

CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



**CONTROL DE LA CALIDAD EN UNIONES SOLDADAS POR EL PROCESO
GMAW Y SU IMPACTO EN LA HERMETICIDAD DE
TANQUES HIDRÁULICOS**

POR

JORGE ANTONIO RODRÍGUEZ CHÁVEZ

REPORTE DE PROYECTO

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

SALTILLO, COAHUILA, MÉXICO A 16 DE OCTUBRE DE 2015

CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



**CONTROL DE LA CALIDAD EN UNIONES SOLDADAS POR EL PROCESO
GMAW Y SU IMPACTO EN LA HERMETICIDAD DE
TANQUES HIDRÁULICOS**

POR

JORGE ANTONIO RODRÍGUEZ CHÁVEZ

REPORTE DE PROYECTO

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

SALTILLO, COAHUILA, MÉXICO A 16 DE OCTUBRE DE 2015

DEDICATORIA

A Dios, que me acompaña en cada paso.

A mis padres Arcelia Chávez González y Antonio Rodríguez Zamarrón por enseñarme a ser lo que soy, brindarme su cariño y confiar en mí.

A mis abuelos Miguel Chávez López, Odilia González Rodríguez, Antonio Rodríguez Morales (†) y Elena Zamarrón Magallanes porque sin su apoyo yo no estaría aquí.

A mis hermanos Daniel Alberto y Esli Azael por su apoyo y demostrarme que con trabajo y esfuerzo se puede lograr todo lo que uno quiera.

A mis amigos Emmanuel, Arely, Julia, Antonio, Hanna, Ada, Rubén, Karen, Azael, Zapata, Oaxaca, Luis, Irving, Christian, Agustín, Sergio, Víctor Hugo, Mario, Jair, José, Irma, Jesús; por brindarme su amistad y darme su consejo.

A mis mentores y amigos Dr. Juan Genaro Osuna Alarcón (†), Dra. Edith Colunga, Dra. Dora Cortés, Ing. Pedro de la Rosa, MC. Edgardo Chavero; por su apoyo y buen consejo durante mi formación profesional.

*“If you can't fly then run,
if you can't run then walk,
if you can't walk then crawl, but whatever you
do you have to keep moving forward.”*

-Martin Luther King-

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología y a la Corporación Mexicana de Investigación en Materiales a través de la Gerencia de Desarrollo Humano por otorgarme una beca para realizar mis estudios de posgrado en el periodo Mayo 2014 – Abril 2015 (613527). A la empresa por el apoyo económico a través de CAINTRA Nuevo León.

Al Gerente de calidad Ing. Francisco Oliva, al Gerente general Ing. Daniel Martínez y al personal de los diversos departamentos de la planta por su disposición y apoyo durante la ejecución del proyecto; en especial al departamento de planeación al Ing. Carlos Verdeja, al Ing. Rubén Tamez y Raúl Sánchez; al departamento de calidad a Jesús Ayala, Reynaldo Vázquez, Alfredo Bernal, Adrián Zamora, Miguel Espinoza y Juan Trejo, Luis Rodríguez; al departamento de manufactura a Salvador Gutiérrez, Carlos Esparza, Francisco Santillán, Juan Escobar, Williams Zúñiga, Luis Valtierra, Oscar Hernández, Juan González, Jaime, Cosme Bautista, Rodrigo González, José Vanegas; al departamento de ingeniería de soldadura asistido por Gerónimo Villanueva.

Al Instituto de Metalurgia de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí y su personal por el apoyo técnico-académico brindado durante la ejecución de este proyecto; en especial a Dr. Emmanuel José Gutiérrez Castañeda por su disposición y apoyo durante la estancia de investigación académica.

A mis tutores Dra. Rocio Saldaña Garcés, Dr. Víctor Hugo López Cortez y al Ing. Carlos G. Verdeja López por su dirección y orientación para la elaboración del presente trabajo.

Al personal académico, administrativo y técnico de COMIMSA por el apoyo y disposición de las instalaciones y equipo en general; en especial a la MC. Pilar Granillo, MC. María Eugenia Herrera, Ing. Diana Cortés, por su atención y disposición.

A mis compañeros y amigos de generación Nayeli, Antonio, Sergio, Martha, Diego, Ricardo, Nancy, Rafael, Juana María, Gilberto por el apoyo brindado en el transcurso de la especialidad.

ÍNDICE

	Página
SÍNTESIS	1
INTRODUCCIÓN	3
1.1 Antecedentes del proyecto	3
1.2 Objetivo general	4
1.2.1 Objetivos específicos	4
1.3 Justificación del proyecto	5
1.4 Planteamiento del problema	6
1.5 Aportación industrial	6
1.6 Alcances del proyecto	6
II MARCO TEÓRICO	7
2.1 Sistemas hidráulicos	7
2.1.1 Ventajas e inconvenientes	9
2.1.2 Componentes de los sistemas hidráulicos	10
2.1.3 Aplicaciones de los sistemas hidráulicos	17
2.2 Aceros HSLA microaleados	19
2.2.1 Aplicaciones de aceros HSLA	21
2.2.2 Selección del acero HSLA	23
2.2.3 Clasificación de los aceros HSLA	24
2.2.4 Designación de los aceros HSLA	25
2.2.4.1 Especificaciones ASTM para aceros HSLA	26
2.2.4.2 Aceros estructurales de baja aleación y alta resistencia	26
2.2.5 Control de las propiedades	29
2.2.5.1 Mecanismos de endurecimiento de la ferrita	29
2.2.6 Elementos de aleación en aceros HSLA	30
2.2.6.1 Microaleantes más comunes	34
2.2.6.2 Otros elementos microaleantes	37
2.2.6.3 Efecto de los diferentes elementos de microaleación	37
2.2.6.4 Efecto combinado de los elementos microaleantes	38
2.2.7 Metalurgia de la soldadura	38
2.2.7.1 Soldabilidad y carbono equivalente	39
2.2.8 Consideraciones para la soldadura con arco de aceros baja aleación	41
2.2.8.1 Procedimientos y prácticas de soldadura recomendadas	43
2.2.9 Aleaciones ASTM A 572	44

2.3 Soldadura de arco con protección de gas	45
2.3.1 Descripción del proceso GMAW	45
2.3.2 Principios básicos de operación	46
2.3.3 Variables del proceso	47
2.3.4 Equipo de operación	48
2.3.5 Mecanismos de transferencia de metal	49
2.3.6 Electrodos y materiales de aporte	54
2.3.6.1 Selección del electrodo	55
2.3.7 Gases protectores	57
2.3.7.1 Mezclas de gases binarias	62
2.3.8 Efecto de las variables de soldadura en el proceso GMAW	65
2.4 Inspección y calidad de la soldadura	75
2.4.1 Pruebas de uniones soldadas	76
2.4.1.1 Ensayos no destructivos	77
2.4.1.2 Ensayos destructivos	78
2.4.2 Discontinuidades y defectos de soldadura y metal base	79
2.4.2.1 Discontinuidades en la estructura metalúrgica de la unión soldada	81
2.4.2.2 Discontinuidades en estructura y propiedades de juntas soldadas	97
2.4.2.3 Discontinuidades provenientes del metal base	99
2.4.2.4 Discontinuidades relacionadas con los requisitos dimensionales	101
2.4.3 Control de la calidad del proceso GMAW	105
2.4.3.1 Posibles problemas en el proceso	105
2.4.3.2 Discontinuidades en el proceso GMAW	106
2.4.3.3 Localización de problemas	109
2.4.4 Procesos de simulación y control de la calidad	111
2.5 Hermeticidad y detección de fugas	117
2.5.1 Fundamentos de detección y pruebas de fugas	118
2.5.1.1 Objetivo de la detección de fugas	118
2.5.1.2 Tipos de fugas	119
2.5.1.3 Tipos de flujo en fugas	120
2.5.1.4 Principios de dinámica de fluidos	121
2.5.2 Métodos para la detección de fugas	125
2.5.2.1 Criterios de selección del método óptimo de detección	142
III DESARROLLO DEL PROYECTO	146
3.1 Planteamiento del problema	146
3.1.1 Caso de negocio	147
3.1.2 Panorama actual	147
3.2 Desarrollo experimental	148
3.2.1 Definir situación actual del problema	148
3.2.2 Planteamiento de la estrategia	155
3.2.2.1 Análisis de la primera etapa (Generación I)	156
3.2.3 Desarrollo del período de prueba	160
3.2.3.1 Resultados preliminares	166
3.2.3.2 Segunda etapa de prueba	167

IV RESULTADOS Y ANÁLISIS	168
4.1 Ensayo en condiciones de operación	172
4.2 Implementación de un plan de mejora	179
4.2.1 Procesos de manufactura	179
4.2.2 Proceso de detección de fugas.	182
V CONCLUSIONES	185
Bibliografía	187
Índice de tablas	190
Índice de figuras	192
Apéndices	196

SÍNTESIS

Los aceros de alta resistencia pueden ser utilizados en muchas aplicaciones, por ejemplo, para disminuir el tamaño y peso de componentes. La unión de estos aceros debe ser con una especial precisión en la variación de los parámetros, así como en el diseño de la junta y la preparación previa al proceso.

En el presente estudio se evalúa la calidad superficial, microestructural y mecánica de dos placas de acero HSLA designando como A 572 por ASTM, con unión tipo T y soldado por el proceso GMAW utilizando un electrodo sólido especificado por AWS 5.18 como ER70S-3. Los cupones de soldadura se unieron con los parámetros que se utilizan actualmente en la planta, y con parámetros propuestos para el proceso GMAW. Las uniones se sometieron a análisis químico, metalografía y microdureza.

En el estudio se presentan dos ensayos realizados bajo las mismas condiciones de soldadura en los cuales la única variable fue la preparación previa de la junta. En el primer ensayo se eliminó todo material, residuo e impureza ajena a las placas; además de asegurarla adecuadamente y fijarla para evitar cualquier movimiento involuntario. En el segundo ensayo, a diferencia del otro, las placas no fueron limpiadas y la fijación fue mínima para realizar la soldadura.

La caracterización microestructural superficial fue realizada en la sección transversal al corte utilizando MEB. En las micrográficas del metal de soldadura se observa un aumento en la porosidad superficial de la segunda muestra en comparación con la primera.

El ensayo de dureza fue realizado en dos direcciones para cada una de las muestras. La comparación de ambos perfiles mostró una disminución significativa en la dureza del metal de soldadura (MS) y la zona afectada por el calor (ZAC) de la segunda muestra en comparación con la primera. Los valores obtenidos en el ensayo para la muestra A y B en el MS fueron de 212.2 y 192.8 HV, respectivamente.

Asimismo, se describen diversos métodos para la detección de fugas y se comparan con el empleado por la empresa, así como una serie de recomendaciones para su mejora e implementación en el Welding Procedure Specification (WPS, por sus siglas en inglés)

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes del proyecto

En la actualidad, el empleo de diversos procesos de soldadura a nivel industrial es uno de los recursos tecnológicos de mayor importancia para su desarrollo a nivel mundial. Tal es el caso de la fabricación, reparación y recuperación de maquinaria pesada, ya sea para industria minera, agrícola o de la construcción.

Dentro de las empresas del sector metalmecánica, la soldadura es una de las herramientas de trabajo de mayor uso a nivel industrial. La facilidad y versatilidad de la soldadura lo convierten en un candidato ideal para la elaboración de piezas, especialmente aquellas sometidas a alta exigencia de carga pesada.

El conocimiento y el control de la variabilidad de los parámetros de soldadura que intervienen en una adecuada aplicación de ésta, son necesarios para garantizar la calidad requerida de acuerdo a las especificaciones para el trabajo a que serán sometidas las piezas construidas empleando este procedimiento.

El presente trabajo de investigación tiene su principal interés en la determinación de las variables de soldadura que ocasionan los principales defectos o discontinuidades que causan problemas de hermeticidad en la fabricación de tanques hidráulicos y de combustible. Asimismo, comparar la sensibilidad del método actual de la planta con otros procesos para la detección de fugas a nivel industria.

1.2 Objetivo general

Desarrollar un documento de consulta que concentre información acerca de las variables dentro del proceso de fabricación de tanques hidráulicos herméticos y su impacto en la calidad de uniones soldadas por el proceso GMAW, que dan lugar a la aparición de fugas.

1.2.1 Objetivos específicos

- 1) Determinar las variables en el proceso de fabricación de tanques herméticos y sus efectos en el indicador de piezas buenas a la primera vez o first pass yield (FPY, por sus siglas en inglés).
- 2) Determinar los efectos de la limpieza en soldadura GMAW sobre uniones soldadas en tanques hidráulicos.
- 3) Elaboración de una metodología para el diagnóstico actual de la línea de producción y su impacto en el indicador general de calidad FPY.
- 4) Evaluar el control de calidad en soldadura por GMAW para tanques hidráulicos.
- 5) Realizar las prácticas recomendadas de manufactura adecuadas para la mejora en el proceso de detección de fugas de acuerdo a especificaciones de planta.

1.3 Justificación del proyecto

El presente proyecto fue planteado por una empresa fabricante de maquinaria para la industria metalmecánica, con el objetivo de ampliar el área de investigación en sus procesos operativos y de calidad en la soldadura para la fabricación de tanques hidráulicos y de combustible.

La ejecución adecuada del procedimiento de operaciones estándar (WPS) de soldadura, garantiza la calidad y el correcto funcionamiento de los tanques que son fabricados mediante la unión de láminas metálicas de distintos espesores.

Los procesos de manufactura para la elaboración de tanques para carga pesada fabricados mediante la unión de láminas de acero por procesos convencionales de soldadura, son un área de la ingeniería en la que es indispensable lograr un control adecuado en los parámetros operativos que garanticen la buena calidad y resistencia de la soldadura para las condiciones de trabajo requeridas.

El control de la variabilidad y la optimización de los parámetros operativos en las líneas de producción son de gran importancia para lograr un aumento en la eficiencia del proceso lo cual hace posible disminuir costos y tiempos de producción. Es por ello, que resulta de gran interés establecer las mejores condiciones de operación (con las que se debe aplicar la soldadura), el diseño de las juntas, eventualidades en el proceso, de tal manera que la calidad en la unión se vea comprometida por la aparición de discontinuidades y defectos tales como: faltas de fusión, poros, etc., dando como resultado una disminución en la hermeticidad del tanque debido a fugas presentes en el cordón de soldadura.

Por lo anterior, la justificación de este trabajo se basa en que es necesario ampliar el conocimiento sobre los métodos de detección de fugas y encontrar la causa raíz que originan su aparición por defectos tales como: faltas de fusión, poros, etc.

1.4 Planteamiento del problema

La variación en el indicador del porcentaje de fugas es un problema recurrente al momento de definir la capacidad del proceso para disminuir el retrabajo en los tanques soldados, el cual es causado por la aparición de defectos en el cordón de soldadura (poros, faltas de fusión, etc.). Cuando el tanque llega con los clientes y presenta algún defecto de hermeticidad, ocasiona que la máquina tenga que ser desensamblada para reparar o cambiar el tanque ocasionando retrabajo mayor.

Se necesita definir un proceso adecuado para eliminar esto de raíz. No se puede depender 100% de la inspección de calidad (inmersión del tanque presurizado en bañera con solución antioxidante). El problema de fugas puede ser un factor determinante para la decisión de aumentar el volumen de producción de nuevos productos en la planta.

1.5 Aportación industrial

Se planea mejorar el proceso de detección de fugas con el fin de disminuir el retrabajo en tanques a presión soldados por GMAW. Así como la elaboración de las prácticas de manufactura adecuadas para la correcta ejecución del manual estándar de trabajo.

1.6 Alcances del proyecto

Realizar las recomendaciones necesarias en el manejo, control y aplicación de la soldadura por GMAW para disminuir la aparición de defectos y su impacto en el indicador general (FPY) de la planta para lograr un 98% como objetivo general.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Sistemas hidráulicos

Dentro de la mecánica clásica se denomina hidráulica a la generación de fuerzas debido al movimiento de fluidos que son sometidos a un gradiente de presión. Los fluidos sometidos a gradientes de presión son el medio para la transmisión de energía.

A finales del siglo XVII los estudios sobre aplicaciones industriales de hidráulica comenzaron a tomar mayor importancia entre la comunidad científica-industrial. La ley fundamental de la hidráulica fue definida y mencionada por primera vez en la historia en un tratado sobre la presión atmosférica de Blaise Pascal en 1653, la cual sería la base fundamental de toda la ciencia hidráulica.

Pascal demostró que cuando un fluido se encuentra en estado de reposo, la presión ejercida por el fluido es dirigida de igual manera hacia todas las direcciones, o de otra forma: “La presión existente en un líquido confinado actúa

igualmente en todas direcciones y lo hace formando ángulos rectos con la superficie del recipiente”. En la **Figura 2.1** se ilustra el principio de Pascal (1).

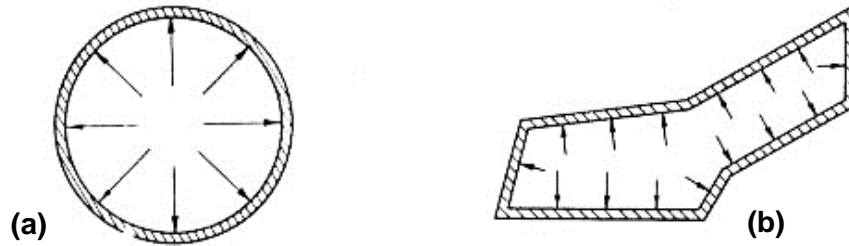


Figura 2.1 Representación gráfica del principio de Pascal en (a) Tubería de sección regular y (b) Tubería de sección irregular (1)

En la actualidad, el uso de sistemas hidráulicos para la transmisión de potencia en máquinas, constituye una de las formas tecnológicas más comúnmente empleadas. En la **Figura 2.2**, se muestra la configuración básica de un sistema hidráulico.

