles de dureza.

$$\text{Heat input} = \frac{V \times A \times 60 \times k}{1000 \times S} = \text{KJ/mm}$$

El “heat input” por unidad de longitud es calculado multiplicando la energía del arco por un factor de eficiencia de arco de acuerdo con la formula anterior, donde:

V = voltaje del arco (volts)

A = corriente (amperes)

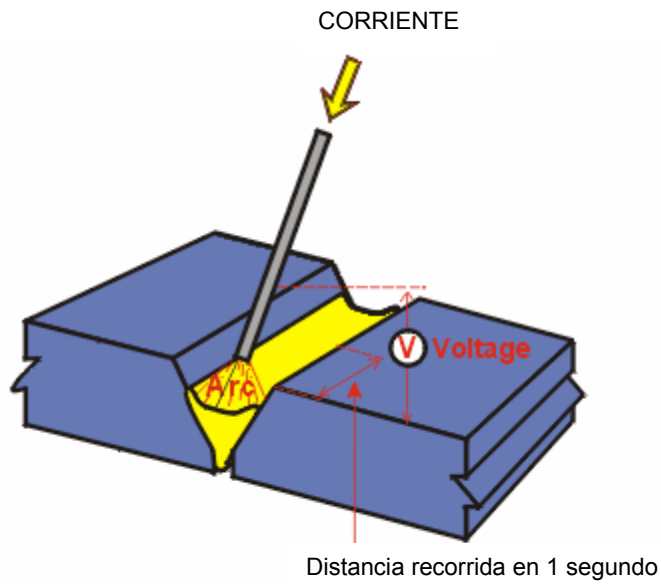
S = velocidad de avance (pulgadas por minuto)

k = factor de eficiencia térmica

Calculando el “heat input”, se debe considerar la eficiencia del arco. El factor de eficiencia del arco esta dado en BS EN 1011-1:1998 “Welding. Recommendations for Welding of Metallic Materials” para los procesos de arco principales y son:

| | |
|--|-----|
| Arco sumergido (alambre sencillo) | 1.0 |
| MMW (SMAW) | 0.8 |
| MIG/MAG y alambre con núcleo de fundente (GMAW/FCAW) | 0.8 |
| TIG y Plasma (GTAW y PAW) | 0.6 |

En el proceso SMAW el “heat input” se controla con la longitud del recorrido la cual es proporcional al “heat input”. La longitud de recorrido del electrodo es la longitud de metal depositado por un electrodo, la cual depende de la técnica de aporte (oscilación y avance).



$$\text{Heat input} = \frac{V \times A \times 60 \times k}{1000 \times S} = \text{KJ/mm}$$

Figura 6.10. Representación del “heat input” (calor de entrada).^[8]

7. ESTUDIOS SOBRE LA INFLUENCIA DE LOS PARÁMETROS DE SOLDADURA EN LA FRAGILIZACIÓN POR HIDROGENO

7.1 Electroodos ^[9]

Uno de los principales parámetros de soldadura en los proceso de arco con gran influencia es el electrodo. En el proceso de soldadura de arco con electrodo revestido, el núcleo sólido del electrodo esta cubierto por una mezcla de silicatos y polvo de diferentes materiales. Generalmente los electrodos son puestos en un horno para secar el fundente. Este revestimiento es una fuente de estabilizadores del arco, gases que desplazan el aire, metal y escoria para protección, apoyo y aislamiento del metal depositado. Existe una amplia variedad de electrodos en el mercado y cada una tiene propiedades específicas relacionadas con el electrodo tanto el núcleo de metal como el recubrimiento de fundente.

Algunos electrodos se clasifican como “bajo hidrógeno” donde inicialmente contienen baja cantidad de hidrógeno después de la fabricación. Sin embargo después de la fabricación los electrodos pueden ser contaminados si tuvieron contacto con suciedad, aceite o grasa, esto puede ocasionar la Introducción de hidrógeno en el fundente por lo tanto es recomendable descartar estos electrodos. Cuando los electrodos son colocados en una atmósfera húmeda, el hidrógeno puede también ser absorbido por el fundente. Una practica utilizada para bajar el contenido de hidrógeno es utilizar los electrodos inmediatamente después de abrir el contenedor sellado herméticamente, si estos no son utilizados inmediatamente y fueron expuestos a la atmósfera por un tiempo excesivo, puede ocasionar que el fundente absorba un exceso de hidrógeno, cuando esto sucede los electrodos deben almacenarse en un horno a 120 °C. Si los electrodos han sido expuestos a humedad estos deben ser secados en un horno a una temperatura de 35 –375 °C por una hora y después mantenerlos a 125 °C. Calentando hasta esta temperatura permitirá al

hidrógeno salir del fundente. Estas practicas subsecuentemente reducirán el contenido de hidrógeno en el electrodo mismo. Los electrodos bajo hidrógeno del proceso SMAW , por ejemplo deben ser almacenados a 250° F de acuerdo a AWS D1.1 “Structural Welding Code – Steel 2004” y tienen un tiempo exposición a la atmósfera permisible arriba de 9 horas antes de que se requiera rehornear. La figura 7.1 nos indica la importancia del tiempo de exposición al ambiente de un electrodo bajo hidrogeno.

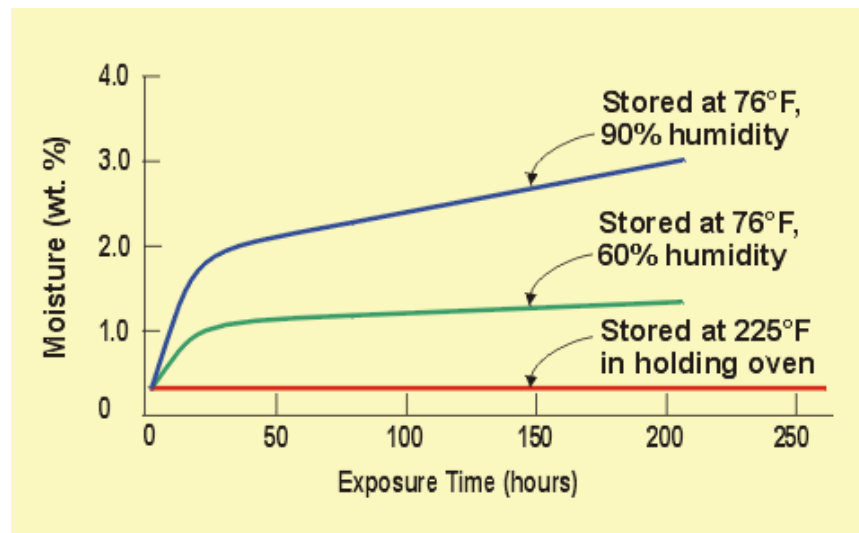


Figura 7.1. Relación de porcentaje de humedad y tiempo de exposición de electrodos bajo hidrógeno ^[8].

7.1.1 Electrodo para el proceso FCAW-G ^[5]

El proceso de soldadura de arco núcleo de fundente con gas de protección (FCAW-G) , a sido utilizado por muchos años, sin embargo el principal cuestionamiento que aun existe es si este proceso tiene la capacidad de producir soldaduras sanas para aplicación de ensambles de alta integridad, aun cuando este proceso ofrece ventajas económicas debido a la alta velocidad de deposito. Uno de las mayores consideraciones, cuando se suelda aceros de alta resistencia, con este proceso, es el contenido potencial de hidrógeno difundible en los electrodos. Existen algunos cuestionamientos

considerando el contenido de humedad de varios tipos y clasificación de electrodos para FCAW-G especialmente después de ser expuestos a la atmósfera. Se han realizado pocos estudios para establecer el efecto de la clasificación del electrodo, uso, absorción de humedad y de los parámetros de soldadura en el contenido de hidrógeno difundible en la soldadura depositada.

El hidrógeno también está presente en el alambre de núcleo de fundente, este proceso puede ser operado de dos formas, con protección y auto protegido, es decir se puede utilizar o no gas de protección. Los fundentes contienen minerales, ferro aleaciones, materiales que forman un gas de protección, desoxidantes, y materiales formando escoria.

En un estudio profundo del contenido de hidrógeno difundible en el alambre de núcleo de fundente hecho por Harwig, Longenecker y Cruz ^[9]. En dicho estudio se probaron diferentes tipos de electrodos para el proceso FCAW-G bajo varias condiciones de soldadura. Antes del estudio, hicieron mediciones con dos electrodos E71T-1 los cuales fueron expuestos a condiciones atmosféricas en un tiempo de una semana. Para un electrodo, el contenido de hidrógeno se duplicó de 4mL/100g a 8mL/100g, mientras que el otro incremento de 8 – 27mL/100g. Esto fue similar para electrodos para el proceso SMAW, esto muestra que el hidrógeno puede difundir en el electrodo a temperatura ambiente en un factor de 2-3 en un tiempo de una semana. Por lo tanto es importante seguir las recomendaciones de los fabricantes en cuanto al manejo y almacenamiento cuando el agrietamiento por hidrógeno es un riesgo.

Conociendo la importancia del manejo y uso apropiado de los electrodos podemos establecer los resultados del estudio de la influencia de los parámetros de soldadura del proceso FCAW-G en la fragilización por hidrógeno como sigue ^[6]:

1. Determinar el efecto de los parámetros de soldadura en el contenido de hidrógeno difundible en depósitos de soldadura utilizando el proceso FCAW-G.
2. Desarrollar un procedimiento para calcular el efecto de la exposición del electrodo para FCAW-G a la atmósfera en el contenido de hidrógeno difundible en la soldadura depositada.
3. Desarrollar un procedimiento para calcular el efecto de la exposición del electrodo para FCAW-G a la atmósfera en el contenido de hidrógeno difundible para un número de electrodos de acero y Cr-Mo.

Después de colocar los electrodos de prueba dentro de una cámara de aire húmedo forzado por un periodo de una semana, el efecto de los parámetros de soldadura, se realizó utilizando tres diferentes velocidades de alimentación del electrodo y tres diferentes distancias de contacto (stick-out), para cada velocidad de alambre. El gas de protección usado fue 80% Ar – 20% CO₂. La longitud del arco fue mantenida constante a ¼ de pulgada. Se evaluó la importancia del contenido de hidrógeno en función de la corriente, velocidad de alimentación del alambre y distancia de trabajo del tubo de contacto. Se realizaron exámenes en el metal depositado, el total del metal fundido y el contenido de hidrógeno difundible fue medido utilizando cromatografía de gas. Se encontró que el contenido de hidrógeno difusible se incrementa casi linealmente cuando se aumenta la corriente. Los resultados de estos trabajos se presentan abajo en la tabla 7.1.