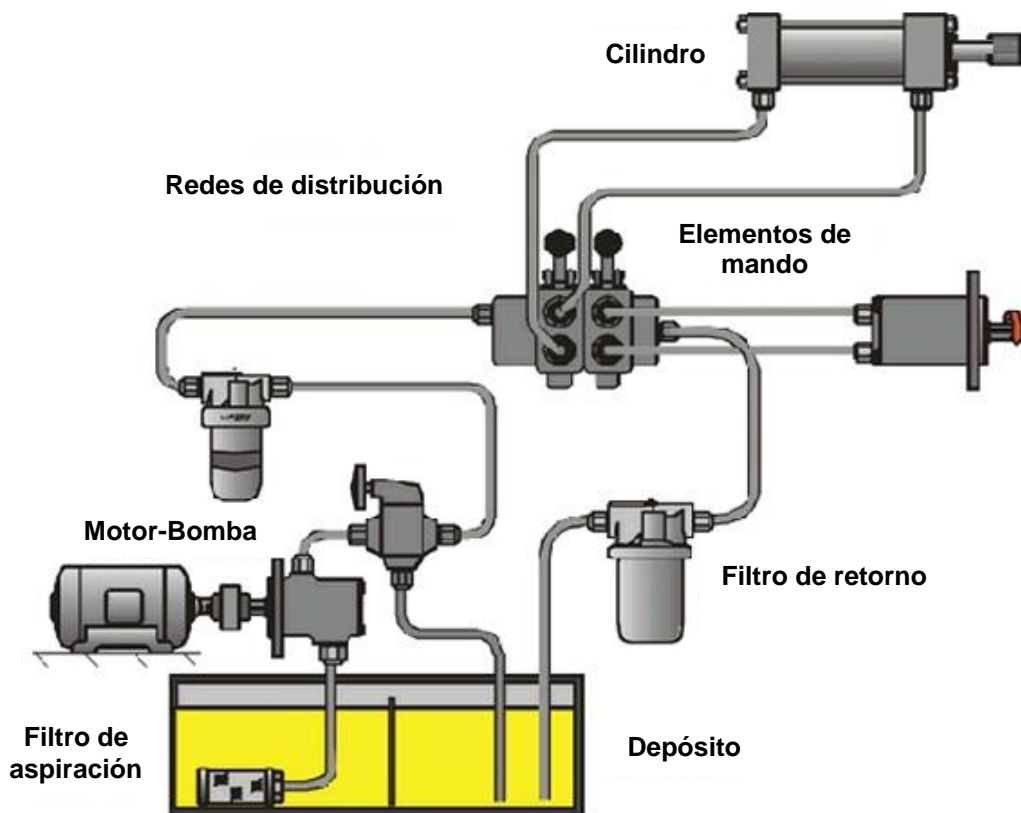


Figura 2.2 Sistema hidráulico básico (2)

2.1.1 Ventajas e inconvenientes

Los sistemas hidráulicos presentan diferencias generales frente a otros sistemas convencionales de potencia, por lo cual, tienen ventajas e inconvenientes tales como:

Ventajas

- Los sistemas hidráulicos desarrollan grandes gradientes de fuerza empleando sistemas compactos
- Control de la fuerza transmitida (regulación continua), lo cual disminuye el calentamiento por sobrecargas el cual puede ser un riesgo en general
- La gran flexibilidad de los elementos les permite tomar la configuración de cualquier geometría, como, por ejemplo: los conductos que conducen el fluido hidráulico hasta los actuadores
- Los actuadores son componentes reversibles, los cuales actúan en ambos sentidos y además permiten el frenado de la operación estando en marcha. Estos elementos hacen posible el enclavamiento del sistema en caso de que se produzca una avería o fuga del fluido hidráulico

Inconvenientes

- Una velocidad baja en el accionar de los actuadores hidráulicos
- Trabajar con altas presiones, exige vigilancia y mantenimiento preventivo periódico debido a la aparición de posibles fugas en las juntas
- La formación de lodos, sedimentos y otras partículas, debido a la presencia del fluido hidráulico
- En general, son sistemas de elevado costo en comparación con otros sistemas convencionales tales como los sistemas de aire comprimido

2.1.2 Componentes de los sistemas hidráulicos

Los sistemas hidráulicos cuentan, en su mayoría, con componentes estándar tales como: bombas, filtros, recipiente de almacenamiento (aceite o gasolina), válvula, fluido hidráulico, actuadores, dichos elementos son interconectados y unidos por medio de tubos o mangueras (1).

A continuación, se mencionan los componentes básicos para sistemas hidráulicos estándar:

A) Fluido hidráulico

En hidráulica se ha generalizado el término de fluido para hacer referencia al líquido que es utilizado como medio para la transmisión de la energía. En este sentido, el fluido hidráulico puede referirse a un aceite mineral o alguno de los fluidos sintéticos (orgánicos e inflamables).

La elección adecuada de un fluido hidráulico se realiza tomando en cuenta la aplicación, el costo y la vida útil del fluido. Además de las anteriores consideraciones estos fluidos tienen como objetivo (3):

Transmisión de la potencia al sistema. Como medio de transferencia, el fluido tiene que circular libremente por los orificios y las líneas de los componentes. Si la resistencia al flujo es demasiada, causara pérdidas de potencia considerable en el sistema. El fluido tiene que ser lo más incompresible posible, de tal forma que cuando se ponga en marcha una bomba o una válvula, la acción sea instantánea.

Lubricación. En la mayoría de los sistemas hidráulicos la lubricación interna es proporcionada por el fluido. Los componentes de las bombas y otras piezas que sufren desgaste debido a la interacción entre elementos se deslizan unas contra otras sobre una película de fluido dando como resultado el aumento en la duración de los componentes debido a la disminución en el desgaste por fricción entre elementos.

El fluido debe contener los aditivos necesarios para asegurar las buenas condiciones antidesgaste. No todos los fluidos hidráulicos contienen esos aditivos.

Estanqueidad. En la mayoría de los casos, el fluido es el único sello contra la presión dentro de un sistema hidráulico. El ajuste mecánico, composición y la viscosidad del fluido suelen determinar en gran medida el porcentaje de fugas.

Enfriamiento. La circulación del fluido a través de las líneas, componentes y alrededor de las paredes del depósito disipa parte del calor generado por el sistema. Un buen fluido hidráulico debe tener la capacidad y las propiedades adecuadas para que la disipación de calor sea la más eficiente.

Además de cubrir estas funciones elementales, el fluido hidráulico debe contar con requerimientos de calidad tales como:

- Acción antioxidante (impedir la formación de óxidos)
- Impedir la formación de sedimentos (lodos)
- Disminuir la aparición de espuma
- Calidad de su vida útil, estabilidad, costo por el cambio de fluido, etc.
- Relativa estabilidad en el índice de viscosidad para rangos de temperatura amplios
- Ser químicamente inerte y no corrosivo
- Presentar buenas condiciones en cuanto a su almacenamiento y manipulación
- Impedir la formación de picaduras por corrosión
- Separar el agua
- No ser inflamable
- Compatibilidad entre materiales de cierre y juntas
- Ser un fluido incompresible para un rango amplio de presiones

B) Tanque hidráulico

La función principal de los tanques hidráulicos es asegurar que su sistema cuente con un amplio suministro de aceite. Además, cuenta con funciones especiales dentro de los sistemas hidráulicos tales como: la capacidad de las paredes de los tanques para disipar el calor que se acumula en el aceite hidráulico, y los deflectores que ayudan a la condensación del aceite y a separar el aire. Asimismo, el facilitar la remoción de contaminantes que se sedimentan en el fondo del tanque (2).

En la **Figura 2.3**, se muestran los principales componentes de un tanque hidráulico.

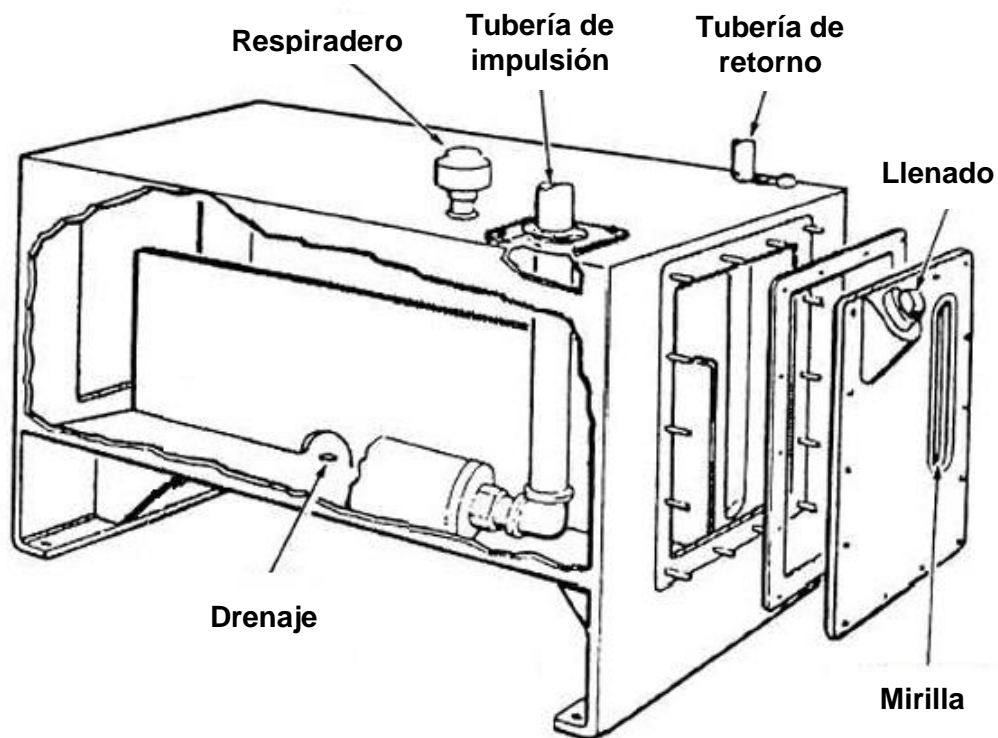


Figura 2.3 Tanque hidráulico no presurizado (2)

A continuación se mencionan los principales componentes de los tanques hidráulicos (4):

- **Tapa de llenado.** Su principal función es mantener las partículas contaminantes fuera del tanque cubriendo el orificio por el cual se añade el aceite. En tanques presurizados este aditamento ayuda a mantener hermético el sistema.
- **Mirilla.** Este aditamento permite revisar el nivel de aceite del tanque hidráulico. El nivel de fluido dentro del tanque tiene que ser revisado cuando éste se encuentra frío. En la mayoría de los casos un nivel medio de fluido en la mirilla será indicador de un nivel correcto de fluido.
- **Tuberías de suministro y retorno.** La tubería de suministro tiene como función principal el flujo libre de fluido del tanque al sistema, mientras que, la tubería de retorno permite la recirculación del sistema al tanque.
- **Drenaje.** Se encuentra en la parte baja del tanque, el drenaje permite el cambio de fluido, la cual es una operación para retirar contaminantes como el agua y sedimentos.
- **Rejilla de llenado.** Su función es evitar la entrada de contaminantes de gran tamaño al tanque cuando es retirada la tapa de llenado.
- **Tubo de llenado.** Permite el llenado correcto del tanque de acuerdo al nivel requerido evitando derrames o llenado en exceso
- **Deflectores.** Evitan que el fluido recirculado fluya directamente a la salida, dando tiempo para que las burbujas formadas en el fluido de retorno se desplacen a la superficie. Además de esto, se elimina la salpicadura por el fluido, lo que reduce la formación de espuma en el aceite.
- **Rejilla de retorno.** Aunque no realiza un filtrado fino de partículas, este aditamento disminuye el flujo libre de partículas grandes al tanque.

En la actualidad, la funcionalidad de los tanques hidráulicos móviles se clasifica en dos tipos de tanques: los tanques presurizados y los no presurizados.

Tanque presurizado. La principal característica es que brinda un sellado completo por lo cual proporciona un cierre hermético favorable ya que no existe una interacción entre la presión externa y la presión interna del tanque.

El aumento de temperatura del fluido por su interacción con el sistema aumenta su volumen (se expande), esta acción tiene como resultado que el aire comprimido haga fluir el aceite del tanque al sistema.

Este tipo de tanque cuenta con una válvula de alivio o de vacío (ver **Figura 2.4**), la cual limita la presión máxima a la cual puede operar el sistema ya que evita el vacío en el tanque; los valores a los que se encuentra regulada varían entre 10 a 30 psi.

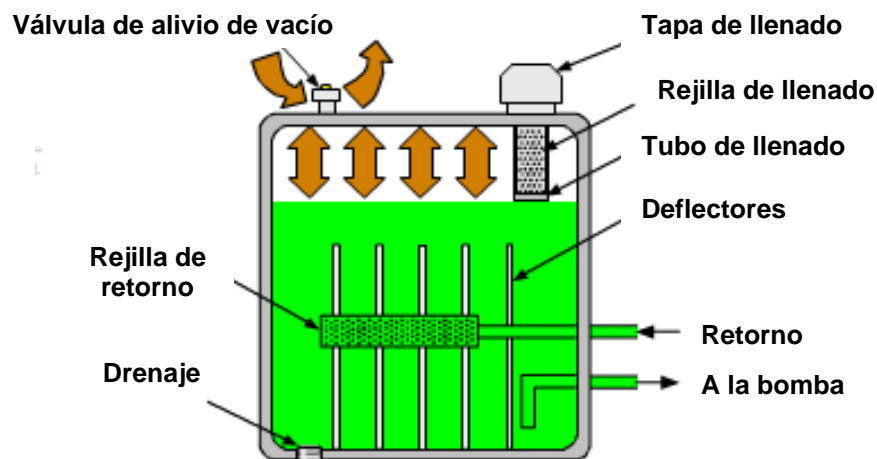


Figura 2.4 Tanque presurizado (4)

Tanque no presurizado. Este tipo de tanque cuenta con respiradero en lugar de la válvula de vacío (tanque presurizado), este respiradero permite la interacción del aire dentro del tanque, dando como resultado el flujo del aceite del tanque al sistema por acción de la presión atmosférica.

En la **Figura 2.5**, se muestra la configuración básica de un tanque no presurizado.

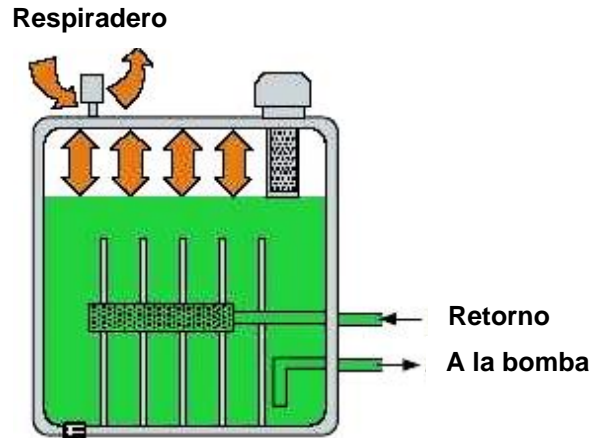


Figura 2.5 Tanque no presurizado (4)

Simbología. En la **Figura 2.6** se muestra la representación gráfica de los símbolos para el tanque hidráulico según la norma ISO. Para el tanque no presurizado el símbolo consta de un rectángulo parcialmente abierto en la parte superior, mientras que el símbolo utilizado para el tanque presurizado es representado por un rectángulo completamente cerrado.

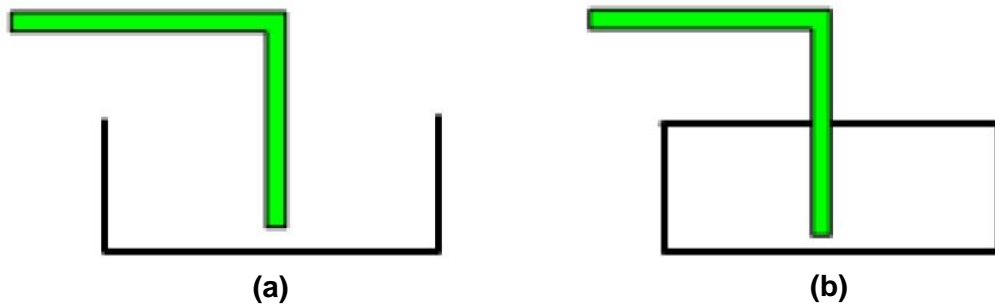


Figura 2.6 Simbología de los tanques hidráulicos según ISO para (a) Tanque no presurizado y (b) Tanque presurizado (4)

Aplicaciones. Dentro de las principales aplicaciones para los tanques no presurizados se encuentran en: rodillos vibratorios, camiones mineros, etc. Por otro lado, las excavadoras, retroexcavadoras y pavimentadoras, utilizan tanques presurizados.

C) Bombas hidráulicas

Su principal función es convertir la energía mecánica producida por un motor primario (combustión interna, eléctrico, etc.) en energía hidráulica. La función de bombear no tiene diferencia entre bomba y bomba, por lo cual, es la misma para todas las bombas la cual consiste en la generación de un volumen creciente por el lado de la succión y una disminución gradual en el lado de la presión (ver **Figura 2.7**). En los sistemas hidráulicos industriales, el tipo más común de bomba que se emplea es la de desplazamiento positivo, entre las cuales se encuentran bombas de engranes, pistones y paletas.

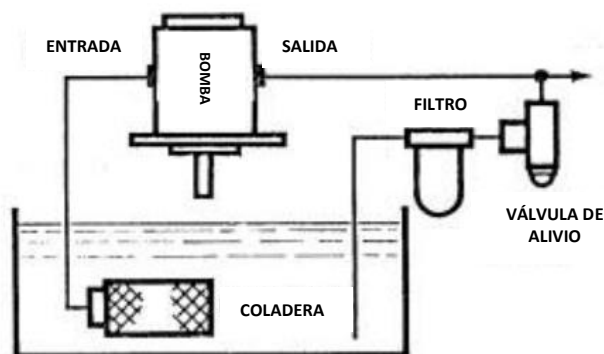


Figura 2.7 Bomba hidráulica (4)

D) Elementos de regulación y control

Estos dispositivos que se denominan válvulas, controlan el funcionamiento y dirección del sistema, así como el flujo y presión enviado a la bomba, y de ser necesario, el bloqueo del sistema.

Las válvulas constan de dos partes: una parte estática y una móvil, que se conecta con otras partes del dispositivo. Estos elementos pueden ser activados de diferentes formas: manualmente, por circuitos eléctricos, neumáticos, hidráulicos o mecánicos.

Dependiendo de la aplicación que se requiera, las válvulas se dividen en: válvulas de bloqueo, caudal, presión y cierre.

E) Filtro

Es el componente principal del sistema de filtrado de una maquina hidráulica. Estos sistemas son altamente utilizados para el control de contaminantes (partículas, lodos, basura, rebabas, etc.) de procedencia externa o generados dentro del sistema. La acción anterior permite aumentar la vida útil de los componentes del equipo, así como la del fluido hidráulico.

H) Actuadores

Este dispositivo transforma la energía de compresión del aire o del fluido en energía mecánica, la cual será aplicada posteriormente. Según el tipo de desplazamiento realizado, existen dos tipos de actuadores:

- Los cilindros: que producen un desplazamiento rectilíneo
- Los motores: que producen un desplazamiento rotativo

I) Red de distribución

Una correcta regulación y distribución de la presión y velocidad del fluido, garantizan homogeneidad en todos los puntos del sistema. En instalaciones hidráulicas, al contrario de las neumáticas, es necesario utilizar un controlador de reflujo para aumentar la eficiencia del sistema. Dependiendo del uso, el material utilizado suele ser acero o plástico reforzado.

2.1.3 Aplicaciones de los sistemas hidráulicos

En la actualidad la mayoría de las aplicaciones de la hidráulica y neumática están principalmente enfocadas al diseño y fabricación de dispositivos de mayor precisión y mejor calidad. Lo anterior ha permitido la fabricación de equipos que permiten realizar trabajos con mayor precisión y aprovechando mayores niveles de energía, dando como resultado un aumento en el desarrollo de la industria en general.

Las aplicaciones de los sistemas hidráulicos se pueden clasificar principalmente en dos:

Aplicaciones Móviles. El uso de la energía suministrada por el aire y fluido a presión, es utilizado para transportar, excavar, desplazar, perforar, manipular materiales y controlar vehículos como por ejemplo: vehículos de construcción y reparación de carreteras, retroexcavadoras, excavadoras (ver **Figura 2.8**), cargadores frontales, frenos y suspensiones de automóviles y camiones, aeronáutica, tractores y grúas.

Aplicaciones Industriales. Dentro de la industria, es de vital importancia proveer a la línea de producción de maquinaria especializada en controlar, regular, impulsar, desplazar, manipular, posicionar y automatizar elementos o materiales con el fin de hacer más eficiente el proceso. Debido a lo anterior, el uso de la energía proporcionada por los fluidos comprimidos (aire, aceite, etc.), se emplea regularmente en este tipo de aplicaciones. Se tiene entre otros: maquinaria para la industria plástica (inyectoras, extrusoras, etc.), industria alimenticia, minería, siderúrgica, además de equipo para montaje industrial y robótica automatizada.

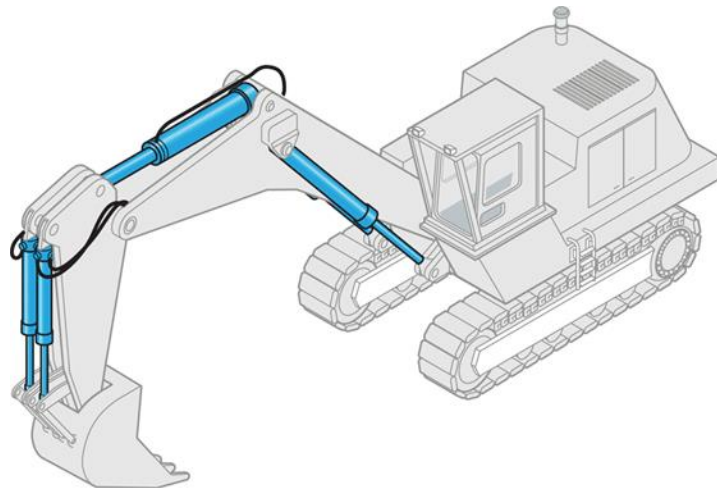


Figura 2.8 Ejemplo de sistema hidráulico en excavadora (2)

2.2 Aceros HSLA microaleados

Los aceros de baja aleación constituyen una categoría entre los materiales ferrosos los cuales exhiben propiedades mecánicas superiores a la de los aceros al carbono, esto debido a la adición de elementos de aleación tales como el níquel, cromo y molibdeno.

Para la gran mayoría de los aceros de baja aleación, la función principal de la adición de elementos aleantes, es aumentar la templabilidad con el fin de optimizar las propiedades mecánicas y la dureza después del tratamiento térmico.

En algunos casos, sin embargo, la adición de estos elementos aleantes se utiliza para reducir la degradación del material por contacto con el medio ambiente en determinadas condiciones de servicio especificadas.

Debido a la amplia variedad de composiciones químicas posibles y el hecho de que algunos aceros se utilizan en más de una condición tratada térmicamente, existe cierta superposición entre la aleación y la clasificación del acero. Por esta razón, los aceros aleados se pueden dividir en tres grupos principales: aceros de baja aleación templados (QT), aceros de baja aleación y alta resistencia (HSLA por sus siglas en inglés), aceros de baja aleación tratados térmicamente. El presente trabajo, enfoca su análisis sobre las generalidades de los aceros HSLA.

Los aceros HSLA son un grupo de aceros de bajo y medio carbono que por lo general utilizan pequeñas cantidades de elementos de aleación para alcanzar límites elásticos aproximadamente por encima de 345 MPa (50 ksi) en diversos tratamientos térmicos como, por ejemplo: laminado en caliente, laminado en frío, recocido, relevado de esfuerzos, templado, o normalizado.

En algunos casos se les llama aceros microaleados, debido a las pequeñas cantidades de vanadio, niobio, y/o titanio que se agregan para el refinamiento de grano y el endurecimiento por precipitación (5).

Los aceros de alta resistencia y baja aleación (HSLA), o aceros microaleados, están diseñados para proporcionar las mejores propiedades mecánicas y/o una mayor resistencia a la corrosión que los aceros al carbono convencionales. Estos aceros no se consideran como aceros de aleados en el sentido normal ya que están diseñados para cumplir con las propiedades mecánicas específicas y la composición química del producto (6).

La composición química específica de los aceros HSLA varía según el espesor del producto para satisfacer los requisitos de propiedades mecánicas. Para este tipo de aceros el contenido de carbono oscila entre el 0.05 a 0.25% C (bajo carbono) para productos en hoja o forma de la placa a fin de producir una adecuada conformabilidad y soldabilidad, ya que el contenido de manganeso es de hasta 2.0%. Las pequeñas cantidades de cromo, níquel, molibdeno, cobre, nitrógeno, vanadio, niobio, titanio, y de circonio se utilizan en diversas combinaciones como se muestra en la **Tabla 2.1**.

Tabla 2.1 Composición química nominal de los aceros HSLA [% e. p.] (7)

C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo	V	Nb
0.05 - 0.25	0.50 - 1.5	<0.04	<0.05	0.20 - 0.35	0.0 - 0.75	0.0 - 0.75	0.0 - 0.25	0.0 - 0.05	0.0 - 0.04

En la **Figura 2.9**, se muestra la comparación del ensayo Charpy V para diferentes aceros y su efecto sobre la tenacidad. Los aceros de baja aleación con tratamiento térmico y los aceros HSLA laminados proporcionan baja ductilidad y fragilidad después de ser sometidos a temperaturas de transición variadas en comparación con los aceros al carbono. En términos de sus propiedades mecánicas, los aceros de baja aleación (templados y revenidos) con tratamiento térmico ofrecen la mejor combinación de resistencia y tenacidad (8). Sin embargo, estos aceros están disponibles principalmente como barras y placas, y sólo de vez en cuando, como láminas y perfiles estructurales. En particular, las formas estructurales (vigas, canales, vigas anchas, bridas o secciones especiales) suelen ser difíciles de producir en condiciones de templado y revenido, ya que se forma distorsión durante el enfriamiento rápido.

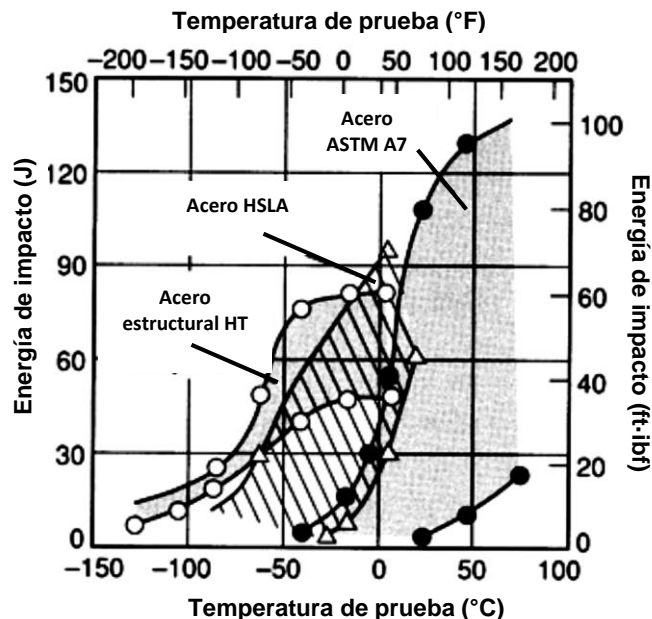


Figura 2.9 Resultados del ensayo Charpy V en acero de medio carbono (ASTM A283 grado D), acero HSLA y un acero estructural con tratamiento térmico (8)

2.2.1 Aplicaciones de aceros HSLA

Las aplicaciones de los aceros HSLA incluyen oleoductos y gasoductos, vehículos de carga pesada y todo terreno, equipos de construcción y maquinaria agrícola, equipos industriales, tanques de almacenamiento, carros de minería y vagones de ferrocarril, barcas, vehículos para nieve, cortadoras de césped, y componentes de automóviles de pasajeros. Además de las aplicaciones antes mencionadas el uso de esos aceros se ve reflejando en puentes, torres de transmisión de potencia, postes de luz, y vigas de construcción.

La elección de la alta resistencia específica del acero, depende de un cierto número de criterios dirigidos a la aplicación entre los cuales se incluye la reducción de espesor, resistencia a la corrosión, la conformabilidad, y soldabilidad. En la mayoría de las aplicaciones, el proceso de selección del acero está dirigido a la relación resistencia/peso de los aceros HSLA en comparación con los aceros de bajo carbono convencionales. Esta característica ha aumentado el uso de los aceros HSLA en diversos componentes de la industria automotriz (6).

En la **Tabla 2.2** se describen algunos aceros HSLA, su disposición y sus aplicaciones.

Tabla 2.2 Aplicaciones de los aceros HSLA descritos en las especificaciones ASTM (9)

Especificación ASTM	Elementos de aleación	Aplicaciones
A 242	Cr, Cu, N, Si, Ti, V, Zr	Miembros estructurales soldados, atornillados o remachados
A 572	Nb, V, N	Estructuras soldadas, atornilladas o remachadas, sobre todo en puentes y edificios remachados o atornillados
A 588	Nb, V, Cr, Ni, Mo, Cu, Si, Ti, Zr	Estructuras soldadas, atornilladas o remachadas principalmente puentes y construcciones soldadas
A 606	No especificado	Estructural y diversos propósitos donde el ahorro en peso y durabilidad son importantes
A 607	Nb, V, N, Cu	Estructural y diversos propósitos en los cuales mayor resistencia y ahorros en peso son necesarios
A 618	Nb, V, Si, Cu	Propósitos estructurales en general
A 633	Nb, V, Cr, Ni, Mo, Cu, N, Si	Estructuras soldadas, atornilladas y remachadas que están en servicio a temperaturas mayores a -45°C
A 656	V, Al, N, Ti, Si	Bastidores de camiones, brazos de grúas, vagones de ferrocarril
A 690	Ni, Cu, Si	Muros de muelles, rompeolas, malecones y estructuras similares expuestas a ambientes marinos
A 709	V, Nb, N, Cr, Ni, Mo	Puentes
A 714	V, Ni, Cr, Cu, Mo, Nb	Tubería
A 715	Nb, V, Cr, Mo, N, Si, Ti, Zr, B	Aplicaciones estructurales donde la alta resistencia, el ahorro de peso y la buena soldabilidad son necesarios
A 808	V, Nb	Ferrocarriles
A 812	V, Nb	Recipientes a presión soldados en capas
A 841	V, Nb, Cr, Mo, Ni	Recipientes a presión soldados
A 847	Cu, Cr, Ni, Si, V, Ti, Zr, Nb	Tubos estructurales redondos, cuadrados o formas especiales para construcciones soldadas, atornilladas o remachadas
A 860	Cu, Cr, Ni, Mo, V, Ti, Nb	Líneas de conducción de alta presión de gas y petróleo
A 871	Cu, Cr, Ni, Mo, V, Nb, Ti	Estructuras tubulares y postes

2.2.2 Selección del acero HSLA

La comparación entre el costo de diversos aceros suele ser por lo general la justificación para la elección entre los diversos tipos de aceros HSLA. Este tipo de acero tiene un costo mayor que los aceros al carbono o incluso que los aceros aleados que compiten para una determinada aplicación. Este tipo de acero presenta algunas ventajas sobre otros materiales tales como:

- Reducción de peso, diseños más eficientes con el aumento y mejora de propiedades
- Reducción de costo por fabricación y manufactura
- Disminución de costo de transportación por reducción de peso

En la industria automotriz, la principal ventaja de sustituir el acero bajo carbono por acero HSLA es la reducción del peso. Ésta se consigue al disminuir la sección de las piezas al ser más resistente el acero HSLA. Otro beneficio que presenta el uso de este tipo de aceros es la eliminación de algunas operaciones de fabricación y/o manufactura relacionada con el tratamiento térmico de algunos aceros al carbono. Así, por ejemplo, el empleo de acero HSLA representa la eliminación de procesos térmicos de recocido, templado, relevado de esfuerzos, etc. Así el uso de aceros HSLA en industria metal-mecánica puede representar ahorros de un 10% en comparación con el uso de otros tipos de acero. Además de las ventajas que representa el uso de este tipo de aceros, algunos otros factores que pueden influir en la selección de los aceros HSLA son:

- Tenacidad. La resistencia y tenacidad aumenta después del laminado.
- Propiedades de fatiga. Son adecuadas excepto en uniones soldadas.
- Soldabilidad. Ha dejado de ser un problema debido a la adición de ciertos elementos que aumentan esta propiedad.
- Maquinabilidad. Muy buena debido a la adición de calcio y niobio.
- Resistencia a la corrosión. Aumento hasta 8 veces en comparación con aceros al carbono.

2.2.3 Clasificación de los aceros HSLA

Los aceros HSLA se encuentran designados con números y grados, estos se pueden clasificar en seis categorías las cuales se muestran en la **Figura 2.10**:

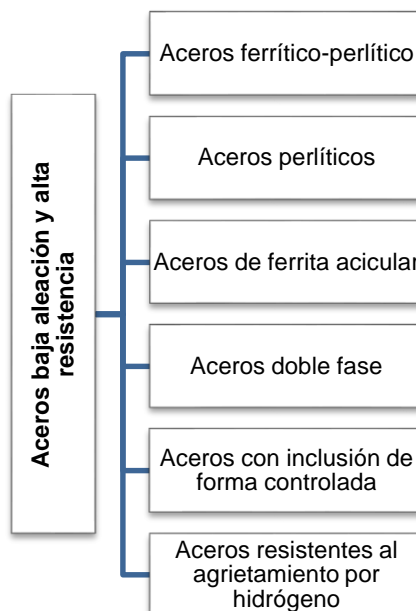


Figura 2.10 Clasificación de los aceros HSLA (8)

Aceros microaleados ferrítico-perlítico. Estos aceros contienen elementos tales como el niobio, vanadio o titanio los cuales son elementos formadores de carburos y carbonitruros cuya composición es menor al 0.10%. La adición de estos elementos favorece el control de la temperatura de transformación, el endurecimiento por precipitación y el refinamiento de grano.

Aceros perlíticos laminados. Estos aceros contienen pequeñas adiciones de elementos con el fin de mejorar las propiedades del material tales como: la formabilidad, resistencia, tenacidad, y soldabilidad. Además de lo anterior, este grupo puede incluir a los aceros al carbono-manganeso.

Aceros resistentes al agrietamiento inducido por hidrógeno. Presentan bajo contenido de carbono y azufre, además de contar con inclusión y segregación de magnesio controlada y contenido de cobre mayor al 0.26%.

Aceros de doble fase. Tienen una microestructura martensítica dispersa en una matriz ferrítica lo cual proporciona buena ductilidad y tenacidad.

Aceros de inclusión de forma controlada. Estos proporcionan mejor ductilidad y un aumento en la dureza por las pequeñas adiciones de elementos tales como calcio, circonio o titanio, o elementos de tierras raras, de tal forma que las inclusiones de sulfuros cambian de su forma alargada a pequeñas esferas dispersas en el acero (8).

Aceros de ferrita acicular (Bainita de bajo carbono). Son aceros de bajo carbono (< 0.05% de C) los cuales presentan una excelente respuesta al esfuerzo de cedencia, (de hasta 690 MPa, o de 100 ksi) soldabilidad, formabilidad, y buena tenacidad.

Estas categorías no son necesariamente excluyentes unas de otras, es decir, un acero HSLA puede presentar características de más de un grupo, por ejemplo todos los grupos anteriormente mencionados pueden tener inclusiones de escoria de forma controlada (9).

2.2.4 Designación de los aceros HSLA

De acuerdo a la Sociedad de Ingenieros Automotrices (SAE), los grados específicos de estos aceros son identificados en una nomenclatura de seis dígitos (ABCXYZ) que describen el nivel de resistencia, composición química general, nivel general de carbono, etc. como sigue:

- Primer, segundo y tercer caracter. Mínimo esfuerzo de cedencia expresado en miles de libras por pulgada cuadrada (ksi).
- Cuarto caracter. Composición química general:
- X - Alta resistencia baja aleación, que puede ser Cr, Cu, Mo, Nb, Ni, Si, Ti, V, Zr cualquiera ligeramente o en combinación, con 10ksi (70 MPa) de diferencia entre la especificación mínima de cedencia y resistencia a la tensión.

- Y - Con el mismo significado de X pero con 15 ksi (100 MPa) de diferencia entre la especificación mínima de cedencia y la resistencia a la tensión.
- Z - Con el mismo significado de X pero con 20 ksi (140 MPa) de diferencia entre la especificación mínima de cedencia y la resistencia a la tensión.
- Quinto caracter. Nivel general de carbono.
 - H - Máximo nivel de carbono 0.23%
 - L - Máximo nivel de carbono 0.13%
- Sexto caracter. Práctica de desoxidación o de control de inclusiones de sulfuros:
 - K - Calmado con práctica de grano fino.
 - F - Calmado con práctica de grano fino y control de inclusiones de sulfuros (10).

2.2.4.1 Especificaciones ASTM para aceros HSLA

De acuerdo con ASTM existen varios grados de acero HSLA A 242, A 572, A 588, A 606, A 715, A 808 etc. Estos aceros se han desarrollado como una fusión entre las características de fabricación y el bajo costo de aceros al carbono y la alta resistencia de los aceros aleados tratados térmicamente. En su condición de laminado, estos aceros tienen una excelente resistencia y ductilidad.

2.2.4.2 Aceros estructurales de baja aleación y alta resistencia

Los aceros HSLA estructurales contienen valores típicos menores de 0.20% de C y menos de 2% de elementos aleantes. Se diferencian de otras aleaciones debido a que están diseñados para cumplir los requisitos específicos de propiedades mecánicas, en lugar de una composición química específica.