Cuando se tuvo un calor de entrada (heat input) alto se encontró que el contenido de hidrógeno difusible en la soldadura es tolerable, debido a que la microestructura no es de dureza alta, y puede difundir mayor cantidad de hidrógeno fuera de la soldadura durante un enfriamiento lento.

| TTW (in.) | WFS (in./min) | TS (in./min) | TIEMPO EN COLUMNA (S) | Avg. 1 (A) | Avg. V (V) | CALOR ENTRADA (KI/in.) | HIDRÓGENO DIFUSIBLE (ml-100g) | AREA FUNDIDA (mm ²) | AREA DE DEPOSITO (mm ²) |
|--------------|------------------|-----------------|-----------------------------|---------------|---------------|------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|---|
| ½ | 250 | 7 | 0.06 | 226 | 29.3 | 56.8 | 6.2 | 45 | 32 |
| ½ | 350 | 10 | 0.042 | 293 | 33.8 | 59.4 | 8.8 | 52 | 40 |
| ½ | 450 | 13 | 0.033 | 345 | 38.5 | 61.3 | 11.6 | 65 | 40 |
| 7/8 | 250 | 7 | 0.15 | 179 | 27.9 | 42.8 | 3.8 | 38 | 26 |
| 7/8 | 350 | 10 | 0.107 | 240 | 32.1 | 46.2 | 4.3 | 45 | 33.5 |
| 7/8 | 450 | 13 | 0.083 | 275 | 37.2 | 47.2 | 7.6 | 49 | 30 |
| 1¼ | 250 | 7 | 0.24 | 140 | 27.0 | 32.4 | 2.3 | 38 | 33 |
| 1¼ | 350 | 10 | 0.171 | 200 | 30.2 | 36.2 | 4 | 43 | 32 |
| 1¼ | 450 | 13 | 0.133 | 247 | 35 | 39.9 | 5.4 | 47.5 | 33 |

Condiciones fijas:

80% Argon- 20% CO₂ a 40 ft³ /h
 Longitud de arco: ¼ -in (6.35-mm)
 DCEP
 Angulo de trabajo: 10-deg-(0.1745-rad.)
 Diámetro de boquilla de gas ¼ -in (19.05mm)
 Diámetro del alambre: 0.045-in (1.14-mm)

TTW= Tubo de Contacto para Trabajo
 WFS= Velocidad de Alambre
 TS= Velocidad del recorrido
 19-g Deposito en Peso promedio

Tabla 7.1 Parámetros de soldadura para las pruebas de difusión del hidrógeno en electrodos E71T-1 [4].

El efecto de los gases de protección en el contenido de hidrógeno difusible utilizando alambre con núcleo de fundente fueron examinados por Mirza y Gee [5]. Los gases de protección en general proporcionan un medio de protección del baño de soldadura de las condiciones atmosféricas. Esto también ayuda en las características de operación, velocidades de depositación, forma del cordón, composición química del depósito y propiedades de la soldadura. Los electrodos que fueron utilizados en este estudio fueron de núcleo sólido, núcleo de metal y núcleo de fundente. Estos fueron probados en combinación con diferentes gases de protección. Previo a la soldadura las piezas fueron desgasificadas a 650° C por una hora bajo un flujo constante de argón para

prevenir la oxidación. El análisis de hidrógeno fue hecho utilizando cromatografía de gases. Los resultados del trabajo para los electrodos de núcleo sólido y de metal son listados en la tabla 7.2, donde el contenido de hidrógeno difusible es con respecto a los 5 diferente tipos de gas y mezclas de protección mas populares (Ar puro, Ar-5% CO₂, Ar-20% CO₂ y Ar-2% O₂).

| | HIDROGENO DIFUNDIBLE mL/100g | | | | |
|------------------------------------|-------------------------------------|----------------------|-----------------------|-----------------|---------------------|
| | Ar | Ar-5%CO ₂ | Ar-20%CO ₂ | CO ₂ | Ar-2%O ₂ |
| ALAMBRE SÓLIDO | | | | | |
| PRUEBA 1 | 1.86 | 1.51 | 1.32 | 0.78 | 1.88 |
| PRUEBA 2 | 1.88 | 1.61 | 1.26 | 0.84 | 2.31 |
| PRUEBA 3 | 2.00 | 1.32 | 1.36 | 0.91 | 1.93 |
| PRUEBA 4 | 1.67 | 1.58 | 1.21 | 0.88 | 1.91 |
| Medio HD | 1.85 | 1.51 | 1.29 | 0.85 | 2.01 |
| SD* | 0.12 | 0.11 | 0.06 | 0.05 | 0.18 |
| ALAMBRE METALICO RECUBIERTO | | | | | |
| PRUEBA 1 | 8.93 | 8.12 | 5.67 | 3.86 | 10.21 |
| PRUEBA 2 | 9.02 | 8.71 | 5.69 | 3.91 | 8886 |
| PRUEBA 3 | 9.32 | 9.32 | 5.86 | 3.80 | 9.31 |
| PRUEBA 4 | 10.62 | 9.11 | 5.58 | 3.23 | 8.99 |
| Medio HD | 9.47 | 8.82 | 5.70 | 3.70 | 9.34 |
| SD* | 0.68 | 0.46 | 0.17 | 0.27 | 0.53 |

*DESVIACIÓN ESTÁNDAR

Tabla 7.2 Resultados obtenidos sobre el efecto del gas de protección en el contenido de hidrógeno difusible ^[4].

Los resultados muestran que el contenido de hidrógeno difusible es mas bajo cuando se suelda con CO₂ puro. El dióxido de carbono también tiene efecto en la penetración y en la forma del cordón de soldadura. En los gases de protección compuestos por mezcla de CO₂ y Argón, se determinó que la presencia de CO₂ tiende a desplazar el hidrógeno de las regiones mas calientes del arco donde la absorción del hidrógeno es mayor, de este modo disminuye la cantidad total de hidrógeno que entra al baño de soldadura.

Mirza y Gee ^[5] también utilizaron el efecto de los parámetros de soldadura en electrodos con núcleo de fundente de rutilo. En esta parte del estudio, se utilizaron dos tipos de gas de protección: CO₂ puro y Ar-20%CO₂. Ellos se interesaron en entender el efecto del gas de protección con diferente calor de entrada y modos de transferencia. Los resultados se muestran en la tabla 7.3.

*DESVIACIÓN ESTÁNDAR

| Corriente A | Voltaje V | Stick out mm | Velocidad de alimentación del Alambre m•min ⁻¹ | Tiempo de arco | SD* | Medio HD mL/100g |
|-------------------------|--------------|-----------------|---|-------------------|------|---------------------|
| Ar – 20 CO ₂ | | | | | | |
| 200 | 26 | 15 | 8-0 | 63 | 0-97 | 8-17 |
| 200 | 27 | 20 | 10-5 | 40 | 1-09 | 6-36 |
| 200 | 26 | 25 | 11-0 | 35 | 0-62 | 4-59 |
| 160 | 26 | 20 | 7-0 | 40 | 0-52 | 4-82 |
| 260 | 26 | 20 | 13-5 | 28 | 0-86 | 7-25 |
| 200 | 22 | 20 | 9-0 | 56 | 0-48 | 4-50 |
| 200 | 30 | 20 | 9-1 | 52 | 0-90 | 6-89 |
| 200 | 34 | 20 | 9-2 | 49 | 1-01 | 10-36 |
| CO ₂ | | | | | | |
| 200 | 26 | 15 | 8-2 | 53 | 0-78 | 5-93 |
| 200 | 26 | 20 | 10-5 | 38 | 0-69 | 5-00 |
| 200 | 26 | 25 | 11-5 | 36 | 0-36 | 3-12 |
| 160 | 26 | 20 | 7-5 | 40 | 0-48 | 3-07 |
| 260 | 26 | 20 | 14-5 | 27 | 1-22 | 6-64 |
| 200 | 22 | 20 | 10-1 | 49 | 0-41 | 4-17 |
| 200 | 30 | 20 | 9-7 | 46 | 0-85 | 5-33 |
| 200 | 34 | 20 | 9-2 | 44 | 0-90 | 6-05 |

Tabla 7.3 Resultados de los efectos de los parámetros de soldadura de arco en el contenido de hidrogeno difusible ^[4]

En este estudio se observó que los niveles mas bajos de hidrógeno se obtuvieron cuando se soldó con CO₂ puro, y que los resultados con el electrodo de núcleo sólido y metal fueron similares. También se observa que el contenido de hidrógeno incremento cuando se aumento el voltaje y la corriente

así como cuando se aumento el stick-out, misma observación hecha por otros autores ^[12, 13]. En el estudio se demostró que a niveles mas altos de CO₂ , la caída de la gota (droplet) llega a ser mas globular en su forma, donde se absorbe menos hidrógeno de la atmósfera a la soldadura; de este modo, evitando que menos cantidad de hidrógeno entre al baño de soldadura. (figura 7.2)

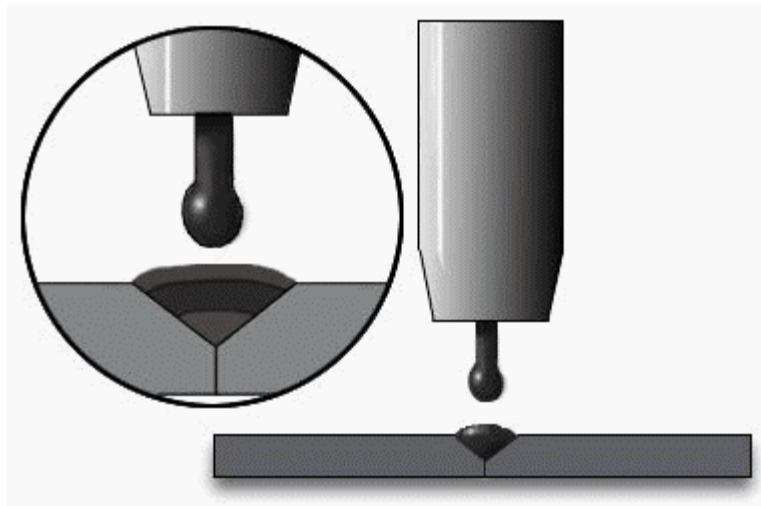


Figura 7.2. Ilustración esquemática de la transferencia globular en la alimentación del alambre ^[4].