Estos aceros tienen límites elásticos mínimos que van desde 275 hasta 550 MPa y valores para la resistencia a la tracción de 415 hasta 655 MPa. Los aceros estructurales HSLA en condición de laminado están clasificados según

especificaciones ASTM como A 242, A 440, A 441, A 572, A 588, A 606, A 607, A 618, A 633, A 656, A 690, A 710 y A 715. Otros aceros HSLA están cubiertos por la Sociedad de Ingenieros Automotrices (SAE) práctica recomendada J410C.

Algunos Aceros HSLA estructurales contienen cobre, fósforo, níquel, cromo, silicio y en varias combinaciones y cantidades que proporcionan un nivel de resistencia a la corrosión que es hasta cuatro veces mejor que la de acero al carbono. La composición química típica nominal de aceros HSLA estructurales según la especificación ASTM está dada en la **Tabla 2.4**.

Selección del material de aporte. El factor predominante en la mayoría de las aplicaciones de los aceros HSLA es la resistencia a la tracción que ofrecen de acuerdo al contenido incidental de la aleación. En consecuencia, se selecciona el metal de aporte, con la finalidad de proporcionar un metal de soldadura que cumpla con los requerimientos mínimos de resistencia a la tracción y propiedades mecánicas similares a las del metal base. Sin embargo, debido a la resistencia a la corrosión atmosférica, los aceros HSLA suelen ser empleados con mayor frecuencia que otros aceros con las mismas propiedades mecánicas. Tales aplicaciones requieren que el contenido de aleación y resistencia a la corrosión esté considerado en el metal de soldadura depositado.

Los materiales de aporte sugeridos para el proceso GMAW de aceros estructurales de baja aleación se dan en la **Tabla 2.3**.

Tabla 2.3 Selección de consumibles para soldar aceros estructurales HSLA (9)

Proceso	Material de aporte		Metal base			
	Especificación ANSI/AWS	Consumible ^(A)	Especificación ASTM	Espesor		Grado
				mm	pulg	
GMAW	A5.18	ER70S-X	A 242	≤100	≤4	...
			A 441	Todos	Todos	...
			A 572	42, 50
			A 588	≤100	≤4	...
			A 633	≤65	≤2 ½	A, B, C, D
	A5.28	ER80S-XX ^(B)	A 572	60, 65
			A 633	E

(A) Consultar el apartado ANSI / AWS sobre especificaciones del material de aporte y la información sobre el significado de "X" utilizado en las designaciones del metal de aporte. Otras clasificaciones de metal de relleno (por ejemplo, A5.5; E80XXX, E7018-W o E8018-W electrodos revestidos), y las correspondientes a electrodos para procesos SAW, GMAW, FCAW con el fin de lograr requisitos de tenacidad, corrosión y resistencia a las condiciones atmosféricas.

(B) PARA PUENTES, LA SOLDADURA DE METALES NO TENDRÁ UN MÍNIMO EN LA PRUEBA CHARPY V DE IMPACTO. FUERZA DE 27 J (20 FT · LBF) a -20 °C

Tabla 2.4 Composición química nominal [%e. p.] y rangos de dureza para aceros estructurales HSLA (9)

ASTM	Grado	Composición (%e.p.) ^A										Mínimo esfuerzo de tensión		Mínimo esfuerzo de cedencia	
		C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo	V	Otros	MPa	ksi	MPa	ksi
A 242	1	0.15	1.00	0.15	0.05		-	-	-	-	0.20 MIN Cu	435-485	63-70	290-345	42-50
A 441	1	0.22	0.85-1.25	0.04	0.05	0.30	-	-	-	-	0.20 MIN Cu, 0.02 MIN V	415-485	60-70	275-345	40-50
A 572	42 ^B	0.21	1.35	0.04	0.05	0.30	-	-	-	-	0.20 MIN Cu	415	60	290	42
	50 ^B	0.23	1.35	0.04	0.05	0.30	-	-	-	-	0.20 MIN Cu	450	65	345	50
	60 ^B	0.26	1.35	0.04	0.05	0.30	-	-	-	-	0.20 MIN Cu	515	75	415	60
	65 ^B	0.26	1.35	0.04	0.05	0.30	-	-	-	-	0.20 MIN Cu	550	80	450	65
A 588	A	0.10-0.19	0.90-1.25	0.04	0.05	0.15-0.30	0.40-0.65	-	-	0.02-0.10	0.25-0.40 Cu	435-485	63-70	290-345	42-50
	B	0.20	0.75-1.25	0.04	0.05	0.15-0.30	0.40-0.70	0.25-0.50	-	0.01-0.10	0.20-0.40 Cu	435-485	63-70	290-345	42-50
	C	0.15	0.80-1.35	0.04	0.05	0.15-0.30	0.30-0.50	0.25-0.50	-	0.01-0.10	0.20-0.50 Cu	435-485	63-70	290-345	42-50
	D	0.10-0.20	0.75-1.25	0.04	0.05	0.50-0.90	0.50-0.90	-	-	-	0.30 CU; 0.05-0.15 Zr; 0.04 Nb	435-485	63-70	290-345	42-50
	E	0.15	1.20	0.04	0.05	0.15-0.30	-	0.75-1.25	0.10-0.25	0.05	0.50-0.80 Cu	435-485	63-70	290-345	42-50
	F	0.10-0.20	0.50-1.00	0.04	0.05	0.30	0.30	0.40-1.10	0.10-0.20	0.01-0.10	0.30-1.00 Cu	435-485	63-70	290-345	42-50
	G	0.20	1.20	0.04	0.05	0.25-0.70	0.50-1.00	0.80	0.10	-	0.30-0.50 Cu; 0.07 TI	435-485	63-70	290-345	42-50
	J	0.20	1.25	0.035	0.040	0.25-0.75	0.10-0.25	0.30-0.60	0.15	0.02-0.10	0.20-0.35 CU; 0.005-0.030 TI	435-485	63-70	290-345	42-50
A 633	A	0.18	1.00-1.35	0.04	0.05	0.15-0.50	-	-	-	-	0.05 NB	435-570	63-83	290	42
	C	0.20	1.15-1.50	0.04	0.05	0.15-0.50	-	-	-	-	0.01-0.05 NB	450-620	65-90	315-345	46-50
	D	0.20	1.00-1.35	0.04	0.05	0.15-0.50	0.25	0.25	0.08	-	0.35 CU	450-620	65-90	315-345	56-50
	E	0.22	1.15-1.50	0.04	0.05	0.15-0.50	-	-	-	0.04-0.11	0.01-0.03 N	515-700	75-100	380-415	55-50
A 710	A	0.07	0.40-0.70	0.025	0.025	0.35	0.60-0.90	0.70-1.00	0.15-0.25	-	1.00-1.30 CU; 0.02 MIN NB	450-620	65-90	380-585	55-85
	B	0.06	0.40-0.65	0.025	0.025	0.20-0.35	-	1.20-1.50	-	-	1.00-1.30 CU; 0.02 MIN NB	605-620	88-90	515-585	75-85

A) Valores individuales para cada uno de los compuestos

B) Estos grados pueden contener Nb, V, N, Ti

2.2.5 Control de las propiedades

La mayoría de los aceros HSLA son entregados en su condición de laminación en caliente con microestructura de ferrita y perlita. Las excepciones son aquellos aceros con microestructura de ferrita acicular y los de doble fase los cuales utilizan la formación de una estructura mixta para su endurecimiento, mientras que los aceros ferrítico-perlíticos generalmente requieren del endurecimiento de ferrita. La perlita es generalmente un agente de endurecimiento indeseable en aceros estructurales debido a que reduce la tenacidad al impacto y requiere altos contenidos de carbono (9).

2.2.5.1 Mecanismos de endurecimiento de la ferrita

La ferrita en aceros HSLA es típicamente endurecida por refinamiento de grano, endurecimiento por precipitación y en menor medida por solución sólida. El refinamiento de grano es el mecanismo de endurecimiento más deseable ya que no sólo mejora la resistencia, sino que también lo hace con la tenacidad (9).

Refinamiento de grano. Este es afectado por los efectos del diseño de aleación y los métodos de procesamiento utilizados en las diferentes etapas del laminado en caliente, los cuales incluyen:

- La adición de titanio o aluminio para retardar el crecimiento de grano austenítico cuando el acero es recalentado para deformación en caliente o subsecuente tratamiento térmico.
- El laminado controlado de aceros microaleados para condicionar la austenita para que transforme a ferrita de grano fino.
- El uso de aleantes o rápidas velocidades de enfriamiento para reducir la temperatura de transformación de austenita a ferrita.

El uso de altas velocidades de enfriamiento para refinamiento de grano puede requerir consideraciones de su efecto en el endurecimiento por precipitación y la posibilidad de productos indeseables de transformación (9).

Endurecimiento por precipitación. Ocurre de la formación de partículas finamente dispersas desarrolladas durante el calentamiento y enfriamiento. Debido a que el endurecimiento por precipitación es generalmente asociado con una reducción en tenacidad, el refinamiento de grano es a menudo utilizado en conjunto con el endurecimiento por precipitación para mejorar la tenacidad (9).

El endurecimiento por precipitación está influenciado por el tipo de carbonitruro, su tamaño de grano y por el número de carbonitruros precipitados, la formación de carburos (MC) resulta ser más efectivo en el endurecimiento por precipitación de los aceros microaleados con niobio o titanio.

Para obtener el mismo incremento en la resistencia, mayor cantidad de titanio es necesario comparado con el niobio. El número de partículas finas de MC formadas durante el calentamiento y enfriamiento está determinado por la solubilidad de los carburos en la austenita (9).

Solución sólida. La función principal de los elementos aleantes es contribuir al endurecimiento de la ferrita. Los elementos de aleación son seleccionados para influir en la temperatura de transformación de austenita a ferrita cuyos productos son de grano muy fino (6).

2.2.6 Elementos de aleación en aceros HSLA

Los elementos aleantes tienen como función principal llevar a cabo el endurecimiento de la ferrita por medio de refinamiento de grano, endurecimiento por precipitación o endurecimiento por solución sólida, el cual se relaciona con la composición de la aleación como se observa en la **Figura 2.11**, mientras que los otros mecanismos de endurecimiento dependen de complejos efectos en el diseño de la aleación y el posterior tratamiento termomecánico. Estos elementos son seleccionados por su influencia en la temperatura de transformación de la austenita a ferrita la cual presenta refinamiento de grano como producto de transformación, que representa la mayor fuente de endurecimiento (9).

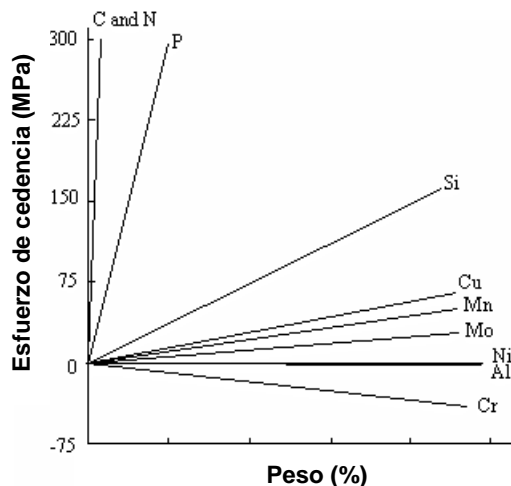


Figura 2.11 Endurecimiento por solución sólida de ferrita (9)

Carbono. Es un potente endurecedor de fase ya que aumenta significativamente la cantidad de perlita en la microestructura además de ser económico; sin embargo, la presencia de altas concentraciones de este elemento disminuye considerablemente la soldabilidad y la resistencia al impacto del acero. El contenido máximo de carbono en aceros HSLA en su condición de laminado es de aproximadamente 0.20% (8).

Silicio. Es utilizado como desoxidante en el metal líquido, posee un efecto de refuerzo de alta resistencia en aceros de baja aleación. Tiene un efecto significativo en el rendimiento para la mejora del esfuerzo a la cedencia por endurecimiento en solución sólida (ver **Figura 2.11**) y es ampliamente utilizado en aceros HSLA para estructuras remachadas o atornilladas. Se puede utilizar hasta 0.30% en aceros soldables pero cantidades mayores produce deterioro en la tenacidad y capacidad de soldadura (11).

El silicio también aumenta la dureza de la martensita templada a todas las temperaturas de revenido. Por otra parte, tiene un efecto retardante sustancial sobre ablandamiento a 316 °C (600 °F), y que ha sido atribuido al efecto inhibitor de silicio sobre la conversión de ϵ -carburo (Fe_5C_2) a cementita (8).

Manganeso. Es el principal elemento endurecedor en aceros de alta resistencia al carbono en cantidades aproximadas al 1.00%, actúa como endurecedor en solución sólida en la ferrita, además de mejorar el endurecimiento por precipitación en aceros con vanadio, proporciona una marcada disminución de la temperatura de transformación austenita-ferrita mediante el aumento del campo de la fase austenita (ver **Figura 2.12**).

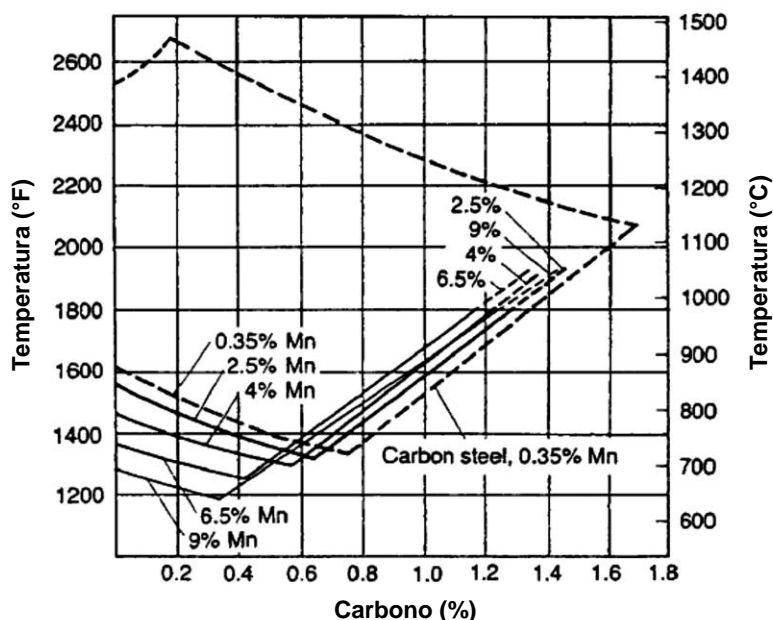


Figura 2.12 Efecto de la adición de manganeso sobre la fase austenita (12)

Níquel. Se puede añadir en cantidades de hasta aproximadamente 1.00% en varios aceros HSLA. Aumenta moderadamente el endurecimiento por solución sólida de la ferrita (ver **Figura 2.11**).

En aceros HSLA, mejora resistencia a la corrosión atmosférica y, cuando está presente en combinación con fósforo, aumenta la resistencia a la corrosión al agua de mar. Por otro lado, el níquel tiene un efecto relativamente pequeño sobre la dureza de martensita revenida. Debido a que el níquel no es un formador de carburos, su influencia se considera débil para el fortalecimiento en solución sólida. Existe una interacción entre la aleación de manganeso y níquel que debe tenerse en cuenta a temperaturas de temple más bajas.

Cromo. Es formador de carburos que tienen un efecto en el ablandamiento de martensita a todas las temperaturas. El cromo disminuye significativamente el campo de fase de austenita (ver **Figura 2.13**), por lo tanto, estabiliza la fase de ferrita mediante la restricción de la transformación de ferrita-austenita. El cromo se añade con frecuencia con el cobre para obtener una mejor resistencia a la corrosión atmosférica.

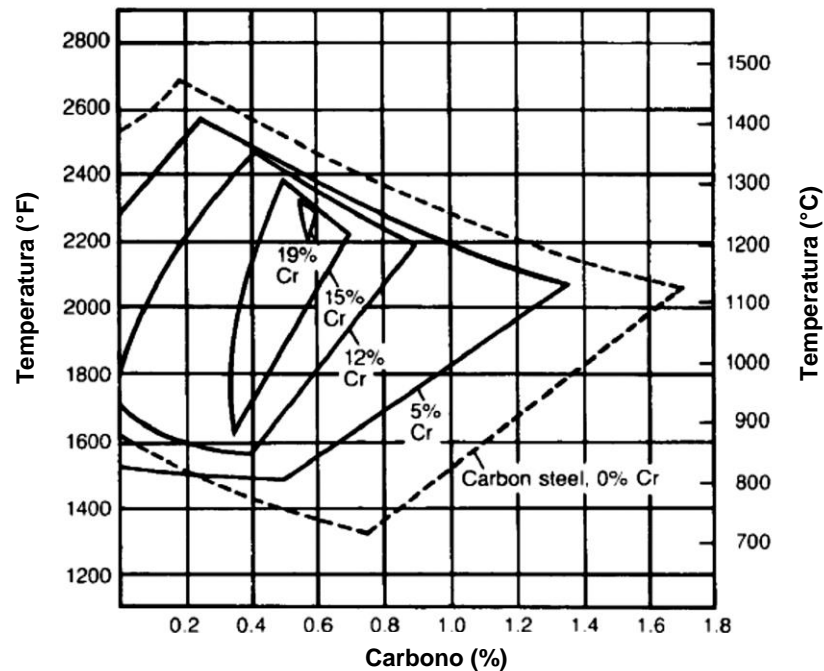


Figura 2.13 Efecto del contenido de cromo en el tamaño de campo de la fase austenita (8)

Cobre. Es agregado en cantidades de 0.20% para proveer resistencia a la corrosión atmosférica, la cual es mejorada cuando el fósforo está en cantidades de 0.05%. El cobre en cantidades de 0.50% mejora la resistencia del acero por endurecimiento de ferrita, acompañado con un ligero decremento en la ductilidad.

En cantidades mayores al 0.60% precipita el cobre ϵ , que endurece la ferrita. Con alrededor de un 1% de cobre, el esfuerzo de cedencia tiene un incremento de 70 a 140 MPa (10 a 20 ksi), sin embargo, por encima de 0.75% presenta efectos adversos en su tenacidad y soldabilidad. El endurecimiento por precipitación de cobre le da al acero una mejor capacidad de ser formado.

Molibdeno. El molibdeno en los aceros HSLA laminadas en caliente se utiliza principalmente para mejorar la templabilidad cuando se desean productos de transformación distintos de ferrita-perlita. Por ejemplo, el molibdeno es un ingrediente esencial para la producción de aceros laminados con ferrita acicular. Además, se mejora la eficacia de las propiedades a elevadas temperaturas. También retarda el ablandamiento de martensita a diferentes temperaturas de revenido, además de reducir la susceptibilidad a la fragilización por revenido.

Fósforo. Es un eficaz endurecedor de solución sólida en la ferrita (ver **Figura 2.11**). También mejora la resistencia a la corrosión, pero provoca una disminución de la ductilidad. Puede causar la fragilidad a través de la segregación de los límites de grano en la austenita para niveles menores que 0.05%.

Nitrógeno. Se utiliza en cantidades menores de hasta 0.02% para aumentar la resistencia de los aceros HSLA a bajo costo, la adición a aceros con contenido de vanadio favorece el endurecimiento por precipitación, la precipitación del nitruro de vanadio incrementa el refinamiento de grano debido a la diferencia entre los gradientes de solubilidad en la austenita que el carburo de vanadio.

Zirconio. Puede ser agregado a los aceros HSLA calmados para mejorar las características de inclusiones, particularmente de sulfuros con cambios en su forma que mejoran la ductilidad.

Boro. No tiene ningún efecto en la fuerza de acero laminado en caliente normal, pero puede mejorar considerablemente templabilidad.

2.2.6.1 Microaleantes más comunes

Los elementos de aleación tradicionalmente considerados como microaleantes son el vanadio, niobio y titanio. Dentro de este grupo también se incluye el aluminio ya que el nitruro de aluminio fue el primero utilizado para el control del tamaño de grano.

En la **Tabla 2.5** se muestran las características principales de cada uno de estos elementos (13).

Tabla 2.5 Propiedades de los elementos microaleantes (13)

	Vanadio	Niobio	Titanio	Aluminio
Precipitados	VC, VN, VCN	NbC, NbN, NbCN	TiO ₂ , TiS, TiC, TiN	AlN
Coefficiente de difusión en austenita (m ² /s)	2.5E-5	5.3E-5	1.5E-5	18E-5
Energía de activación (kJ/mol) ^A	264	345	250	228
Densidad a 20°C (g/cm ³)	6.16	8.57	4.507	2.7

A) Energía necesaria para la migración en la fase austenita

Vanadio. Presenta un aumento en la solubilidad cuando se somete a un tratamiento termomecánico a elevadas temperaturas. Precipita en forma de nitruros, carburos y carbonitruros.

Los carbonitruros cuentan con un tamaño relativamente pequeño y coherente en la matriz. Estos precipitados tienen la función de servir como endurecedores por precipitación dentro de la matriz a temperaturas más bajas en comparación con otros microaleantes (14).

El contenido de vanadio sobre la estructura de los aceros HSLA se muestra en la **Figura 2.14**.

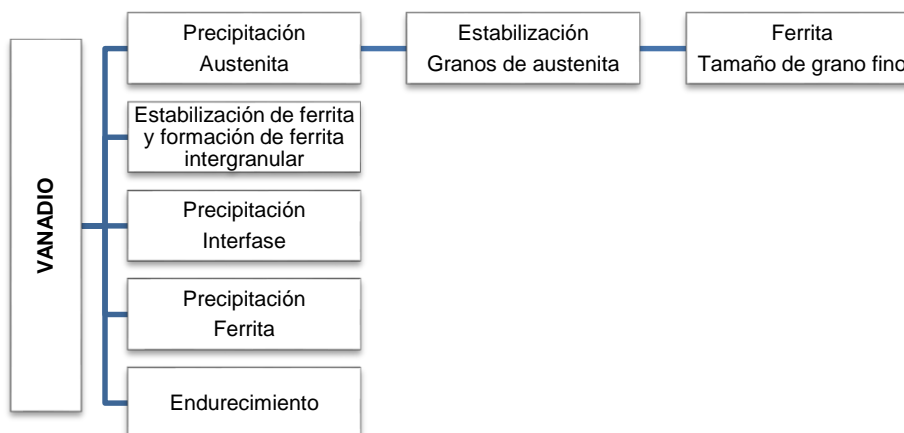


Figura 2.14 Efecto del vanadio en la transformación y estructura de los aceros HSLA (15)

Niobio. En cantidades reducidas (hasta 0.05%) aumenta el esfuerzo de cedencia debido a la mezcla entre mecanismos de endurecimiento por precipitación y refinamiento de grano.

El niobio es el mejor refinador de grano ya que el carburo de niobio presenta mayor estabilidad que el carburo de vanadio en la fase austenita a temperaturas normales de laminado, el bajo gradiente de solubilidad del carburo de niobio en la austenita proporciona precipitados más estables que atrasan el crecimiento de grano austenítico al estar presentes en los bordes de grano.

El efecto del niobio sobre la estructura de los aceros HSLA esta resumido en **Figura 2.15.**

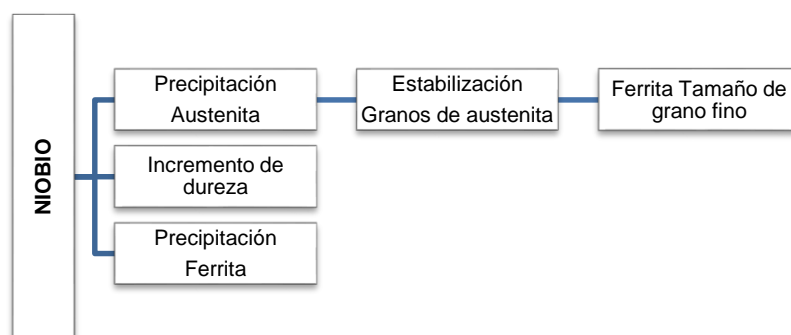


Figura 2.15 Efecto del niobio en la transformación y estructura de los aceros HSLA (15)

Titanio. Provee endurecimiento por precipitación, ofrece control de forma de sulfuros, al igual que el niobio, la adición de reducidas cantidades de este elemento acotan el desarrollo de grano austenítico, mientras que una variación en la composición de oxígeno, nitrógeno y azufre afecta el endurecimiento por carburos. Los precipitados de nitruro de titanio son los primeros en formarse en la etapa de enfriamiento sirviendo como centro de nucleación para el carburo de titanio. En estas condiciones, el gradiente de difusión entre ambos precipitados da como resultado la formación de carbonitruros cuya composición química es variada (16). El efecto del titanio sobre la estructura de los aceros HSLA se resume en la **Figura 2.16.**

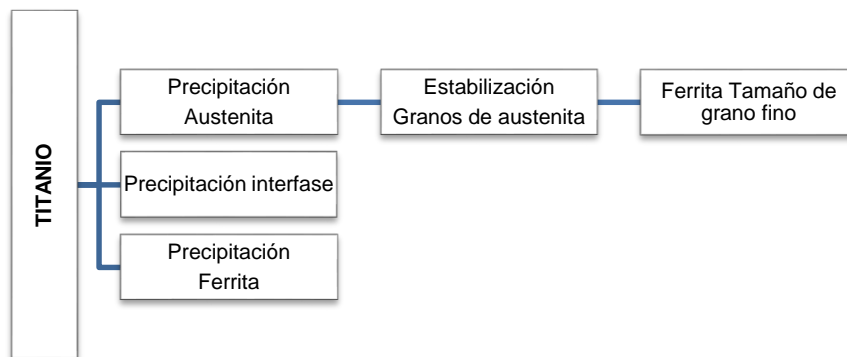


Figura 2.16 Efecto del titanio en la transformación y estructura de los aceros HSLA (15)

Aluminio. Se utiliza comúnmente como desoxidante. Debido a su costo económico es ampliamente utilizado para controlar el crecimiento de grano austenítico. Precipita en forma de nitruros y su dilución se lleva a cabo a altas temperaturas.

2.2.6.2 Otros elementos microaleantes

Tierras raras como el cerio, añadidos en cantidades muy reducidas, tienen un efecto significativo sobre el control de las inclusiones de sulfuro y la ductilidad, pero su influencia en la microestructura final no resulta fundamental.

2.2.6.3 Efecto de los diferentes elementos de microaleación

En la **Tabla 2.6**, se resumen los principales efectos de los elementos microaleantes más comunes (endurecimiento por precipitación, refinamiento de grano, afinidad de nitrógeno y modificación estructural).

Tabla 2.6 Efecto de los elementos de aleación (15)

Elemento	Endurecimiento por precipitación	Refinamiento de grano	Afinidad de nitrógeno	Modificación estructural
Vanadio	Elevado	Bajo	Elevado	Moderado
Niobio	Moderado	Elevado	Bajo	Nulo
Titanio	Nulo (<0.02%) Elevado (>0.05%)	Elevado	Elevado	Nulo
Aluminio	Nulo	Elevado	Elevado	Nulo

2.2.6.4 Efecto combinado de los elementos microaleantes

En la actualidad la mayoría de los aceros cuenta con más de un elemento de microaleación. Estos elementos interaccionan entre si dando como resultado un efecto aditivo (en la mayoría de las veces) que debe ser considerado a la hora de diseñar un determinado tipo de acero. Por ejemplo, en caso de existir más de un elemento de microaleación, aquel que tenga más influencia será el que genere un carburo o nitruro que precipite a una temperatura mayor. El primer compuesto en formarse es el que con anterioridad participó en la modificación microestructural durante la etapa de enfriamiento. La formación de carburos y nitruros de un determinado elemento modifican la capacidad y disminuye la temperatura a partir de la cual se pueden formar carburos y nitruros de otros elementos. Los microaleantes que tienen la capacidad de formar carburos y nitruros a bajas temperaturas pueden formar compuestos complejos con un elemento aleante que forme carbonitruros a elevadas temperaturas. De esta forma, se disminuye el efecto por la pequeña cantidad de elementos formadores de compuestos a bajas temperaturas. La formación de nitruros reducirá el nitrógeno en solución dando como resultado una disminución en el efecto de éste en la templabilidad y fragilidad (15).

2.2.7 Metalurgia de la soldadura

En los procesos de soldadura por fusión, con o sin material de aporte, la unión soldada es sometida a un ciclo térmico que consta de las siguientes etapas:

- Transferencia de calor localizada del metal de aporte y el metal base.
- Aparición del metal fundido que, por lo menos una parte, proviene del metal base.
- Formación del charco de soldadura.
- Alta velocidad de disipación de calor (enfriamiento) del metal base y el metal de soldadura.
- Distribución de gradientes de temperatura a lo largo del cordón de soldadura.

En los procesos de soldadura se llevan a cabo una serie de fenómenos físicos y químicos tales como: la fusión, reacciones de gases con el metal líquido, reacciones químicas entre las fases líquidas no metálicas con el metal fundido, interacción entre fases líquidas y sólidas, cristalización, solidificación, segregación y reacciones en solución sólida. Las características de estos ciclos térmicos y los fenómenos que ocurren durante éste tienen una influencia mayor en la microestructura, propiedades y calidad de las uniones soldadas.

2.2.7.1 Soldabilidad y carbono equivalente

La soldabilidad es la capacidad con que un metal se puede conformar por soldadura, así como la habilidad de la unión soldada para resistir las condiciones de servicio. Existen tres tipos de soldabilidad:

Soldabilidad operatoria. Está relacionada con el enlace de los átomos, de las moléculas o de los iones que forman el material. El enlace metálico tiene elevada soldabilidad operativa.

Soldabilidad metalúrgica. Determina hasta qué punto pueden soldarse dos metales sin que su composición represente inconvenientes graves por fusión, oxidación, tratamiento térmico, etc.

Soldabilidad constructiva. Dependen de las transformaciones que ocurren en las piezas durante la soldadura. En la metalografía de la unión soldada se ven dos zonas bien diferenciadas, el cordón de soldadura y la zona afectada por el calor (ZAC por sus iniciales).

Los factores principales de la soldabilidad son la composición química, calor de entrada y velocidad de enfriamiento. Estos factores producen varios efectos como el crecimiento de grano, cambios de fases, esfuerzos de tensión y compresión, lo que a su vez determina la soldabilidad. La entrada de calor y la velocidad de enfriamiento son características del proceso específico, técnica utilizada y espesor de la pieza del metal que se está soldando.

Debido a que el esfuerzo de fluencia de los aceros HSLA puede obtenerse con menores contenidos de carbono, la soldabilidad de muchos de ellos es comparable al del acero suave y en ocasiones, mejor. El carbono y el nitrógeno desarrollan un papel muy importante en la soldabilidad, un óptimo nivel del contenido de carbono es determinante sobre las propiedades del metal base y la soldabilidad.

Los aceros HSLA se sueldan fácilmente por cualquier proceso de soldadura usado en los aceros estructurales al carbono, incluyendo los procesos por arco metálico protegido, arco sumergido y arco con núcleo de fundente, (SMAW, SAW, FCAW por sus siglas en inglés, respectivamente). La soldadura en estos aceros puede ser realizada sin la necesidad de precalentamiento o poscalentamiento; lo anterior ocasionado por el bajo contenido de carbono. La soldabilidad por lo general disminuye con el incremento de carbono. Sin embargo, cuando el carbono equivalente excede 0.35%, el precalentamiento es recomendado para minimizar la susceptibilidad de fractura por hidrógeno. Desde el punto de vista de la soldadura, el efecto de mayor interés que la composición química tiene en los aceros es la templabilidad (tendencia a la formación de martensita) de la ZAC y la alta dureza, fragilidad y tendencia al agrietamiento asociadas con la martensita, factores relacionados con la soldabilidad.

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

En los Estados Unidos y los países europeos, se utiliza la ecuación propuesta por el Instituto Internacional de Soldadura (IIW):

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

Ec. 2.1

En Japón, el parámetro de composición Ito-Bessyo, P_{CM} , es el más ampliamente utilizado. El parámetro considera una evaluación más realista de la soldabilidad de aceros de bajo carbono, en comparación con la ecuación del IIW:

$$P_{CM} = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn + Cu + Cr}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B \quad \text{Ec. 2.2}$$

Yurioka et al. (9), han desarrollado otra relación para el carbono equivalente, CEN, que incorpora tanto el carbono equivalente del IIW y el P_{CM} . El CEN es similar al P_{CM} para aceros con niveles de carbono menores de 0.17%, y es similar a la fórmula del IIW para altos niveles de carbono.

$$CEN = C + A(C) + \left[\frac{Si}{24} + \frac{Mn}{6} + \frac{Cu}{15} + \frac{Ni}{20} + \frac{Cr + Mo + Nb + V}{5} + 5B \right] \quad \text{Ec. 2.3}$$

Donde $A(C)$ es igual a $0.75 + 0.25 \tanh[20(C - 0.12)]$

Aunque estas expresiones del carbono equivalente se desarrollaron inicialmente para caracterizar la tendencia al agrietamiento por hidrógeno en placas de acero, también se han utilizado para evaluar la templeabilidad de los aceros con base en su química.

2.2.8 Consideraciones para la soldadura con arco de aceros baja aleación

La determinación de los procedimientos y prácticas adecuadas para la soldadura de aceros de baja aleación (aceros que contienen hasta un 10% Cr) implica una evaluación sistemática de factores tales como:

- Requisitos de diseño
- Requisitos de productividad
- Factibilidad y funcionalidad de uso de un proceso de arco en particular
- Características de materiales de aporte y otros consumibles
- Propiedades de los metales depositados
- Tratamiento térmico previo y post soldadura
- Requerimientos generarles para aceros de baja aleación

En comparación con otros aceros, la soldadura por arco de aceros de baja aleación puede requerir un mayor énfasis en algunos de estos factores, debido a los requisitos únicos en las propiedades mecánicas o de servicio, así como las características metalúrgicas, tales como templabilidad y la fragilización por hidrógeno. A continuación, se muestra información sobre los principales consumibles en el proceso de soldadura de aceros HSLA.

Soldaduras y fundentes. La selección de los consumibles para la soldadura por arco de aceros de baja aleación se ve facilitada en gran medida por referencia al Instituto Nacional Estadounidense de Estándares / Sociedad Americana de Soldadura (ANSI / AWS, por sus siglas en inglés) para las especificaciones del metal de aporte (17). Estas especificaciones definen los requisitos para la clasificación de los consumibles de soldadura de acuerdo con los parámetros establecidos para composición química, propiedades mecánicas, y servicio. Las especificaciones ANSI / AWS se incorporan a menudo en los requisitos de los materiales en códigos de fabricación.

Gases de protección en GMAW. La selección de gases de protección utilizados en este proceso depende a menudo de las características del material de aporte. La información debe ser obtenida del fabricante del metal de aporte o del proveedor respecto al gas de protección adecuado o de la mezcla a utilizar. El uso de un gas de protección distinto del recomendado puede resultar en un rendimiento inferior o soldadura autógena insatisfactoria, composición química metálica incorrecta y/o propiedades por debajo de los niveles de calidad requeridos. Algunos de las consecuencias del uso de un gas de protección inadecuado se presentan en la sección 2.3.7.

Las mezclas de argón-oxígeno y argón-CO₂ se utilizan comúnmente para los procesos GMAW y FCAW de aceros de baja aleación. Cualquiera de las mezclas de argón-helio-CO₂ o dióxido de carbono al 100% se utilizan para soldaduras con bajo calor de entrada que emplean electrodos de diámetro pequeño y un modo de transferencia de metal por cortocircuito.

2.2.8.1 Procedimientos y prácticas de soldadura recomendadas

El éxito de la soldadura de aceros estructurales HSLA requiere la consideración de un precalentamiento. Generalmente, la necesidad para el precalentamiento incrementa con el aumento de contenido de carbono en la aleación y con el aumento en el espesor del acero.

Las temperaturas mínimas de precalentamiento para varios para aceros estructurales HSLA se muestran en la **Tabla 2.7**.

Tabla 2.7 Temperaturas mínimas de precalentamiento e interpasos para la soldadura de aceros estructurales usando procesos de soldadura de bajo hidrógeno (9)

Temperatura indicada para cada espesor								Metal Base	
≤20 MM		20-40 MM		40-65 MM		>65 MM		Especificación ASTM	Grado
°C	°F	°C	°F	°C	°F	°C	°F		
0	32	10	50	65	150	105	225	A 242	...
								A 441	...
								A 572	42
									50
								A 588	...
								A 633	A
B									
C									
10	50	65	150	105	225	150	300	A 572	60
									65
								A 633	E

Información sobre temperaturas de precalentamiento recomendados para otros aceros estructurales HSLA se puede obtener de los proveedores de acero. Si la temperatura de precalentamiento no es lo suficientemente alta, se puede producir el agrietamiento en el cordón de soldadura, en particular en juntas altamente restringidas.

Para la unión de placas de distintos espesores los rangos de precalentamiento tienen que ser los mayores de acuerdo a las especificaciones del tipo de acero HSLA utilizado.