Otro estudio similar, a los gases de protección, realizado por otros autores, ^[6,17] se enfoca al control del nivel de hidrógeno en soldaduras de acero inoxidable duplex utilizando los procesos GTAW (Gas Tungsten Arc Welding) y GMAW (Gas Metal Arc Welding), se reconoció que el gas de protección puede tener un efecto en la cantidad de hidrógeno que puede introducirse al baño metálico. Cuando el gas es suministrado por el fabricante, hay un máximo nivel de humedad garantizado de 10 ppm, pero en general este contenido de humedad se incrementa con el contenido de humedad de la atmósfera circundante durante las operaciones de soldadura. Esto nos da una idea de la cantidad de hidrógeno difundible que puede estar presente. Este es un inevitable factor que existe, y una cantidad de hidrógeno presente a considerar cuando soldamos con procesos que no utilizan fundente tal como el GMAW y GTAW. En este

estudio, los parámetros de soldadura tales como la corriente, el voltaje y la velocidad de flujo de gas fueron mantenidos constantes mientras sólo varío la velocidad de avance, la cual afecta el calor de entrada (heat input). Se observó que cuando se soldó el acero inoxidable duplex con proceso GTAW y mezcla de gas de protección Ar-2% H₂, es decir, altos niveles de hidrógeno presente, ocurrió un agrietamiento inevitable debido al hidrógeno. En el proceso GMAW se utilizaron mezclas de Ar-2% O₂ y Ar-2% CO₂ y se encontró que estos gases tienen menor efecto en el nivel de contenido de hidrógeno a diferente calor de entrada. Contrariamente a los resultados de los estudios del efecto de los gases en el proceso FCAW, este mostró que el contenido de hidrógeno difundible disminuye cuando se incrementa la corriente en electrodo sólido, proceso GMAW. Esto concluye que niveles bajos de hidrógeno, medidos con alto calor de entrada, podría ser debido a mayores tiempos del metal depositado en la fase de ferrita delta, lo cual da tiempo para que el hidrógeno difunda hacia fuera del metal depositado.

Otra investigación ^[9] con el objetivo de determinar el efecto de los parámetros de soldadura en los resultados del contenido de hidrógeno difundible en pruebas según AWS A4.3-93 “Standard Methods for Determination of the Diffusible Hydrogen Content of martensitic, Bainitic and Ferritic Steel Weld Metal Produced by Arc Welding” para electrodos FCAW-G; consistió en lo siguiente:

Se desarrollaron procedimientos de prueba de exposición a la atmósfera y se evaluaron de acuerdo a un procedimiento en aceros al carbono y electrodos Cr-Mo FCAW-G. Se estudio la resistencia a la humedad de E71T1, E70T-1, E71T-5 y ER70S-3 electrodos de acero al carbono y E81T-B2, E91T-B3 y E80C-B2 aceros Cr-Mo, realizando una prueba de exposición a la atmósfera. Se utilizaron tres diferentes velocidades de alimentación de alambre y tres distancias de trabajo y tubo de contacto para estudiar los efectos de la corriente y la extensión del electrodo en el contenido de hidrógeno difundible

en un electrodo E71T-1. El voltaje y la velocidad del alambre fueron ajustadas para mantener una longitud del arco constante de $\frac{1}{4}$ " (6.35 mm) y una área de depósito, respectivamente. Se encontró que el hidrógeno difundible contenido en el metal depositado se incrementa casi linealmente cuando se incrementa la corriente para el electrodo E71T-1. El contenido de hidrógeno difundible se incrementa de 2.3 mL/100g a 140 amperes, hasta aproximadamente 11.6 mL/100g a 345 Amperes. Contrario a lo publicado en alguna literatura, el efecto de la extensión del electrodo fue pequeño a una corriente constante y una longitud de arco con este electrodo. Incrementando la distancia entre el tubo de contacto y la pieza de trabajo disminuye la corriente y por lo tanto, el contenido de hidrógeno difundible a una velocidad del alambre constante. El contenido de hidrógeno difundible en el metal depositado disminuye con el incremento del tiempo en la columna de extensión del electrodo. El contenido de hidrógeno difundible fue mayor en soldaduras depositadas con una mayor distancia entre el tubo de contacto y la pieza de trabajo cuando se compararon las pruebas que se realizaron a igual tiempo en la columna de extensión del electrodo. El resultado convincente es, a mayor velocidad de alimentación del alambre cambia el perfil de la temperatura en la extensión del electrodo.

La prueba de exposición a la atmósfera evaluó la resistencia a la humedad de varios electrodos de acero al carbono y Cr-Mo FCAW-G de diferentes proveedores. La prueba usada fue una capa sencilla de electrodo que fue cuidadosamente enrollada en un carrete de alambre pintado. El carrete fue expuesto a en una cabina de aire forzado húmedo. Se continuo con la prueba soldando con dichos electrodos tal como se recibieron y después de una semana de exposición. La exposición al ambiente fue controlada a 80°F (27°C) y 80% de humedad relativa. Los parámetros de la cabina de humedad fueron basados en la prueba de humedad absorbida como se describe en AWS 5.1-91 "Specification for carbon steel electrodes for Shielded Metal Arc Welding" secciones 16.2 a 16.6 electrodos para SMAW. Todas las pruebas de difusibilidad del hidrógeno fueron hechas usando cromatografía de gas según

AWS A4.3-93. Los electrodos para FCAW-G se encontró que son susceptibles a la humedad del medio ambiente. Para los mismos electrodos hubo alguna variación en cuanto al contenido de hidrógeno difundible en consumibles suministrados por diferentes fabricantes. Por ejemplo el contenido de hidrógeno difundible de E71TT-1, después de una semana de exposición incremento de 4 a 8 mL/100 g para un electrodo, e incremento de 8 a 27 mL/100 g para otro. Basados en estos resultados, los rangos de almacenaje y operación dados por los fabricantes para producir depósitos de soldadura de bajo hidrógeno pueden ser seguidos cuidadosamente cuando se esta en riesgo de agrietamiento inducido por hidrógeno. El electrodo deberá ser utilizado en los rangos recomendados por el proveedor o con las corrientes mas bajas para minimizara el hidrógeno difundible. Se necesita establecer el manejo de guías y procedimientos de pruebas de exposición atmosférica para el control de hidrógeno en ensambles soldados con FCAW-G de alta integridad.

El agrietamiento asistido por hidrógeno es también un problema en los aceros de alta resistencia utilizados en recipientes a presión, tuberías y estructuras. La susceptibilidad de una soldadura al agrietamiento por hidrógeno esta en función del contenido de hidrógeno, la dureza y microestructura en la zona afectada por el calor, temperatura de servicio y de la resistencia de la soldadura. Para prevenir el agrietamiento por hidrógeno muchos fabricantes usan electrodos de bajo hidrógeno, precalentamiento para reducir la velocidad de enfriamiento y promover la difusión de hidrógeno, y en algunos casos tratamiento térmico post soldadura para mejorar la microestructura y estabilizar la difusión de hidrógeno. Los códigos y especificaciones de soldadura indican los requerimientos para el control de hidrógeno en la soldadura, esto es controlando los consumibles, el precalentamiento, temperatura de interpasos y tratamiento térmico post soldadura (PWHT) para reducir el riesgo de agrietamiento por hidrógeno. De este requerimiento el control de los consumibles es critico para bajar a cierto nivel de hidrógeno difusible, dependiendo del proceso de soldadura. Algunos códigos también especifican

requerimientos para el “heat input” y la dureza en la Zona Afectada por el Calor para controlar la microestructura.

Durante este estudio se obtuvieron los resultados siguientes:

- a) Determinar el efecto de los parámetros de soldadura en el contenido de hidrógeno difundible en depósitos de soldadura por proceso FCAW-G
- b) Desarrollar un procedimiento para valorar los efectos de la exposición a la atmósfera del electrodo en depósitos de soldadura para el proceso FCAW-G
- c) Determinar los efectos de la exposición a la atmósfera de electrodos de acero al carbono y Cr-Mo en depósitos de soldadura para el proceso FCAW-G.

Se evaluaron electrodos de acero al carbono y baja aleación (Cr-Mo) los utilizados previamente en la soldadura de un recipiente a presión. Se desarrollo un procedimiento para la prueba de exposición, para definir la geometría de la muestra apropiada, condiciones de la prueba (tiempo, temperatura y humedad) y documentación. Se espera que estos datos ayuden a desarrollar guías de manejo de parámetros de soldadura, limites de exposición a la atmósfera y procedimientos para pruebas de exposición de electrodos FCAW-G, y por supuesto mejorar el control de hidrógeno en ensambles de alta integridad.

El efecto de los parámetros de soldadura fueron evaluados conduciendo una serie de pruebas, utilizando tres velocidades de alimentación de alambre diferentes. Cada prueba fue realizada a tres distancias pieza-tubo de contacto diferentes. El tamaño de la soldadura depositada fue mantenido constante en la relación velocidad de alambre- velocidad de avance. La longitud del arco fue también constante a $\frac{1}{4}$ de pulgada (6.35 mm). El control de estos puntos, fue llevado a cabo para evaluar la influencia de la corriente, distancia tubo de contacto-pieza de trabajo y velocidad de alimentación del alambre en el

contenido de hidrógeno difundible en la soldadura. El hidrógeno en el metal depositado fue reportado por unidad depositada y peso fundido para evaluar los efectos de penetración de la soldadura a altas corrientes.

La soldadura fue realizada utilizando una fuente de poder Lincoln DC-1000, el tipo de corriente fue directa electrodo al positivo. La pistola usada es del tipo enfriada con agua. Se utilizó una mezcla de 80% Ar – 20% CO₂ , el punto de humedad de la mezcla fue mantenido abajo de –60° C. Se utilizo equipo calibrado para medir el voltaje, amperaje y velocidad de alambre.