Tratamiento térmico posterior a la soldadura. Es raramente necesario para soldaduras en aceros estructurales HSLA. Sin embargo, puede ser necesario considerar el tratamiento térmico posterior a la soldadura solo sí:

- La soldadura se expone a un ambiente que puede causar agrietamiento por corrosión bajo tensión
- Control de las dimensiones durante el maquinado
- Mejorar los requerimientos de ductilidad

Cuando se requiere un tratamiento térmico posterior a la soldadura, el contenido de vanadio del metal de soldadura no debe ser mayor que 0.05%. El rango para el tratamiento térmico posterior a la soldadura recomendado para muchos aceros estructurales HSLA es de 595-675 ° C (1100-1250 ° F).

2.2.9 Aleaciones ASTM A 572

En este trabajo se analizará la unión soldada de placas con espesores de ¼ pulg (6.35 mm) de un acero comercial ASTM A572 grado 42. En la **Tabla 2.8** y **Tabla 2.9** se muestran las composiciones química y las propiedades mecánicas de este acero.

Tabla 2.8 Composición química nominal de un acero A 572 (9)

% en Peso	C	Mn	P	S	Si
Grado 42 [290]	0.21	1.35	0.04	0.05	0.15-0.40
Grado 50 [345]	0.23	1.35	0.04	0.05	0.15-0.40
Grado 60 [415]	0.26	1.35	0.04	0.05	0.15-0.40
Grado 65 [450] espesor >1/2"	0.23	1.65	0.04	0.05	N/A

Tabla 2.9 Propiedades mecánicas de un acero A 572 (9)

	Esfuerzo Máximo (MPa)	Esfuerzo de cedencia (MPa)	% Elongación
Grado 42 [290]	415	290	24
Grado 50 [345]	450	345	21
Grado 60 [415]	520	415	18
Grado 65 [450]	550	450	17

2.3 Soldadura de arco con protección de gas

2.3.1 Descripción del proceso GMAW

El proceso de soldadura de arco con protección de gas (GMAW por sus siglas en inglés), es un proceso cuyo principio de operación se basa en la alimentación de un electrodo sólido consumible continuo de forma automática, el cual interactúa con la pieza de trabajo creando un arco eléctrico protegido por un gas de procedencia externa. Las únicas operaciones manuales que el soldador requiere para la operación semiautomática son: la dirección del desplazamiento, la velocidad de aplicación del cordón de soldadura y la posición de la pistola (18) (ver **Figura 2.17**).

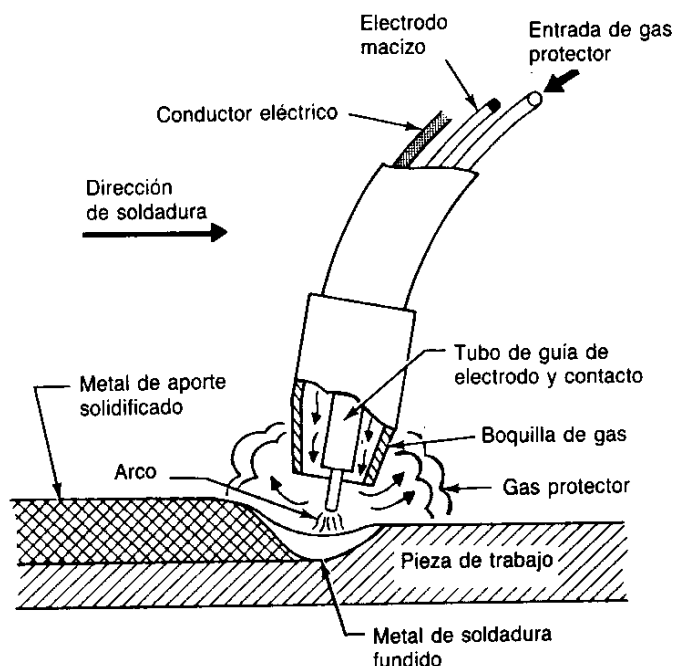


Figura 2.17 Proceso de Soldadura GMAW (18)

Este proceso puede ser usado para soldar la mayoría de los materiales comerciales, incluyendo aceros al carbono, inoxidable, aleaciones de aluminio, magnesio, cobre, hierro, titanio y zirconio. Este proceso puede ser preferido sobre algunos otros procesos ya que se emplea en gran parte de aleaciones reactivas como aluminio, magnesio, cobre, etc.

La mayoría de los hierros y aceros de baja aleación pueden ser satisfactoriamente unidos por este proceso de soldadura, así como los aceros de bajo carbono, templados de alta resistencia, cromo-hierro, de alto níquel y algunas de las superaleaciones en base níquel. Con esta variedad de materiales, las técnicas y procedimientos de aplicación pueden variar ampliamente.

En el caso de los gases de protección como los son los de CO₂ o mezclas con argón son convenientes cuando se sueldan aceros de bajo carbono y de baja aleación, mientras que el gas inerte puro es primordial cuando se sueldan aceros altamente aleados, aleaciones de aluminio, magnesio, cobre titanio, zirconio, aceros inoxidable y superaleaciones base níquel (18).

2.3.2 Principios básicos de operación

El proceso GMAW es un proceso semiautomático en el cual consta de la alimentación de un electrodo sólido continuo consumible, el cual, es protegido por un gas (inerte, mezcla, etc.) de procedencia externa. Dentro del equipamiento básico para este proceso se destacan: la pistola para soldar, el alimentador del electrodo o alambre, la fuente de poder, cables, mangueras y el sistema de suministro de gas. La principal función de la pistola es servir como guía del electrodo consumible ya que conduce la corriente eléctrica y el de gas de protección a la pieza de trabajo, de tal forma que proporcione la energía necesaria para estabilizar y mantener el arco y así fundir el electrodo. Al aumentar la extensión del electrodo, el flujo de corriente de la fuente de potencia se reduce, con lo que se mantiene el mismo calentamiento por resistencia del electrodo.

En el proceso GMAW el calor del arco generado entre el electrodo consumible y la pieza, es utilizado para fundir las superficies del metal base y el extremo del electrodo. El metal fundido del electrodo es transferido hacia la pieza a través del arco, donde se convierte en metal de soldadura depositado. El gas de protección envuelve el área del arco para protegerlo de contaminantes de la atmosfera, el cual puede ser inerte, activo o una mezcla de ambos (ver **Figura 2.17**).

La soldadura puede ser aplicada semiautomática usando una pistola sostenida manualmente, en ésta, el electrodo es alimentado por una bobina, o en forma automática que incluye equipos automatizados o robots.

2.3.3 Variables del proceso

Las siguientes son algunas de las variables que afectan la penetración, geometría y en general la calidad de la soldadura (19):

- a) Corriente de soldadura
- b) Polaridad
- c) Voltaje
- d) Velocidad de avance
- e) Extensión del electrodo
- f) Orientación del electrodo (ángulo de desplazamiento)
- g) Posición de la unión
- h) Diámetro del electrodo
- i) Composición y tasa de flujo del gas protector

El conocimiento y control de estas variables es indispensable para producir soldaduras de buena calidad. Estas variables son parcialmente independientes, ya que cuando se modifica alguna, en la mayoría de los casos, se modifica una o más de las otras para obtener los resultados deseados. Se requiere una considerable habilidad y experiencia para seleccionar los valores óptimos para cada aplicación.

Esos valores óptimos son afectados por: el tipo de metal base, composición del electrodo, la posición y los requisitos de calidad. Por lo tanto, no hay un conjunto único de parámetros que produzcan resultados óptimos en todos los casos (20).

En la sección 2.4.2 se mencionan y detallan las variables que tienen mayor efecto en la calidad de la soldadura.

2.3.4 Equipo de operación

La configuración básica del equipo en cualquier instalación del proceso de soldadura GMAW (ver **Figura 2.18**), consta de los siguientes componentes:

- Pistola (enfriada por aire o agua)
- Alimentador de alambre
- Controlador de soldadura
- Fuente de potencia
- Regulador para el suministro de gas
- Regulador para el suministro de electrodo
- Interconexión de cables y mangueras
- Sistema de enfriamiento con recirculación de agua (para pistolas enfriadas por agua)

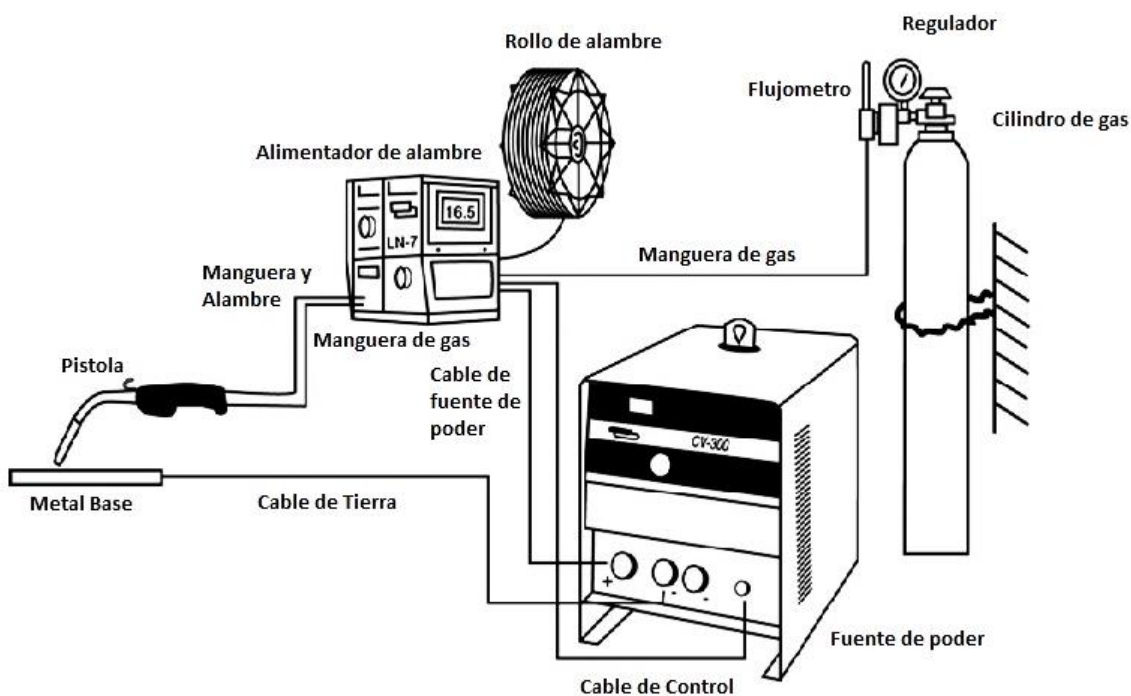


Figura 2.18 Configuración estándar del equipo para el proceso GMAW (18)

2.3.5 Mecanismos de transferencia de metal

Los principales mecanismos para la transferencia de metal del material de aporte a la pieza de trabajo son (21):

- a) Transferencia por cortocircuito
- b) Transferencia globular
- c) Transferencia por aspersión o spray
- d) Transferencia pulsada

El tipo de transferencia se determina tomando en cuenta diversos factores, de los cuales destacan los siguientes:

- Corriente de soldadura (magnitud y tipo)
- Longitud del diámetro del material de aporte (electrodo, alambre, etc.)
- Composición química y extensión máxima del material de aporte
- Gas de protección

A) Transferencia por cortocircuito

Este tipo de transferencia tiene como principal característica que el metal de aporte haga contacto con el metal fundido generándose un corto circuito como se muestra en la **Figura 2.19**, después se produce un estrangulamiento y el desprendimiento de la gota del metal.

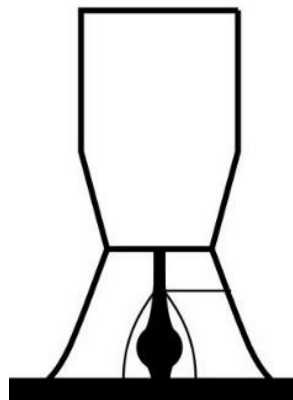


Figura 2.19 Perfil de depósito de metal para la transferencia por cortocircuito (18)

Este proceso de transferencia puede emplear una mezcla de gases protectores cuya composición es del 100% para argón o CO₂ o bien una variación de estos porcentajes para mezclas de argón, CO₂, O₂, etc. Generalmente, en la práctica se suelen emplear bajos amperajes y diámetros de electrodo pequeños.

El aporte energético es mucho menor que en otros mecanismos de transferencia, por lo cual, este tipo de transferencia se usa para unir láminas o elementos de espesores delgados; sin embargo, debido a que el charco de metal fundido solidifica rápidamente, este tipo de transferencia puede emplearse en todas las posiciones: plano, horizontal, vertical y sobre cabeza (ver **Figura 2.20**).

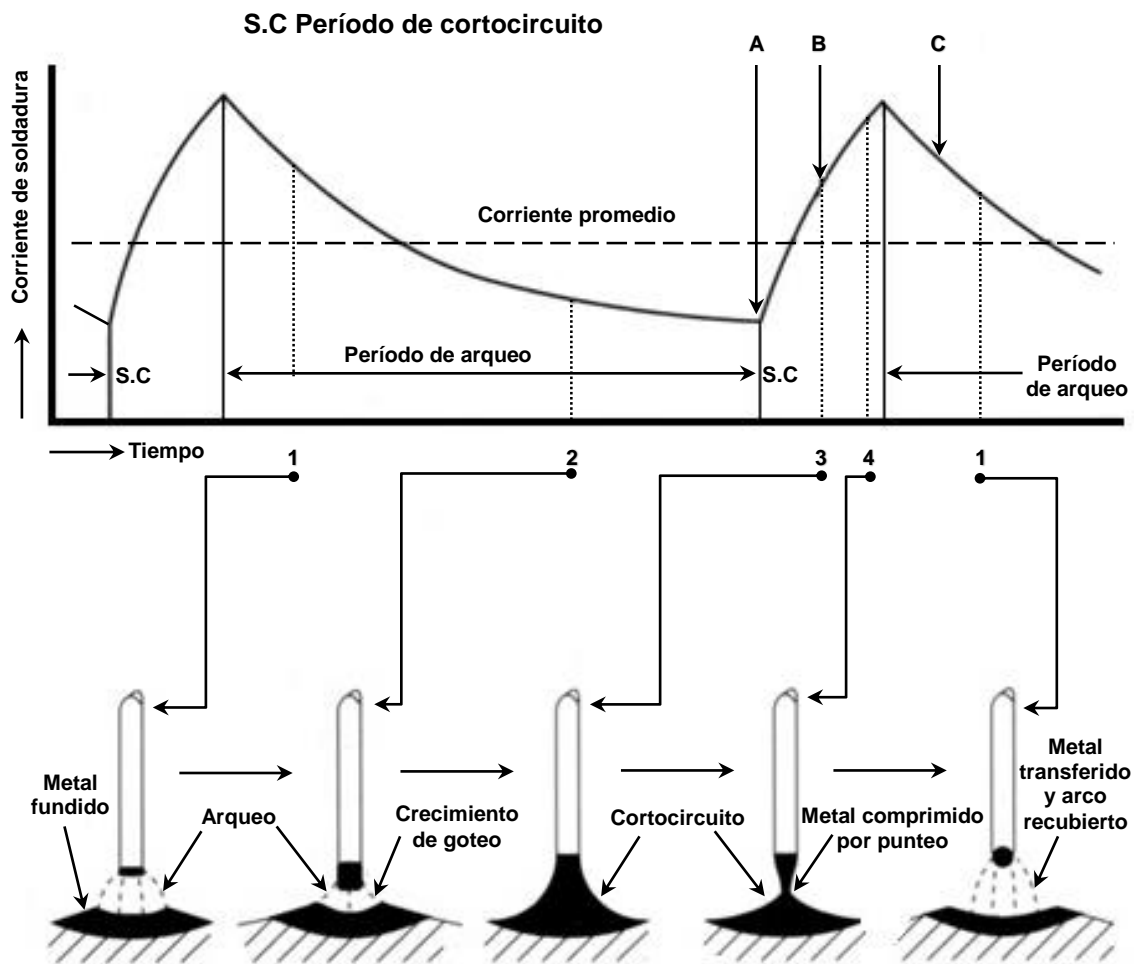


Figura 2.20 Mecanismo de transferencia típica por corto circuito asociada con la corriente de salida de la soldadura (18)

En comparación con otros modos de transferencia, la transferencia de corto circuito, es muy diferente ya que el material fundido penetra en exceso la punta del electrodo y el charco de soldadura (de 50 veces por segundo durante la soldadura). Este tipo de transferencia puede ser aplicada en todas las posiciones, además de brindar menos salpicadura, una mayor penetración en la superficie y menos corte que otros modos de transferencia. Debido a la penetración superficial, esta transferencia es usada con frecuencia soldar hojas de metal en particular las industrias automotrices, y electrodomésticos.

B) Transferencia globular

La transferencia globular ocurre cuando la corriente de soldadura está por debajo de la corriente de transición (ver **Figura 2.21**). El electrodo forma una esfera derretida en su extremo, que crece en tamaño aproximadamente dos a tres veces el diámetro original del electrodo. Entonces, estas grandes esferas derretidas se transfieren, a través del arco, a una tasa de varias gotas por segundo. El arco se hace inestable debido al tirón gravitacional del peso de estas gotas grandes. Se presenta un efecto giratorio, causado por un fenómeno natural cuando se introduce gas argón en una esfera grande de electrodo de metal fundido. Esto causa un movimiento giratorio mientras la esfera fundida se transfiere a través del arco al metal base. Esta transferencia globular inestable puede causar salpicaduras excesivas.

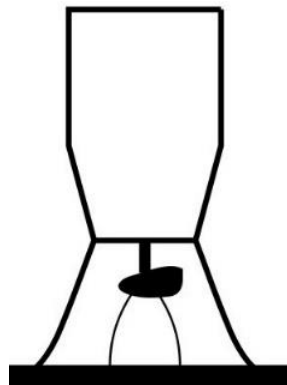


Figura 2.21 Perfil de depósito de metal por transferencia globular (18)

C) Transferencia por aspersion o rociado

La transferencia por rociado tiene lugar con niveles altos de amperaje, en comparación con la transferencia globular, con diámetros grandes de alambre y una mezcla de gases con alto contenido en argón. Este tipo de proceso genera un incremento en la temperatura por lo que no es buena idea utilizarlo en láminas o dispositivos delgados. La transferencia por rociado se limita a soldaduras tipo filete, ranuras de unión en posición plana y filetes en posición horizontal debido a la fluidez del metal fundido (21; 22).