La tabla 7.1 indica para un electrodo E71T1, de 0.045 pulgadas para evaluar el efecto de los parámetros en el contenido de hidrógeno difusible en la soldadura, tres velocidades de alimentación de alambre (WFS) y tres distancias tubo de contacto-pieza de trabajo (TTW) para evaluar el efecto de la corriente y la extensión del electrodo en el contenido de hidrógeno difusible de un electrodo de acero al carbono. La extensión del electrodo es la diferencia entre el tubo de contacto- pieza de trabajo, y la longitud de arco y representa la región I²R donde ocurre el precalentamiento. En la extensión del electrodo se cree que el hidrógeno es evaporado del alambre. Una típica TTW utilizada es ¾ de pulgada, para un diámetro de alambre de 0.045 pulg. para esta investigación se probaron distancias tubo de contacto-pieza de trabajo de ½, 7/8 y 1 ¼ pulgadas. A una constante extensión del electrodo, el tiempo en la columna es determinado dividiendo la extensión del electrodo entre la velocidad del alambre. Las altas corrientes (I) típicamente producen alto contenido de hidrógeno difundible debido a que el tiempo en la columna disminuye. El voltaje (V) y la velocidad de avance (VA) fueron ajustados para mantener una longitud de arco constante de ¼ de pulgada el área depositada, respectivamente. El calor de entrada (Heat Input) fue calculado por la formula

$$HI = (V \times I \times 60) / VA$$

Las pruebas de hidrógeno difusible fueron realizadas de acuerdo con el AWS A4.3-93. los cupones fueron hechos de ½ x 1 x 4 pulgadas de espesor de acero SA- 36. Estos especímenes fueron prehornados a 530 °C por una hora para remover todo el hidrógeno residual en el material base. El peso de cada espécimen fue medido antes y después de la prueba de hidrógeno difundible. Los especímenes se mantuvieron en “jaws” de cobre enfriados por agua. La soldadura fue hecha transversal a la superficie del espécimen de 1 x 4 pulgadas, inmediatamente después, enfriada con agua. La escoria fue retirada usando cepillo de alambre, el espécimen fue colocado en nitrógeno líquido para inhibir la pérdida de hidrógeno. El hidrógeno difundible fue medido usando cromatografía de gases utilizando un “OY” analizador de hidrógeno. La exactitud de la prueba usando este enfoque, ha sido reportado que es aproximadamente de ± 1 mL/100g. Se realizaron cuatro soldaduras para cada condición de prueba. Estas cuatro muestras fueron colocadas en el analizador de hidrógeno el tiempo y temperatura de difusión fue de 150 °C por 6 horas. Los resultados fueron reportados como peso depositado (DW) y fundido (FW). El peso fundido fue determinado midiendo el depósito y el área del “nugget” (NA) en una sección transversal metalográfica y usando la fórmula siguiente:

$$FW = (NA/DA) \times DW$$

El número de electrodos de acero al carbono y baja aleación que fueron utilizados en pruebas de exposición atmosférica se muestran en la tabla 7.2. Estos electrodos fueron adquiridos de diversos fabricantes para evaluar la susceptibilidad de los electrodos FCAW-G de diferentes fuentes de exposición atmosférica. De los electrodos de acero al carbono, varios electrodos de rutilo E71T-1 fueron comparados con un electrodo básico E71T-5. Los electrodos de acero baja aleación fueron del tipo Cr-Mo. Cuatro de los cinco electrodos Cr-Mo fueron de núcleo de fundente (E80C-B2) y uno sólido para GMAW (ER70S-3) para ver si un alambre sólido no es susceptible a la humedad, comparado con el electrodo de núcleo de fundente. La prueba de exposición atmosférica fue hecha cuidadosamente colocando capas sencillas de electrodos al viento,

en canastillas de alambre pintadas. Las canastillas pintadas utilizadas, es para inhibir el oxido de el alambre de la canastilla misma y evitar la contaminación del electrodo. Los especimenes para la prueba de exposición a la atmósfera, fueron colocados en una cabina de aire forzado con una humedad relativa controlada de 80% a 26.66°C (80°F), ver figura 7.3. Una vez que los electrodos fueron expuestos, estos fueron directamente utilizados para hacer las pruebas de hidrógeno difusible a las soldaduras de acuerdo con AWS A4.3 usando los parámetros de la tabla 7-3.

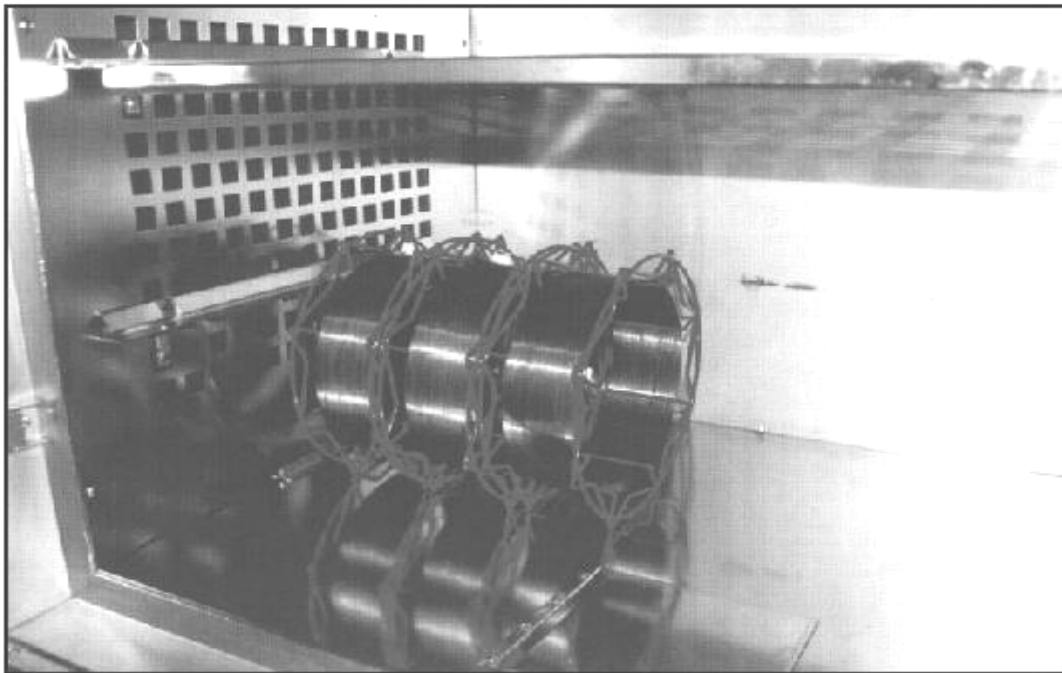


Figura 7.3 exposición atmosférica de muestras de electrodos del proceso FCAW-G en cabina húmeda ^[9]

El efecto de los parámetros de soldadura en el contenido de hidrogeno difusible fue evaluado usando solamente un electrodo (A) el cual fue de tipo E71T-1 (tabla 7.1). El contenido de hidrógeno difundible del metal depositado fue correlacionado con la corriente, el tiempo en la extensión de la columna del electrodo y calor de entrada. El área de depósito fue constante manteniendo una relación de velocidad de alambre-velocidad de avance, de 35. El efecto en

la penetración fue evaluada comparando el contenido de hidrógeno difusible de ambos del metal depositado y el metal fundido. Se encontró que el contenido de hidrógeno difundible se incrementa casi linealmente cuando se incrementa la corriente de soldadura, figura 7.4. Sin embargo, el efecto de la extensión del electrodo fue pequeño, a corriente y longitud de arco constante con el electrodo de prueba E71T-1. Incrementando la distancia tubo de contacto-pieza de trabajo disminuye la corriente y por lo tanto el contenido de hidrógeno difundible a una velocidad de alambre constante. El contenido de hidrógeno difusible en el metal depositado varía de 2.3 mL/100 g a 140 Amperes hasta aproximadamente 11.6 mL/100 g a 345 Amperes. Este rango de corriente es típico para un electrodo de este tamaño. El contenido de hidrógeno difusible en el metal fundido incremento de 2.0 mL/100 g hasta aproximadamente sobre el mismo rango de corriente. La diferencia en el contenido de hidrógeno difusible entre el metal depositado y fundido fue mayor a altas corrientes debido al incremento de la dilución del metal base. Este efecto es importante debido a que a mayores corrientes se producen velocidades de enfriamiento mas lentas y mayor calor de entrada en estas áreas de deposito constantes. Altos contenidos de hidrógeno difusible puede algunas veces ser tolerado a alto calor de entrada, debido a que la microestructura puede no ser endurecida y más hidrógeno puede difundir fuera de la soldadura durante velocidades de enfriamiento lentas.