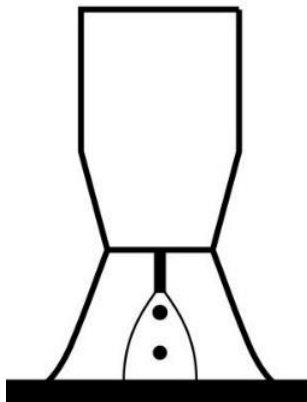


Figura 2.22 Perfil de depósito de metal para la transferencia por rociado (18)

Es un modo de transferencia muy estable libre de chisporroteo, se alcanza cuando se utiliza una mezcla de gases rica en argón. Este tipo de transferencia requiere el uso de corriente directa al positivo del electrodo y un nivel de corriente por arriba del valor crítico llamado “corriente de transición”; sin embargo, por debajo de este nivel de corriente, ocurre una transferencia globular baja debido a que la relación entre las gotas por segundo (gotas/segundo) es lo suficientemente pequeña con respecto a la corriente de transición en su valor crítico.

Por otro lado, cuando la transferencia se lleva a cabo por encima de la corriente de transición, la transferencia ocurre en forma de pequeñas gotas que se desprenden en una relación de cientos por segundo, los cuales son acelerados axialmente en forma transversal al arco (ver **Figura 2.22**).

La corriente de transición depende de la tensión superficial del metal líquido, la cual es inversamente proporcional al diámetro del electrodo en un grado más pequeño a la extensión del electrodo la cual varía de acuerdo a la temperatura de fusión del metal de aporte y a la composición del gas de protección.

Tabla 2.10 Corrientes de transición de globular a aspersion para diversos electrodos (18)

Tipo de electrodo	Gas de protección	Diámetro del alambre		Corriente de arco para rociado (A)
		mm	pulg	
Aceros bajo carbono	98Ar-2CO ₂	0.58	0.023	135
		0.76	0.030	150
		0.89	0.035	165
		1.14	0.045	220
		1.57	0.062	275
	95Ar-5CO ₂	0.89	0.035	155
		1.14	0.045	200
		1.57	0.062	265
	92Ar-8CO ₂	0.89	0.035	175
		1.14	0.045	225
		1.57	0.062	290
	85Ar-15CO ₂	0.89	0.035	180
		1.14	0.045	240
		1.57	0.062	295
	80Ar-20CO ₂	0.89	0.035	195
		1.14	0.045	255
		1.57	0.062	345
	99Ar-1CO ₂	0.89	0.035	150
1.14		0.045	195	
1.57		0.062	265	
Aceros inoxidables	Ar-He-CO ₂	0.89	0.035	160
		1.14	0.045	205
		1.57	0.062	280
	Ar-H ₂ -CO ₂	1.14	0.035	145
		1.57	0.045	185
Aluminio	Argón	0.76	0.062	255
		1.19	0.030	95
		1.57	0.047	135
Cobre desoxidado	Argón	0.89	0.062	180
		1.14	0.035	180
		1.57	0.045	210
Bronce al silicio	Argón	0.89	0.062	310
		1.14	0.035	165
		1.57	0.045	205
		1.57	0.062	270

En la **Tabla 2.10**, se muestra la corriente de transición típica para algunos materiales. Otra característica del modo de transferencia por rociado es la forma de penetración que produce denominada “dedo” la cual puede ser profunda y es afectada por los campos magnéticos, los cuales deben ser controlados para mantener localizada el centro del perfil de penetración de la soldadura.

D) Transferencia por rociado pulsado

Este tipo de transferencia es una variación de la transferencia por rociado, pero con arco “pulsado”, es decir, la fuente de poder pulsa o varía el amperaje en un rango de corriente varios cientos de veces por segundo, a niveles de corriente altos se forma una pequeña gota de metal fundido que se transfiere a través de arco al charco. Este tipo de transferencia emplea bajos amperajes en comparación con el rociado convencional, lo cual resulta que prácticamente se emplee en cualquier posición y espesores de material (22).

El proceso GMAW generalmente emplea corriente directa y polaridad invertida (electrodo positivo) debido a que se obtiene un arco más estable, la transferencia de metal es más suave y con pocas salpicaduras. La polaridad directa (electrodo negativo) es raramente usada debido a que se produce un arco inestable, la velocidad de depósito es más estable, pero tiene menos penetración. La corriente alterna no se usa comercialmente debido a un errático comportamiento del arco, como resultado de la extinción del arco cada medio ciclo de la onda de corriente (21).

2.3.6 Electrodo y materiales de aporte

El electrodo, alambre o metal de aporte es clasificado por diversas especificaciones de la Sociedad Americana de la Soldadura (ver **Tabla 2.11**), (AWS por sus siglas en inglés) (18). En general, para aplicaciones de unión, la composición del electrodo es similar a la del metal base.

Los electrodos usados en el proceso GMAW son por lo general de diámetros muy pequeños. Dichos diámetros varían comúnmente de 0.9 mm a 1.6 mm (0.035 a 0.062 in), pero pueden usarse electrodos con diámetro tan pequeño como 0.5 mm (0.020 in) y tan grande como 3.2 mm (1/8 in). Cuando los diámetros de los electrodos son pequeños y las corrientes relativamente altas, las velocidades de alimentación del alambre en el proceso GMAW son altas, desde unos 40 hasta 340 mm/s (100 a 800 in/min) para la mayor parte de los metales.

Tabla 2.11 Especificación para diversos electrodos para GMAW (23)

Tipo de material base	Especificación de la AWS
Acero al carbono	A5.18
Acero de baja aleación	A5.28
Aceros de aluminio	A5.10
Aleaciones de cobre	A5.7
Magnesio	A5.19
Aleaciones de níquel	A5.14
Aceros inoxidable de la serie 300	A5.9
Aceros inoxidable de la serie 400	A5.9
Titanio	A5.16

2.3.6.1 Selección del electrodo

En la ingeniería de ensamblajes soldados, el objetivo es seleccionar los metales de aporte que producirán un depósito de soldadura con dos características básicas:

- 1) Un depósito que se asemeja mucho al metal base en sus propiedades mecánicas y físicas o que lo mejora, por ejemplo, confiriéndole resistencia a la corrosión o al desgaste.
- 2) Un depósito de soldadura íntegro, libre de discontinuidades.

En el primer caso, el depósito de soldadura, aunque tenga una composición casi idéntica a la del metal base, tiene características metalúrgicas únicas. Esto depende de factores tales como el aporte de energía y la configuración de la franja de soldadura. La segunda característica generalmente se logra empleando un electrodo de metal formulado, por ejemplo, uno que contenga desoxidantes para producir un depósito relativamente libre de defectos.

Composición. El electrodo debe satisfacer ciertas demandas del proceso en cuanto a estabilidad del arco, comportamiento de transferencia de metal y características de solidificación. También debe producir un depósito de soldadura compatible con una o más de las siguientes características del metal base:

- a) Química
- b) Resistencia mecánica y tenacidad
- c) Ductilidad

Es preciso considerar también otras propiedades como la resistencia a la corrosión, la respuesta al tratamiento térmico, la resistencia al desgaste y la igualación de colores. Sin embargo, todas estas consideraciones tienen importancia secundaria en comparación con la compatibilidad metalúrgica del metal base y el metal de aporte.

La AWS ha establecido especificaciones para los metales de aporte de uso común. La **Tabla 2.12** ofrece una guía básica para seleccionar los tipos de metal de aporte apropiados para los metales base que se listan, junto con todas las especificaciones AWS de metal de aporte aplicables.

Tabla 2.12 Electrodo recomendados para GMAW (23)

Metal base		Electrodo	
Tipo	Clasificación	Clasificación	Especificación de la AWS
Aluminio y aleaciones de aluminio (normas ASTM volumen 2.02)	1100 3003, 3004 5052, 5454 5083, 5086, 5446 6061, 6063	ER4043 ER5356 ER5554, ER5556 o ER5183 ER5556 o ER5356 ER4043 o ER5356	A5.10
Aleaciones de magnesio (normas ASTM volumen 2.02)	AZ10A AZ31B, AZ61A, AZ80A ZE10A ZK21A, AZ63A, AZ81A AZ91C AZ92A, AM100A, HK31A, HM21A HM31A LA141A	ERAZ61A, ERAZ92A ERAZ61A, ERAZ92A ERAZ61A, ERAZ92A ERAZ92A ERAZ33A ERAZ33A ERAZ33A ERAZ33A	A5.19
Cobre y aleaciones de cobre (normas ASTM volumen 2.02)	Comercialmente puro Latón Aleaciones Cu-Ni Bronce de manganeso Bronce de aluminio Bronce	ERCu ERCuSi-A, ERCuSn-A ERCuNi ERCuAl-A2 ERCuAl-A2 ERCuSn-A	A5.7
Níquel y Aleaciones de níquel (normas ASTM volumen 2.04)	Comercialmente puro Aleaciones Ni-Cu Aleaciones Ni-Cr-Fe	ERNi ERNiCu-7 ERNiCrFe-5	A5.14
Titanio y aleaciones de titanio (normas ASTM volumen 2.04)	Comercialmente puro Ti-6Al-4V Ti-0.15 Pd Ti-5Al-2.5Sn Ti-13V-11Cr-3Al	ERTi-1, -2,-3,-4 ERTi-6Al-4V ERTi-0.2Pd ERTi-5Al-2.5Sn ERTi-13V-11Cr-3Al	A5.16
Aceros inoxidables austeníticos (normas ASTM volumen 1.04)	Tipo 201 Tipos 301, 302, 304 y 308 Tipo 304L Tipo 310 Tipo 316 Tipo 321 Tipo 347	ER308 ER308 ER308L ER310 ER316 ER321 ER347	A5.9
Aceros al carbono	Aceros al carbono ordinario rodados en caliente y en frío	E70S-3, o E70S-1 E70S-2, E70S-4 E70S-5, E70S-6	A5.18

2.3.7 Gases protectores

El gas protector tiene como función principal impedir que la atmósfera entre en contacto con el metal de soldadura fundido. Esto es necesario porque la mayor parte de los metales, al calentarse hasta su punto de fusión al aire, son susceptibles a formar óxidos y, en menor grado, nitruros. Además, el oxígeno reacciona con el dióxido de carbono lo cual puede causar deficiencias de la soldadura, como porosidad y pérdida de ductilidad. Las reacciones mencionadas se forman con facilidad en la atmósfera si no se toman las debidas precauciones para eliminar el oxígeno y el nitrógeno (24).

Además de proporcionar un entorno protector, el tipo de gas y la tasa de flujo tienen un efecto importante sobre:

- Características eléctricas del arco
- El modo de transferencia del metal
- Penetración, perfil y velocidad de la soldadura
- Tendencia al socavamiento
- Acción limpiadora
- Propiedades mecánicas del metal de soldadura

La selección correcta del gas de protección para un determinado proceso y/o aplicación, es crítica para la calidad de la soldadura. El criterio utilizado para hacer la selección incluye: composición del alambre (aleación), propiedades deseadas del depósito, espesor del material y diseño de la junta, condición del material, si tiene recubrimiento, óxido o aceite, el modo de transferencia de metal, perfil de penetración, posición de la soldadura, condiciones de ensamble, apariencia final de cordón y costos.

El grado de pureza y humedad de los gases protección es otro de los factores a considerar dentro de este tipo de procesos. En la **Tabla 2.13** se muestran datos de pureza y humedad para los gases de protección comúnmente utilizados.

Tabla 2.13 Contenido de pureza y humedad de gases de protección (18)

Gas	Estado	Pureza mínima (%)	Humedad máxima (PPM) ^a	Densidad	
				°C	°F
Argón	Líquido	99.995	10	-60	-77
	Gas	99.997	6	-64	-83
Dióxido de carbono	Líquido	99.499	19	-51	-60
	Gas	99.799	50	-58	-73
Helio	Gas	99.949	32	-51	-61
	Líquido	99.995	3	-69	-92
Hidrógeno	Gas	99.949	8	-63	-80
	Líquido	99.995	5	-65	-86
Nitrógeno	Gas	99.699	32	-51	-61
	Líquido	99.997	5	-65	-86
Oxígeno	Industrial	99.499	50	-48	-54
	Líquido	99.499	6	-64	-83

a) Las especificaciones de humedad se miden con la presión completa del cilindro

El comportamiento de los gases de protección bajo los efectos del calor del arco es diferente dependiendo de la variación del flujo de corriente en el arco y la magnitud, los cuales se ven reflejados en la cantidad de gotas en el metal fundido. Existen tres criterios básicos útiles para comprender las propiedades de los gases:

- Potencial de ionización de los componentes del gas
- Conductividad térmica de los componentes del gas
- Reactividad química del gas de protección con el metal fundido.

Lo anterior, en el cual es importante detallar la física del arco asociado con algunos gases de protección específicos que permitan la selección del mejor gas de protección para la aplicación. Por su parte, el argón y el helio son dos gases inertes utilizados para la protección del charco de soldadura, esto significa que al ser inertes químicamente no reaccionan con el metal fundido; sin embargo, en cierto orden llegan a ser conductivos y el gas es ionizado en el plasma.

Tabla 2.14 Propiedades de los gases de protección utilizados en soldadura (18)

Gas	Símbolo químico	Peso molecular	Gravedad específica ^a	Densidad		Potencial de ionización	
				g/pie ³	g/l	aJ ^b	eV
Argón	Ar	39.95	1.38	0.1114	1.784	2.52	15.7
Dióxido de carbono	CO ₂	44.01	1.53	0.1235	1.978	2.26	14.4
Helio	He	4.00	0.1368	0.0111	0.178	3.92	24.5
Hidrógeno	H ₂	2.016	0.0695	0.0056	0.090	2.16	13.5
Nitrógeno	N ₂	28.01	0.967	0.782	12.5	2.32	14.5
Oxígeno	O ₂	32.00	1.105	0.0892	1.43	2.11	13.2

a) A 100 kPa (1 ATM) y 0 °C (32 °F); AIR = 1.

b) 10⁻¹⁶ J

La energía de ionización varía en cada gas empleado, la cual puede indicar el grado de ionización del gas. Para el argón, esta energía de ionización tiene un valor de 15 eV, mientras que para el helio es de 24.5 eV (ver **Tabla 2.14**). Por lo tanto, el argón es más fácil de ionizar que el helio, por esa razón el argón facilita más el inicio del arco que el helio.

La conductividad térmica o capacidad que el gas tiene para transferir energía térmica, es una de las consideraciones más importantes para seleccionar el gas de protección. Altos niveles en la conductividad térmica resultan en conducción de energía térmica a la pieza de trabajo.

La conductividad térmica afecta la forma del arco y el perfil de distribución de calor en la región de trabajo. Por ejemplo, el argón al tener una conductividad térmica más baja, alrededor del 10% del nivel del helio e hidrógeno, en comparación con el helio el cual tiene una alta conductividad térmica la cual provee un patrón de penetración ancho y reducida profundidad.

Por lo tanto, para mezclas de gas con un alto porcentaje de argón, da como resultado una penetración con un perfil llamado de “dedo” proyectado hacia el material base; esto debido a la baja conductividad térmica del argón.

En las **Figura 2.23** y **Figura 2.24**, se muestran los perfiles del cordón de soldadura para diferentes tipos de gases.

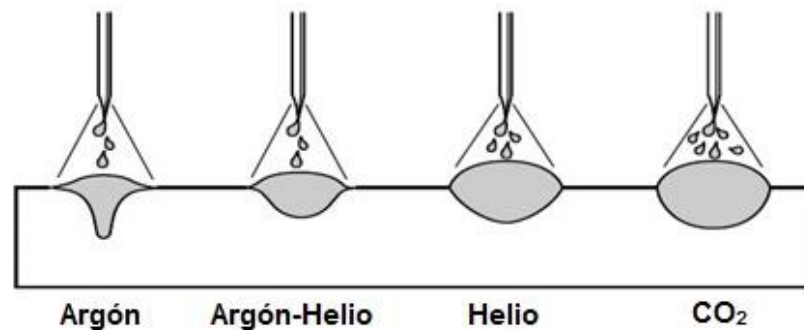


Figura 2.23 Perfil de penetración para diferentes gases de protección (18)

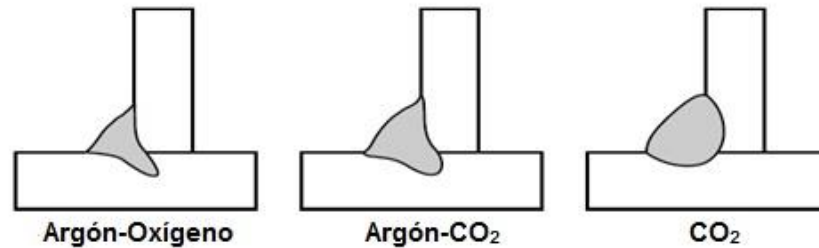


Figura 2.24 Efecto de la adición de oxígeno vs CO_2 al argón de protección (18)

A continuación, se mencionan algunos gases y mezclas utilizados en el proceso GMAW y su efecto en la soldadura:

Argón. Es más pesado que el aire, químicamente inerte, incoloro y sin olor, constituye poco menos del uno por ciento de la tierra en la atmósfera. Promueve la buena apertura de arco debido a su bajo potencial de ionización, haciendo de este un ideal escudo contra la contaminación en una serie de procesos industriales y de soldadura. El argón es el gas de protección inerte más común, el cual tiene una conductividad térmica (comparado con el helio) y una energía de ionización baja, lo cual resulta en un perfil de penetración en forma de “dedo”. El proceso GMAW puede utilizar argón o mezclas de argón para lograr una buena soldabilidad, en uniones que requieren buenas propiedades mecánicas, arco estable y una mejora en la productividad. El bajo potencial de ionización del argón crea una excelente trayectoria en el arco y buena estabilidad. Este gas produce una estrecha columna de arco con alta densidad de corriente, lo cual provoca que la energía del arco se concentre sobre una pequeña superficie. El resultado es una profundidad de fusión con un perfil característico. El argón se utiliza para materiales no ferrosos como el aluminio, níquel, cobre, magnesio y sus aleaciones, así como para metales reactivos como el circonio y el titanio. El argón y las mezclas de éste seleccionados proporcionan una transferencia de rociado con una excelente estabilidad del arco de soldadura, penetración y perfil del cordón. Cuando se sueldan metales ferrosos, el argón es generalmente mezclado con otros gases, como el oxígeno, helio y dióxido de carbono.

Hidrógeno. Este es el elemento más ligero, químicamente activo, su alta conductividad térmica hace que sus mezclas sean útiles en determinados procesos de soldadura.

Dióxido de carbono. El CO₂ es más pesado que el aire, es un gas incoloro que presente un olor ligeramente picante, químicamente activo. La mayoría de los gases reactivos no pueden ser utilizados en forma pura para protección; el CO₂ es una excepción. Es utilizado ampliamente como gas independiente, o como componente de mezclas de gases. No puede ser usado para la transferencia por rociado en GMAW, se utiliza solo para corto circuito o transferencia globular. En presencia de un intenso calor como un arco de soldadura, se disocia en monóxido de carbono y oxígeno libre y se vuelve activo.