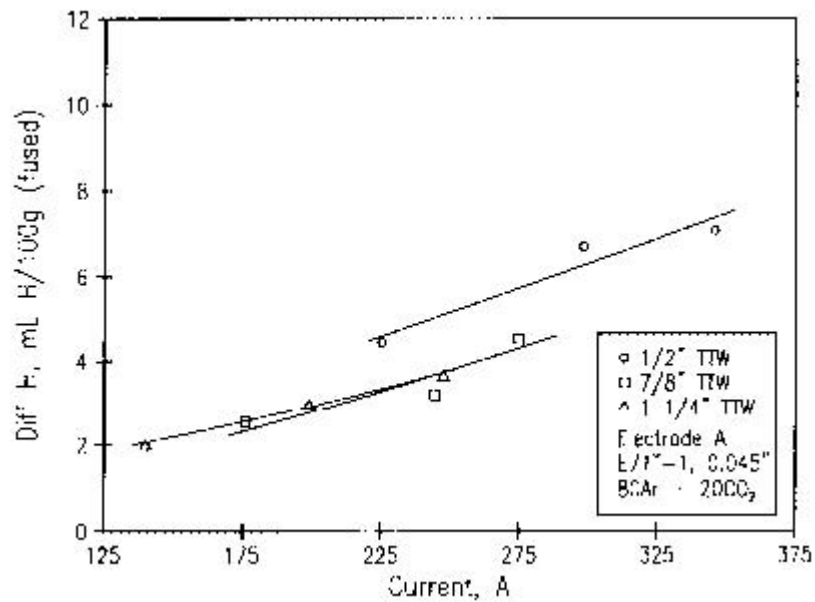
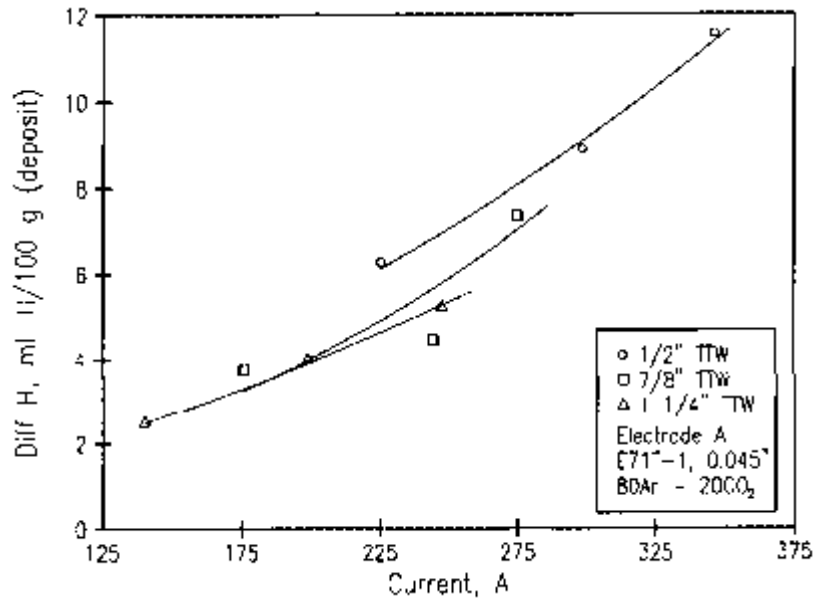


Figura 7.4 Efecto de la corriente en el hidrógeno difusible para un electrodo E71T-1 A --- Hidrógeno difusible (metal depositado): B --- Hidrógeno difusible (metal fundido total) [9]

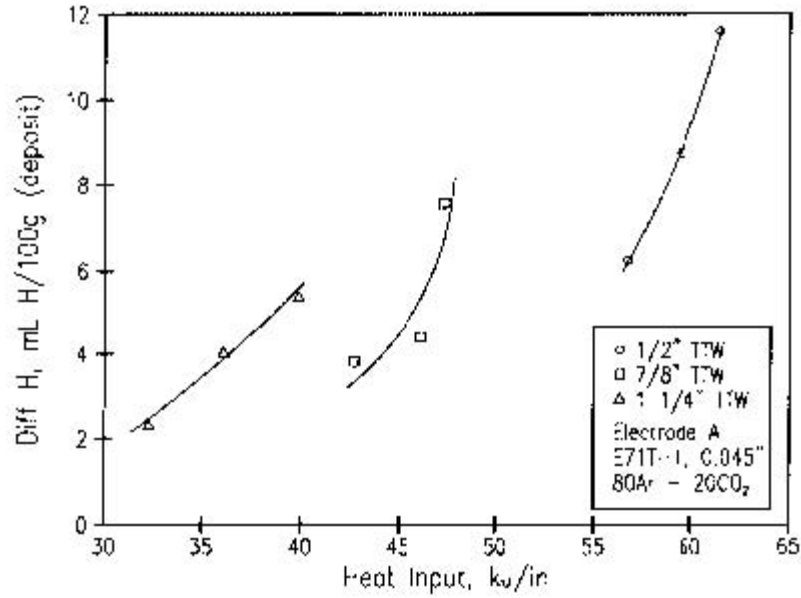


Figura 7.5. Efecto del “heat input” en el hidrógeno difusible (metal depositado) [9]

El efecto de la distancia entre el tubo de contacto - pieza de trabajo fue mas obvio cuando se comparó el calor de entrada del metal depositado, figura 7.5. el contenido de hidrógeno difusible incrementó cuando aumento el calor de entrada a cada distancia tubo de contacto – pieza de trabajo. A mayores distancias TTW incrementa la resistividad al calor (resistive heating), disminuye la corriente y produce mas bajo calor de entrada en el rango de velocidad de avance probada. Según la tabla 1 es aparente que la distancia TTW debe ser cuidadosamente controlada para controlar el calor de entrada del ensamble. El contenido de hidrógeno difusible disminuye cuando se incrementa el “electrode time” en la extensión del electrodo, fig. 7.6. Basados en la pendiente para cada condición de TTW, el contenido de hidrógeno difusible pudiera ser ligeramente mayor en soldaduras hechas con mayor distancia de TTW comparando las pruebas que pueden tener un tiempo igual en la columna.

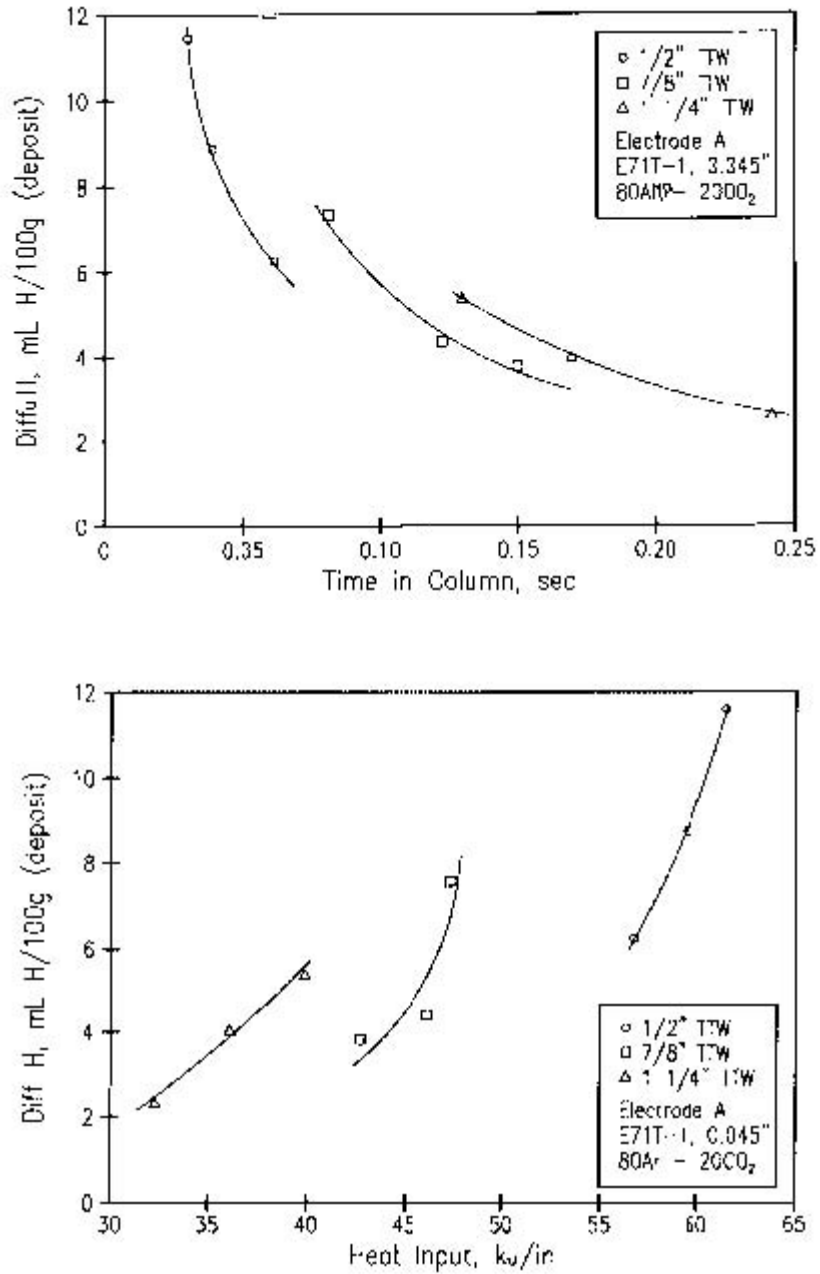


Figura 7.6. Efecto del tiempo de extensión del electrodo en el hidrógeno difusible. A --- Hidrógeno difusible (metal depositado); B --- Hidrógeno difusible (zona fusión)^[9]

Los depósitos de soldadura FCAW-G se encontró que son susceptibles a incrementar el nivel de hidrógeno después de la prueba exposición a la atmósfera, a condiciones de 26.66 °C y 80 % de humedad relativa. Todas las

pruebas de hidrógeno difundible fueron hechas de muestras de electrodo, los cuales fueron sacadas del almacén después de una semana de exposición dentro de la cabina de aire húmedo forzado. Los parámetros de soldadura usados en las muestras expuestas a la humedad fueron variadas, dependiendo del diámetro del electrodo (tabla 7-3). El contenido de hidrógeno difusible del depósito varió entre cada fabricante del electrodo, y algunos electrodos tienden a resistir más la humedad debido a las características de su fundente. En diferentes pruebas realizadas con electrodos de diferentes fabricantes, se observa que la susceptibilidad del electrodo al exponerse a la atmósfera está en función del fabricante, método de empaque, tiempo de almacenaje y posiblemente el diámetro. Dentro de lo del fabricante, las condiciones que pueden influenciar en la velocidad de absorción de humedad incluye factores tales como el porcentaje de llenado del electrodo, lo ajustado de la junta, el rolado versus el dibujo, los ingredientes del fundente y tipos de lubricantes.

7.2. El precalentamiento

7.2.1 Guías o métodos alternativos para determinar el precalentamiento en soldaduras de acero al carbono. ^[14]

La probabilidad del agrietamiento por hidrógeno depende de varios factores. Algunos pueden clasificarse como globales, (por ejemplo, la composición química, y el espesor) y pueden por lo tanto ser definidos, mientras otros, los cuales se consideran como de factores locales (por ejemplo, los detalles de la geometría de la junta, o segregaciones locales de ciertos elementos químicos) no pueden ser definidos.

En algunos casos estos factores pueden dominar, y hacen virtualmente imposible de predecir de manera racional las condiciones de precalentamiento preciso necesarias para evitar el agrietamiento por hidrógeno. Estas situaciones deberán ser reconocidas de la experiencia y conservación de

procedimientos adoptados. Sin embargo en la mayoría de los casos, con el conocimiento hoy en día del fenómeno de agrietamiento por hidrogeno es posible predecir un precalentamiento y otros detalles del procedimiento de soldadura para evitar el agrietamiento por hidrógeno que podría ser efectivo en la mayoría de los casos.

7.2.2 Bases para predecir el precalentamiento ^[6].

Las investigaciones muestran que para que ocurra el agrietamiento por hidrógeno están presentes las cuatro condiciones siguientes:

- a) Micro estructura susceptible (la dureza puede ser un indicativo de susceptibilidad) figura 7.7
- b) Nivel apropiado de hidrógeno difundible
- c) Nivel apropiado de sujeción del ensamble
- d) Temperatura adecuada

Una o más de estas condiciones puede predominar, pero es necesaria la presencia de todas para que ocurra el agrietamiento por hidrógeno. Como se ha venido mencionando, medios prácticos como el precalentamiento, son útiles para controlar uno o más de estos factores.

En el pasado, se han tomado en cuenta dos propuestas para predecir el precalentamiento. Una de ellas es realizando pruebas a una soldadura de filete llamada severidad térmica controlada (CTS), también se ha propuesto un método basado en la medición de durezas críticas en la Zona Afectada por el Calor (HAZ). Controlando la velocidad de enfriamiento, para que la dureza en no exceda los niveles críticos en la HAZ, el riesgo del agrietamiento por hidrógeno puede desaparecer.

La dureza crítica aceptable puede estar en función del contenido de hidrógeno. Esta propuesta no reconoce el efecto del precalentamiento en la remoción del contenido de hidrógeno durante el enfriamiento del metal depositado; sin embargo se recomienda como una guía para predecir el “heat input” mínimo para soldar sin precalentamiento, tendiendo a ser conservador al predecir los niveles de precalentamiento.

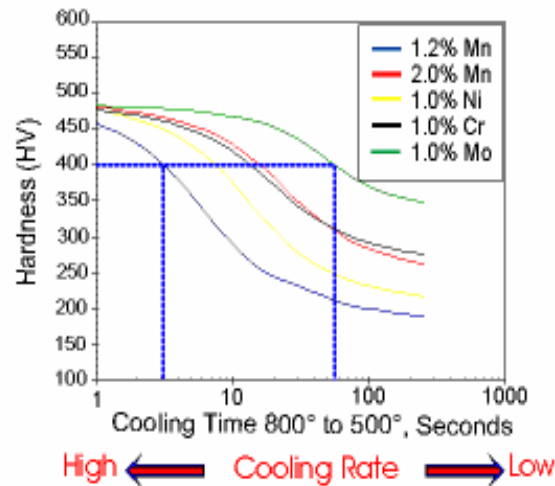


Figura 7.7. Relación del efecto de los elementos de aleación entre la velocidad de enfriamiento y la dureza en una soldadura ^[8]

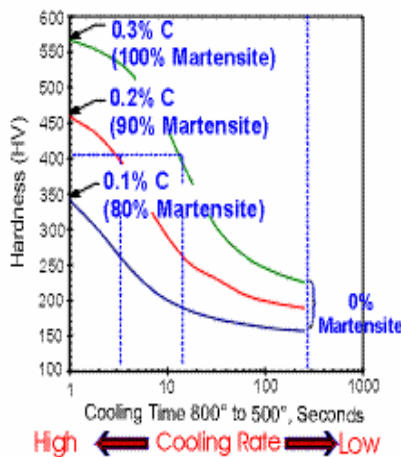


Figura 7.8. Relación del efecto de los elementos de aleación entre la velocidad de enfriamiento, la dureza y microestructura en una soldadura ^[8].

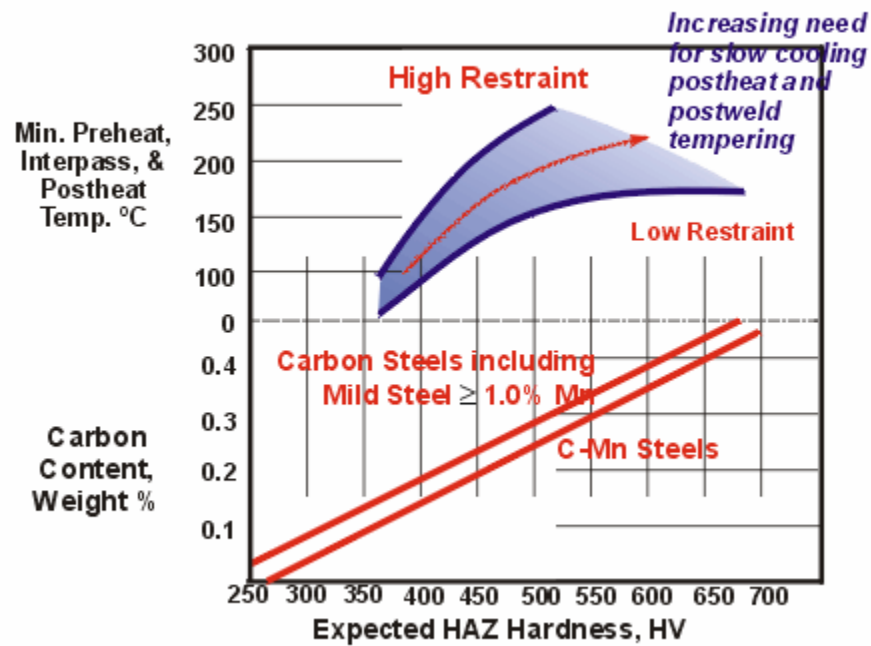


Figura 7.9. Relación del efecto del precalentamiento y contenido de carbono en la dureza ^[8]

7.3. El Tratamiento Térmico post Soldadura ^[13]

El tratamiento térmico post soldadura (PWHT) o relevado de esfuerzos, se puede considerar como otro parámetro importante como parte de un procedimiento de soldadura, puede ser usado inmediatamente una vez completada la soldadura sin permitir que la temperatura llegue por abajo de la temperatura de precalentamiento. Sin embargo en la práctica, una inspección sólo se puede conducir a temperatura ambiente, existe el riesgo de que los defectos rechazables no se encuentren, después del relevado de esfuerzos. También para aceros altamente templables, un segundo tratamiento térmico puede ser requerido para revenir la microestructura dura presente después del primer relevado de esfuerzos.

Bajo ciertas condiciones se requieren procedimientos de soldadura rigurosos para evitar el agrietamiento, de donde se derivan diagramas para estimar el precalentamiento, según el estándar BS 5135 (Process of Arc Welding of Carbon and Carbon Manganese Steels).

El apéndice E de este estándar menciona las condiciones siguientes:

- a) Alta resistencia
- b) Espesor (aproximadamente 50 mm)
- c) Aceros de bajo carbono equivalente (aceros CMn con un contenido de carbono de 0.1% y un carbono equivalente de aproximadamente 0.42)
- d) Aceros limpios o con bajo azufre ($S \leq 0.008\%$) un bajo contenido de azufre y oxígeno aumentan la templabilidad de un acero.
- e) En metales de aporte donde los niveles de precalentamiento pueden ser insuficientes para evitar agrietamiento en la Zona Afectada por el Calor. Los procesos y consumibles de bajo hidrógeno pueden ser usados. los esquemas para predecir el precalentamiento evitan el agrietamiento en el metal depositado y generalmente se requiere que el hidrógeno difunda y una elevada resistencia a la tensión del metal depositado.

Uso de metal de aporte de aleación de níquel y austeníticos para prevenir el agrietamiento.

En situaciones donde el precalentamiento no es práctico, o no se puede prevenir el agrietamiento, es necesario utilizar un electrodo austenítico. Los electrodos de acero inoxidable austeníticos y las aleaciones base níquel producen a temperatura ambiente un metal depositado donde hay mayor solubilidad del hidrógeno, que en un acero ferrítico. Por lo tanto cualquier hidrógeno formado durante el proceso puede permanecer en el metal

depositado, cuando hay poca difusividad en la zona afectada por el calor a temperatura ambiente.

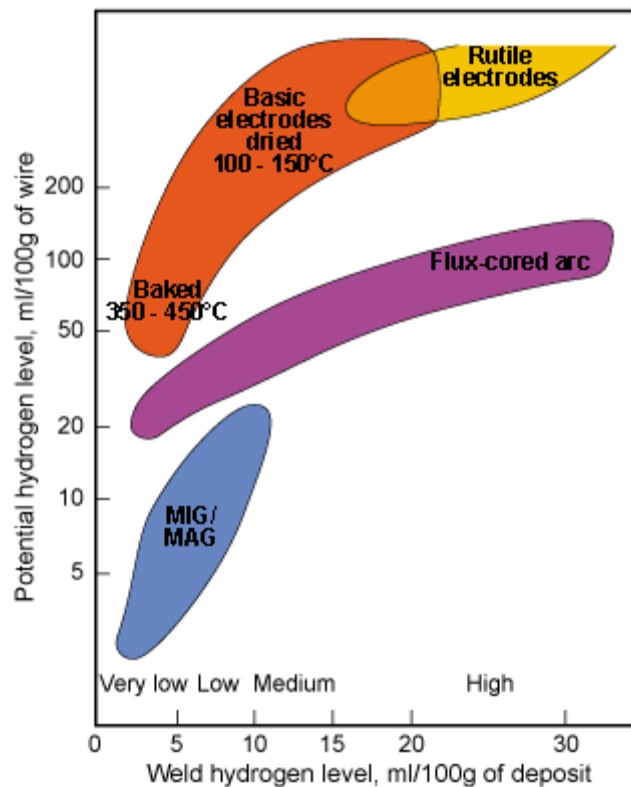


Fig. 7.10. Cantidades típicas de hidrógeno potencialmente disponible y contenidos de hidrógeno en el metal depositado para diferentes procesos de soldadura y tipos de electrodos [8].

Un electrodo comúnmente usado es el 23Cr:12Ni, sin embargo las aleaciones de níquel tienen un coeficiente de expansión térmica mas bajo que los aceros inoxidables, los electrodos austeníticos de níquel son preferidos en juntas sujetas a esfuerzos internos altos, para reducir los esfuerzos por la contracción. La figura 7.11 es una guía general para los niveles de precalentamiento cuando se utilizan electrodos austeníticos. Cuando se sueldan aceros con máximo 0.2 % de carbono, normalmente no se requiere precalentamiento. Sin embargo arriba de 0.4 %C , se requiere un precalentamiento mínimo de 150° C para prevenir el agrietamiento en la Zona

afectada por el calor. La influencia del nivel de hidrogeno y el grado de esfuerzos internos también se ilustran en esta figura.

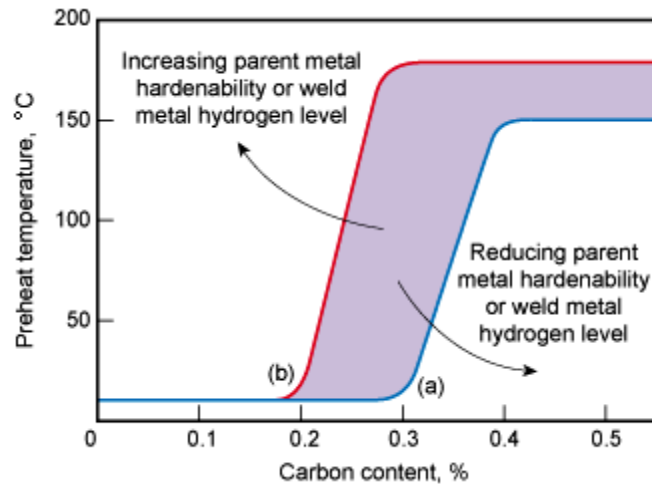


Fig. 7.11. Guía para determinar la temperatura de precalentamiento cuando se utilizan electrodos austeníticos SMAW de 1-2 kJ/mm a) esfuerzos internos bajos (material de espesor < 30 mm). b) esfuerzos internos altos, (material de espesor > 30 mm).

7.3 Metal base

7.3.1 Soldabilidad de los aceros de alta resistencia ^[12]

En este punto se compara la soldabilidad de aceros al carbono tradicionales de 70 a 100 ksi de resistencia a la cedencia y los aceros HPS (High Performance Steels) A 709 grado 485 HPS 70W, y grado 785 HPS 100W. Se describen las pruebas de simulación utilizadas para predecir el agrietamiento en la Soldadura depositada y Zona Afectada por el Calor. Los efectos de la velocidad de enfriamiento en la susceptibilidad del agrietamiento por hidrógeno y el precalentamiento mínimo correspondiente, también se analizan. Para los niveles de difusividad del hidrógeno y la resistencia del metal depositado utilizado, el agrietamiento en la zona de fusión puede evitarse incrementando la temperatura de precalentamiento.

Este trabajo incluye resultados de investigación en combinaciones de consumibles en el proceso de **arco sumergido** (SAW) usados en la unión de HPS 70W y 100W. Las propiedades de la soldadura depositada se vieron deterioradas cuando se incremento el calor de entrada (heat input).

El agrietamiento por hidrógeno, es una de las discontinuidades más comunes en la soldadura, como se describió en los anteriores capítulos, existen varios métodos para controlarlo, tales son:

- a) Evitar microestructuras susceptibles
- b) Reducir Los esfuerzos internos (térmicos)
- c) Evitar una velocidad de enfriamiento a temperatura ambiente donde la difusividad del hidrógeno es baja.

El agrietamiento por hidrógeno puede ocurrir en la Zona Afectada por el calor (HAZ) como en la zona de fusión (FZ). Donde las razones del agrietamiento son las mismas la metodología para el control puede ser diferente. El control de la microestructura puede ser más fácilmente logrado en la HAZ, esto es por lo avanzado de las prácticas para la fabricación del acero. Eliminando las fuentes potenciales de hidrógeno, tales como grasa, contaminación, óxidos, tanto del metal base como de aporte. La zona de fusión no sufre procesos termomecánicos como la zona afectada por el calor, permaneciendo una estructura de vaciado en la soldadura o en condición de recalentado en el caso de soldadura de pasos múltiples. Por consiguiente, la microestructura en la zona de fusión puede ser ajustada solamente adicionando elementos de aleación en el consumible. Las propiedades de la soldadura finales pueden también depender de la técnica de soldadura utilizada (dilución, secuencia de pases, vaporización de ciertos elementos tales como Mn, etc). Por lo tanto la templabilidad de la zona de fusión excederá al de la zona afectada por el calor,

para el caso de los acero HPS, y el agrietamiento emigrara de la zona afectada por el calor hacia la zona de fusión.

Para este y la mayoría de los aceros, el precalentamiento de la soldadura continua siendo el método mas ampliamente utilizado para eliminar el agrietamiento por hidrógeno o agrietamiento en frío. Un alto precalentamiento, es menor la oportunidad para que se formen microestructuras frágiles y da mayor tiempo para que el hidrógeno difunda de la soldadura. Sin embargo el precalentamiento es una operación costosa tanto para establecer, llevar a cabo y supervisar. Debido a esto uno de puntos importantes de esta investigación es desarrollar aceros de alta aleación (HPS), para bajar costos, eliminando el precalentamiento. Ciertamente el agrietamiento en la zona afectada por el calor ha sido satisfactoriamente eliminada e los aceros HPS 70W sin usar precalentamiento reduciendo su templabilidad, para niveles bajos de hidrógeno difundible y “heat inputs” intermedios, para placa de espesores arriba de 2 pulgadas. Por consiguiente, las pruebas de soldabilidad se concentran en encontrar los precalentamientos mínimos para evitar el agrietamiento en la zona de fusión. Se encontró que la prueba Gapped Bead on Plate (G-BOP) es la mas confiable para este propósito. Los esfuerzos dirigidos hacia mejorar las propiedades de la zona de fusión para igualar la resistencia y tenacidad del metal base, utilizando alambres sólidos, fundentes neutros y aleados, así como alambres con núcleo de fundente. La resistencia a atrapar humedad en el fundente fue también incluida en el desarrollo de consumibles del proceso de arco sumergido (SAW) para minimizar la susceptibilidad al agrietamiento inducido por hidrogeno. Se necesito de investigaciones experimentales para predecir los requerimientos de precalentamiento para consumibles de soldadura específicos utilizados en la soldadura de aceros HP utilizados en la fabricación de puentes. Se recopilaron, estudio de soldabilidad, los procedimientos de soldadura calificados y los resultados de las pruebas no destructivas, las guías de fabricación de los aceros HP.

En este trabajo se analizan los resultados, a pequeña y gran escala, las pruebas de soldabilidad utilizadas para predecir la susceptibilidad a la fragilización por hidrógeno. La correlación entre estas predicciones, datos de otras literaturas técnicas y experiencias de fabricación de puentes actuales fueron direccionadas. Evaluar el efecto del calor de entrada “heat input” en las propiedades mecánicas del metal depositado para diversas combinaciones de alambres y fundentes para el proceso de arco sumergido.

La prueba G-BOP ^[10] (procedimiento de prueba para la susceptibilidad al agrietamiento de la zona de fusión) fue utilizada para determinar la susceptibilidad del metal depositado al agrietamiento inducido por hidrógeno en depósitos de soldadura de paso sencillo con los procesos SMAW y SAW. El espesor del metal base fue de 2 pulgadas. Se dirigió en niveles de hidrógeno difundible (2, 4 y 8 ml/100g de metal depositado). El hidrógeno fue medido in situ utilizando el método del mercurio especificado en AWS A 4.3-93. los parámetros típicos de las pruebas se muestran en la figura 7.12 A. Se utilizaron dos blocks de acero HP colocados en una preforma y se depositó un cordón en la placa sobre la ranura. Después de 48 horas la soldadura fue recalentada, utilizando un antorcha de oxiacetileno. En el caso del desarrollo del agrietamiento inducido por hidrógeno, la superficie cambio de color, y cuando se rompió la muestra, la cantidad relativa fue relativa a la sección transversal, figura 7.12 B.

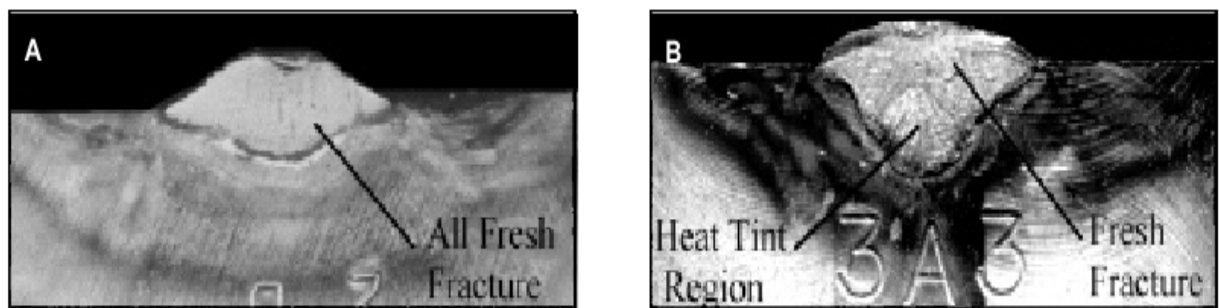


Figura 7.12 criterios de evaluación de la prueba GBOP, vista de los cordones fracturados transversalmente, se observa la grieta inducida por hidrógeno. A ---

0% de agrietamiento: B 30 % de agrietamiento^[10]

8. Prevención del agrietamiento por hidrógeno en soldaduras

El precalentamiento de la soldadura continua siendo el método mas ampliamente utilizado para evitar el agrietamiento por hidrógeno o agrietamiento en frío. Un alto precalentamiento, es menor la oportunidad para que se formen microestructuras frágiles y da mayor tiempo para que el hidrógeno difunda de la soldadura. Sin embargo el precalentamiento es una operación de costo relativamente alto, tanto para establecer, como para llevar a cabo y supervisar.

8.1 Mejores practicas para evitar el agrietamiento por hidrógeno ^[13]

A continuación se enlistan algunas prácticas técnicas recomendadas para evitar el agrietamiento por hidrógeno:

- a) Limpiar las caras de la junta y remover contaminantes tales como pintura, aceites, grasas, provenientes del maquinado o corte.
- b) Usar proceso de soldadura bajo hidrógeno (GMAW o GTAW, si es posible
- c) En el caso de el proceso SMAW y el fundente para el proceso de arco sumergido, utilizar los consumibles de acuerdo con las recomendaciones del fabricante
- d) Evitar aberturas de raíz grandes en la preparación de la junta de la soldadura para reducir los esfuerzos térmicos en la soldadura.
- e) Si se especifica precalentamiento en el procedimiento de soldadura, este se puede aplicar cuando se puntea o alinea temporalmente el ensamble a soldar
- f) Precalentar la junta a una distancia de por lo menos 75 mm de la línea de la junta asegurando un calentamiento uniforme a través de todo el espesor del material

- g) Medir el precalentamiento en la cara opuesta a la que se esta calentando. Donde no sea posible o practico, se debe dar tiempo para igualar la temperatura después de quitar el precalentamiento y antes de medir la temperatura
- h) Seguir los requerimientos del (calor de entrada) heat input
- i) Mantener el calentamiento aproximadamente dos a cuatro horas después de soldar dependiendo de la sensibilidad del material al agrietamiento. Esto es un enfriamiento lento.
- j) En situaciones donde es impractico un adecuado precalentamiento, o el agrietamiento no puede ser evitado, se pueden utilizar electrodos austeníticos.

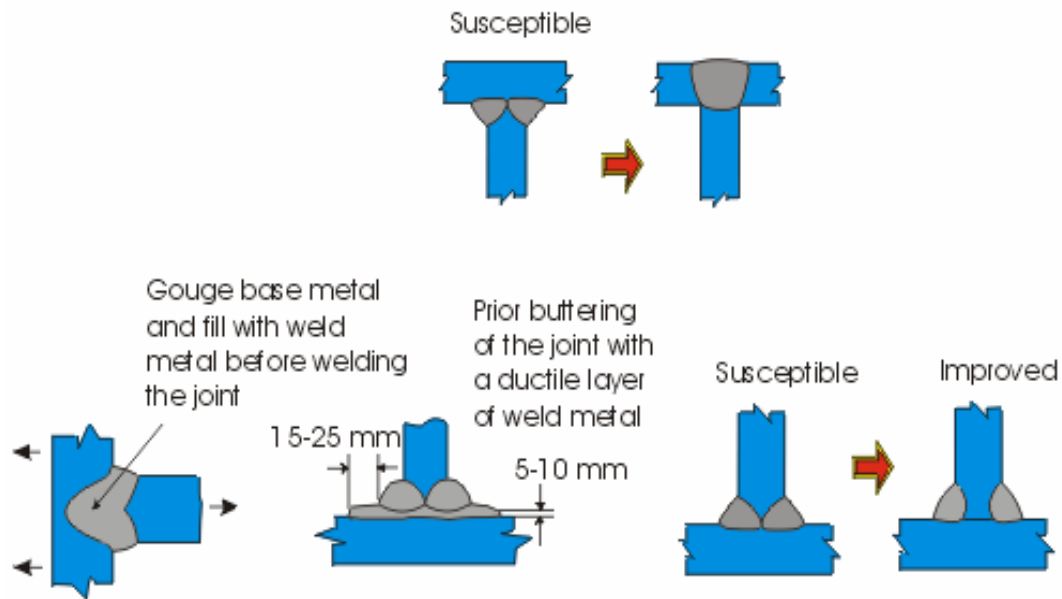


Figura 8.1, Modificación de una junta en T para evitar el desgarre laminar (lamellar tearing) ^[8].

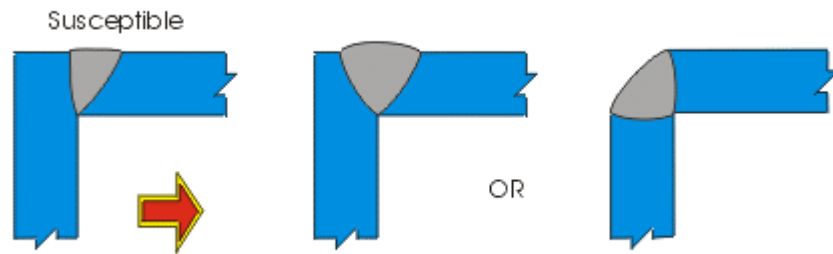


Figura 8.2, Modificación de una junta en esquina para evitar el desgarre laminar (lamellar tearing)^[8]

8.2 Detección y remediación

Las grietas por hidrógeno son imperfecciones lineales con orillas afiladas, y no son permitidas por la mayoría de los códigos. Como estas grietas son muy finas y pueden ser sub-superficiales, puede ser difícil detectarlas. Las grietas que rompen hacia la superficie pueden ser detectadas por inspección visual, líquidos penetrantes o partículas magnéticas. El ultrasonido se prefiere en lugar de la radiografía para detectar grietas paralelas relativamente al cordón.

La mayoría de los códigos especifican que las grietas deben ser removidas. Un componente agrietado puede ser reparado removiéndolas con un margen de 5 mm más allá de los extremos visibles de la grieta. Lo removido es después soldado. Para asegurarse que la grieta no se presente nuevamente, la soldadura debe conducirse con un procedimiento apropiado, un precalentamiento y un adecuado nivel “heat input” para el tipo y espesor de material. Sin embargo el nivel de esfuerzos térmicos será mayor y el tiempo de la temperatura de interpasos mas corto, comparado con la soldadura de la junta original, por eso se recomienda un precalentamiento de soldadura de un nivel alto (típicamente 50° C)

9. CONCLUSIONES.

Por lo tanto, de acuerdo de acuerdo a lo anterior podemos concluir que:

- El hidrógeno esta presente en los consumibles de soldadura y es introducido a la soldadura cuando existe humedad en los fundentes. Esto es posible por la humedad del ambiente, para difundir (a temperatura ambiente) dentro de los fundentes de los electrodos del proceso SMAW, el alambre de núcleo de fundente, o el fundente usado en el proceso de arco sumergido.
- Un exceso de exposición de los electrodos a la atmósfera puede causar un exceso de hidrógeno incorporado al fundente. Si esto ocurre, el electrodo podría ser almacenado en un horno a 125°C hasta que este listo para su uso.
- El contenido de hidrógeno difusible incrementa linealmente cuando se incrementa la corriente en el proceso FCAW.
- Los niveles mas bajos de hidrógeno fueron obtenidos cuando se suelda con el proceso FCAW utilizando CO₂ puro.
- El precalentamiento es muy importante en aceros de alta resistencia para prevenir el agrietamiento por hidrógeno.

10. TRABAJOS FUTUROS

Puesto que ya se han hecho estudios extensivos de fragilización por hidrógeno en ensambles soldados de aceros usando una gran variedad de procesos de soldadura por arco, se puede hacer una base de datos. Esta base podría contener información tal como tipo de material o materiales a ser soldados, gases de protección y parámetros de soldadura por nombrar algunos. Esta base de datos puede ser diseñada de tal manera que permita ser usada para cualquier tipo de material y el proceso que se desee y poder utilizar el electrodo recomendado, gas de protección, corriente, voltaje y velocidad de avance. Esto minimizará la posibilidad de que ocurra agrietamiento inducido por hidrógeno durante la fabricación y será capaz de predecir las características de operación, velocidad de depositación, forma del cordón, composición química del depósito y propiedades de la soldadura.

Se puede hacer una investigación para todos los electrodos para FCAW, SMAW y fundentes SAW proporcionados por el proveedor. Ellos podrían establecer prácticas recomendadas para usar sus electrodos lo cual minimizaría la cantidad de hidrógeno difundible en la soldadura y proporcionara literatura para el usuario de cada empaque de electrodo.

Identificar una prueba relativamente fácil que puede ser realizada durante la aplicación de soldadura que permita la medición del hidrógeno difundible. Esta permitirá que al operador tomar especial cuidado y precaución cuando sepa que el hidrógeno está introduciéndose. Ellos podrían tener conocimiento de la cantidad de hidrógeno en un límite superior, y evitar el agrietamiento por hidrógeno y poder cambiar sus prácticas de soldadura para evitar este fenómeno.

11. BIBLIOGRAFÍA.

1. American Welding Society, Welding Handbook Vol. I Welding Technology Third Edition, 1987.
2. American Welding Society, Welding Inspection Technology sixth edition 2000.
3. American Welding Society, AWS 3.0 " Welding Terms and Definitions".
4. Raymond R. Unocic, Welding Engineering 600 Literature Review, Department of Materials Science & Engineering, The Ohio State University, February 25, 2000.
5. M. Mirza and R. Gee, *Effects of shielding gases on weld diffusible hydrogen contents using cored wires*. Science and Technology of Welding and Joining, Vol.4 No.2 1999.
6. American Welding Society. Structural Welding Code – Steel. (AWS D1.1:2004), 2004.
7. Weldment Corrosion, MSE 112 April 2, 2001 Evan Rege, Mike Beatty, Ricardo Fernandez.
8. Software Weld IT Canadian Welding Bureau and Maple soft Development, 1999.
9. D. Harwig, D.P. Longenecker, and J.H. Cruz, *Effects of Welding Parameters and Electrode Atmospheric Exposure on the Diffusible Hydrogen Content of Gas Shielded Flux Cored Arc Welds*, AWS Welding Journal, September 1999
10. G. ATKINS, D. THIESSEN, N. NISSLEY, AND Y. ADONYI, Welding Process Effects in Weldability Testing of Steels AWS Welding Journal, April 2002.
11. PEKKA NEVASMAA PREDICTIVE MODEL FOR THE PREVENTION OF WELD METAL HYDROGEN CRACKING IN HIGH-STRENGTH MULTIPASS WELDS Academic Dissertation to be presented with the assent of the Faculty of Technology, University of Oulu, for public

discussion in Raahensali (Auditorium L10), Linnanmaa, on November 15th, 2003, at 12 noon.

12. Weldability of High Performance Steel, YONI ADONYI, Professor, Omer Blodgett Chair of Welding Engineers, Letorurneau Univerity
13. Defects - hydrogen cracks in steels - prevention and best practice, TWI WORLD CENTRE FOR MATERIALS JOINING TECHNOLOGY
http://www.twi.co.uk/j32k/protected/band_3/jk46.html
14. V.v.d. Mee, H. Meelker, and R.v.d. Schelde, *How to Control Hydrogen Level in (Super) Duplex Stainless Steel Weldments using the GTAW or GMAW Process*. AWS Welding Research Supplement, January 1999