Esto se muestra en la ecuación 2.4:



El oxígeno libre, el cual está disponible en cantidades considerables, reacciona con otros elementos presentes en el medio dando como resultado la aparición de óxidos intermetálicos. El CO₂ es un gas activo y produce un efecto oxidante, a menudo se utiliza en la soldadura de acero al carbono. Su popularidad es común debido a la disponibilidad, bajo costo y rendimiento.

En comparación con el CO₂, el argón presenta una menor sección transversal (ancho) en la fusión, lo cual da como resultado una significativa ventaja en la variación en el patrón de penetración. La principal desventaja del CO₂ en la transferencia globular es el exceso de salpicaduras que produce. La soldadura es depositada utilizando un gas de protección con un alto contenido CO₂, generalmente resulta muy oxidada.

Por otro lado, el uso de un alambre de soldadura que contenga una mayor composición química de elementos desoxidantes puede ser empleado para compensar el carácter reactivo de los gases de protección. En general, el uso de gases como el CO₂ da como resultado buenas propiedades mecánicas.

2.3.7.1 Mezclas de gases binarias

Argón-CO₂. Este tipo de mezcla es empleada principalmente en aceros al carbono, baja aleación y aceros inoxidables. El CO₂ con adiciones de argón permite el aumento de velocidad de avance con mayor penetración. Si aumenta la cantidad de CO₂ tendrá como resultado un aumento en el nivel de salpicaduras y una disminución en la eficiencia de deposición. En GMAW se pueden realizar pequeñas adiciones de CO₂, a niveles altos de corriente teniendo cuidado de mantener estable la transferencia por rociado. Por arriba del 20% de CO₂, la transferencia por rociado se torna inestable y periódicamente ocurren transferencias de corto circuito y globular.

Argón con 1 al 10% de CO₂. Estas mezclas se utilizan para la transferencia por rociado y corto circuito en varios materiales y espesores. Una mezcla de 5% de CO₂ se puede utilizar en GMAW con una transferencia pulsada en aceros de baja aleación y en cualquier posición. Del 5 al 10% de CO₂ la columna de arco se reduce. La fuerza del arco que producen estas mezclas son más tolerantes a las capas de óxido de la laminación haciendo más controlable el charco de soldadura.

Argón con 11 al 20% de CO₂. Esta mezcla se utiliza en una gran variedad de aplicaciones en aceros al carbono y baja aleación. En este rango de composición de la mezcla se puede alcanzar la máxima productividad cuando se sueldan metales base de espesor delgado. Con esta mezcla disminuye el exceso de penetración incrementando las velocidades de depósito y avance. A porcentajes bajos de CO₂ también mejora la eficiencia del depósito ya que disminuye el chisporroteo.

Argón con variaciones entre el 21% a 49% de CO₂. Esta gama se utiliza comúnmente para GMAW con transferencia por cortocircuito en acero al carbono. Está formulado para proporcionar una frecuencia óptima en la transferencia por corto circuito en los diámetros de alambre más comunes. Estas mezclas se usan para aplicaciones de alta corriente, como en la soldadura de vigas de espesor

considerable, el cual proporciona una buena estabilidad del arco, control del charco de soldadura y buena apariencia del cordón.

Argón con el 50% de CO₂. Esta mezcla se utiliza cuando se requiere una alta profundidad por fusión. Se recomienda para espesores de metal base por encima de 1/8 in (3.2 mm). Aumenta la profundidad de fusión en soldadura fuera de posición utilizando transferencia con corto circuito. Proporciona buena mojabilidad y forma del cordón sin excesiva fluidez, siendo una ventaja para la soldadura de tubería.

En materiales delgados, la tendencia a sufrir penetración excesiva aumenta con este tipo de mezclas. Cuando el proceso de soldadura se lleva a cabo a niveles altos de corriente, la transferencia de metal es similar a la de cualquier mezcla de argón+CO₂. Con la adición de argón hay una disminución en las salpicaduras.

Argón con hidrógeno. La adición de hidrógeno aumenta el calor de entrada, permitiendo mayor velocidad de avance, mayor profundidad de fusión, mayor mojabilidad y un perfil del cordón de soldadura más ancho (21; 24; 25). La mezcla de argón con hidrógeno proporciona una reducción de la atmósfera en el arco, eliminando el oxígeno de la zona de soldadura. Una mezcla típica argón-hidrógeno es del 95% de argón y 5% de hidrógeno.

Las mezclas de argón con hidrógeno se utilizan comúnmente para soldar metales como aceros inoxidables austeníticos, níquel y aleaciones de níquel. Este tipo de mezclas no deben utilizarse para soldar aceros al carbono o baja aleación. Las mezclas con hidrógeno se utilizan principalmente en aleaciones de aceros con alto contenido de níquel. Los gases que contienen hidrógeno no deben utilizarse con cobre y sus aleaciones (ver **Tabla 2.10**).

En la **Tabla 2.15** se da una lista de los gases que se emplean para GMAW con transferencia con cortocircuito.

Tabla 2.15 Gases protectores para transferencia en cortocircuito en GMAW (18)

Metal	Gas protector	Espesor	Ventajas
Acero al carbono	75% Argón + 25% O ₂	Menos de 3.2 mm (1/8 in)	Altas velocidades de soldadura sin perforación; mínimo de distorsión y salpicaduras.
	75% Argón + 25% O ₂	Más de 3.2 mm (1/8 in)	Mínimo de salpicaduras, aspecto limpio de la soldadura, buen control del charco en las posiciones vertical y sobre cabeza.
	Argón con 5-10% CO ₂	-	Penetración más profunda, más altas velocidades de soldadura.
Aceros de baja aleación	60-70% Helio + 25-0.5% Argón + 4.5% O ₂	-	Reactividad mínima, excelente tenacidad, excelente estabilidad del arco, buenas características de mojado y perfil dl cordón, pocas salpicaduras.
	75% Argón + 25% O ₂	-	Buena tenacidad, excelente estabilidad del arco, características de mojado y perfil de cordón, pocas salpicaduras
Acero inoxidable	90% Helio + 7.5% Argón	-	Ningún efecto sobre la resistencia a la corrosión, ZAC pequeña, sin socavados, mínima distorsión.
	Argón + 2.5% CO ₂	-	-
	Argón y Argón + Helio	Más de 3.2 mm (1/8 in)	El argón es satisfactorio para lamina, se prefiere mezclas Argón-Helio, para material grueso

La gran mayoría de las mezclas de gases inertes también pueden contener pequeñas cantidades de oxígeno o CO₂, como se muestra en la **Tabla 2.16** los principales gases que se usan en la aplicación de GMAW por aspersión.

Tabla 2.16 Gases protectores para transferencia por aspersión en GMAW (18)

Metal	Gas protector	Espesor	Ventajas
Aluminio	100% Argón	0 a 25 mm (0 a 1 in)	Transferencia de metal y estabilidad del arco; mínimo de salpicaduras.
	35% Argón + 65% Helio	25 a 75 mm (1 a 3 in)	Mayor aporte de calor, mejores características de fusión con aleaciones Al-Mg de la serie 5XXX.
	25% Argón + 75 % Helio	más de 76 mm (3 in)	Máximo aporte de calor, minimiza la porosidad.
Magnesio	100% Argón	-	Excelente acción limpiadora.
Acero al carbono	95% Argón + 3.5% O ₂	-	Mejora la estabilidad del arco; produce un charco de soldadura más fluido y controlable; buena coalescencia y perfil del cordón; minimiza el socavado; permite velocidades más altas que con argón puro.
	90% Argón + 8/10% CO ₂	-	Se pueden utilizar altas velocidades en soldadura mecanizada; bajo costo en soldadura manual.
Aceros de baja aleación	98% Argón + 2% O ₂	-	Minimiza el socavado; proporciona buena tenacidad.
Acero inoxidable	99% Argón + 1% O ₂	-	Mejora la estabilidad del arco; buena coalescencia y perfil del cordón, minimiza el socavado en aceros inoxidables de espesor grande.
	98% Argón + 2% O ₂	Hasta 3.2 mm (1/8 in)	Ofrece mejore estabilidad dela arco; coalescencia y velocidad de soldadura que la mezcla con 1% de oxígeno para piezas de acero inoxidable delgadas
Níquel, cobre y sus aleaciones	100% Argón	-	Ofrece buen mojado; reduce la fluidez del metal de soldadura.
	Argón + Helio	-	Mayor aporte de calor con mezclas con 50 y 75% de Helio, lo que compensa la elevada disipación de calor de los calibres más gruesos
Titanio	100% Argón	-	Buena estabilidad del arco; contaminación mínima de la soldadura; se requiere respaldo con gas inerte para evitar la contaminación con aire de la parte de atrás del área de soldadura.

2.3.8 Efecto de las variables de soldadura en el proceso GMAW

Como se mencionó en la sección anterior, la calidad de una soldadura se ve afectada por diferentes variables del proceso, a continuación, se definen las más importantes y se analiza su efecto significativo para el control del proceso de soldadura.

A) Amperaje

Es una medida de la cantidad de corriente que fluye entre el electrodo y la pieza de trabajo, variable primaria que determina el calor de entrada. Generalmente un incremento en el amperaje deriva en incrementos de velocidad de depósito, penetración y dilución (metal de aporte-metal base). El flujo del amperaje a través del circuito eléctrico es el mismo sin considerar donde se mida. Normalmente se mide con amperímetro de gancho. Para soldadura con una máquina de voltaje constante (CV), un incremento en la velocidad de alimentación del alambre incrementa directamente el amperaje (18).

B) Voltaje del arco (Longitud de arco)

Esta variable está directamente relacionada con la longitud del arco. El voltaje incrementa cuando aumenta la longitud de arco, y por lo tanto la demanda o exigencia de mayor protección del arco aumenta. Para soldaduras con voltaje constante (CV), como el GMAW, el voltaje es determinado o establecido primeramente en la máquina. El voltaje de arco también controla o influye en el ancho del cordón. El voltaje de arco tiene un efecto directo en el calor de entrada.

El voltaje en un circuito de soldadura no es constante, sufre una serie de caídas de voltaje. Considerando un ejemplo: suponiendo que una fuente de poder entrega en un sistema un voltaje de 40 volts. Entre la fuente de poder y la pistola hay una caída de voltaje de 3 volts, asociado con la resistencia del cable. Del punto donde se sujeta el cable de la tierra a la terminal de tierra de la fuente de poder existe una caída de voltaje adicional, aproximadamente de 7 volts.

Restando los 3 y los 7 volts del voltaje original, quedan 30 volts para el arco. Este ejemplo, ilustra la importancia de asegurarse que el voltaje usado u obtenido sea el apropiado, cuando se realice un procedimiento de soldadura o una experimentación, con el fin de identificar o reconocer cualquier pérdida en el circuito de soldadura. El medio más seguro para determinar el voltaje del arco es midiendo la caída de voltaje entre la punta de contacto y la pieza de trabajo. Esto no puede ser práctico para procesos semiautomáticos, el voltaje típicamente se lee de un punto en el alimentador del alambre (donde está la conexión de la pistola y el cable) a la pieza de trabajo.

En la **Tabla 2.17** se muestran valores típicos. Se requieren ejercicios de ensayo y error con el objeto de ajustar el voltaje del arco para producir las características de arco más favorables y la apariencia del cordón de soldadura. Estos ensayos son esenciales porque el voltaje de arco óptimo depende de una variedad de factores, incluyendo el espesor del material base, el tipo de junta, la posición de soldadura, el tamaño del electrodo, la composición del gas protector y la categoría de soldadura (soldaduras de ranura o filete, por ejemplo). A partir de un valor específico del voltaje del arco, un aumento en el voltaje tiende a aplanar el cordón de soldadura e incrementa el ancho de la zona de fusión.

Tabla 2.17 Voltajes de arco típicos del proceso GMAW de diversos metales^a (18)

Electrodo de 1.6 mm de diámetro	Transferencia globular/aspersión ^b					Transferencia por cortocircuito			
	Ar	He	25% Ar 75% He	Ar-O ₂ (1-5% O ₂)	CO ₂	Argón	Helio	25% Ar 75% He	Ar-O ₂ (1-5% O ₂)
Aluminio	25	30	29	-	-	19	-	-	-
Magnesio	26	-	28	-	-	16	-	-	-
Acero al carbono	-	-	-	28	30	17	18	19	20
Acero de baja aleación	-	-	-	28	30	17	18	19	20
Acero inoxidable	24	-	-	26	-	28	19	21	-
Níquel	26	30	28	-	-	22	-	-	-
Aleación Cu-Ni	26	30	28	-	-	22	-	-	-
Aleación Ni-Cr-Fe	26	30	28	-	-	22	-	-	-
Cobre	30	36	33	-	-	24	22	-	-
Aleación Cu-Ni	28	32	30	-	-	23	-	-	-
Bronce de silicio	28	32	30	28	-	23	-	-	-
Bronce de aluminio	28	32	30	-	-	23	-	-	-
Bronce fosforado	28	32	30	23	-	23	-	-	-

a. Más o menos aproximadamente 10%. Los voltajes bajos normalmente se usan en materiales ligeros y bajo amperaje; los voltajes altos se usan con materiales pesados y alto amperaje

b. En la variación a pulsos en la transferencia por rociado, el voltaje del arco estará entre 18 y 28 volts, dependiendo del intervalo de amperaje empleado.

C) Velocidad de avance

La velocidad de avance o de desplazamiento es la tasa de movimiento lineal del arco a lo largo de la junta a soldar. Cuando todas las demás variables se mantienen constantes, la velocidad de avance tiene un efecto inverso en el tamaño del cordón de soldadura. Cuando la velocidad aumenta, el tamaño del cordón disminuye. En algunos casos, una baja velocidad de avance puede resultar en una reducción de la penetración ya que el arco afecta en el espesor de la capa del metal fundido a depositar y el charco de soldadura delante del arco.

Cuando se incrementa la velocidad de avance, la energía térmica por unidad de longitud de la soldadura transmitida al metal base desde el arco es al principio incrementada, debido a que el arco actúa más directamente sobre el metal base. Por consiguiente, la fusión del metal base primero incrementa y después disminuye con el incremento de la velocidad de avance. Es por ello, que la velocidad de avance es otra de las variables clave que se utilizan en el cálculo del calor de entrada; si se reduce la velocidad de avance el calor de entrada aumenta (18; 24).

D) Velocidad de alambre

Es una medida de la velocidad a la cual el electrodo pasa a través de la pistola y es alimentado al arco. La velocidad de alimentación es directamente proporcional a la velocidad de alimentación del alambre y está directamente relacionada con el amperaje. Cuando las otras variables se mantienen constantes (por ejemplo, el mismo tipo de electrodo, el diámetro, voltaje del arco y extensión del electrodo) un incremento en la velocidad de alimentación del alambre conducirá a un incremento en el amperaje. A velocidades de alimentación lentas, la relación velocidad de alimentación del alambre-amperaje es relativamente constante y lineal. Para altas velocidades de alimentación esta relación puede incrementar, resultando en una velocidad de alimentación alta, pero a expensas de la penetración.

La velocidad de alimentación es el método preferido para mantener o registrar en el procedimiento de soldadura, para procesos de alimentación de alambre de voltaje constante. La velocidad de alambre puede ajustarse independientemente y ser medida directamente a diferencia de otras condiciones de soldadura. Es posible utilizar el amperaje como una alternativa, ya que el amperaje resultante a través de la velocidad de alimentación del alambre puede variar dependiendo de la polaridad, diámetro, tipo y extensión del electrodo (18).

E) Diámetro del electrodo

A mayor diámetro se requiere mayor corriente. Para amperaje fijo, sin embargo, electrodos más pequeños pueden resultar en mayor velocidad de depósito. Esto se debe al efecto de la densidad de corriente que se discute en la siguiente sección (ver **densidad de corriente**).

F) Extensión del electrodo

La extensión del electrodo es la distancia entre el extremo de la boquilla de contacto y la punta del electrodo tal como se muestra en la **Figura 2.25**. Cuando se aumenta la extensión del electrodo se produce un aumento en su resistencia eléctrica. El calentamiento por resistencia, a su vez, hace que la temperatura del electrodo se eleve, lo que resulta en un pequeño incremento de la velocidad de fusión del electrodo.

En general, la mayor resistencia eléctrica produce una caída de voltaje mayor entre la punta del electrodo y la pieza de trabajo. Esta situación es detectada inmediatamente por la fuente de potencia, la cual compensa este aumento con una reducción en la corriente.

Esto de inmediato reduce la tasa de fusión del electrodo y permite que se acorte la longitud física del arco. En consecuencia, a menos que haya un incremento de voltaje en la máquina de soldar, el metal de aporte se depositará en un cordón angosto y de corona alta.

La extensión del electrodo deseable está generalmente entre 1/4 a 1/2 pulg (6 a 12 mm) para la transferencia por corto circuito y de 1/2 a 1 pulg (12 a 25 mm) para la transferencia por spray.

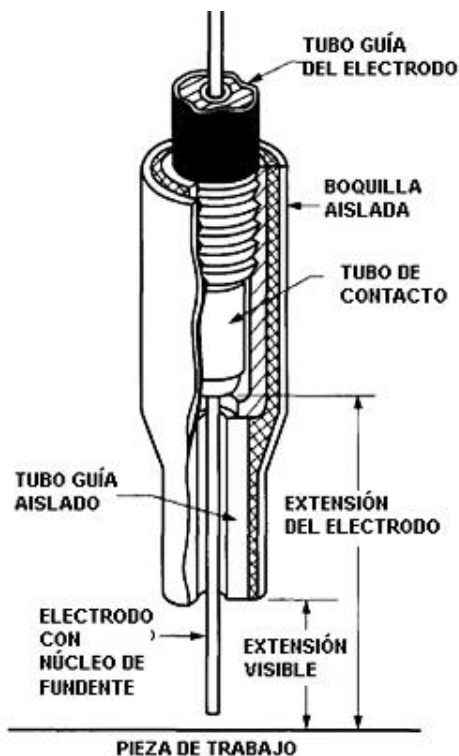


Figura 2.25 Extensión del electrodo (18)

G) Orientación

En la mayoría de los procesos de soldadura por arco, la orientación del electrodo con respecto a la unión por soldar afecta la forma y la penetración de la franja de soldadura, y este efecto sobre la franja es mayor que el del voltaje del arco o el de la velocidad de recorrido.

La orientación del electrodo se describe de dos maneras: (1) por la relación entre el eje del electrodo y la dirección de desplazamiento (el ángulo de desplazamiento) y (2) con el ángulo entre el eje del electrodo y la superficie adyacente del trabajo (ángulo de trabajo). Cuando el electrodo apunta en dirección opuesta a la dirección del desplazamiento, la técnica se denomina

soldadura de revés con ángulo de arrastre. Cuando el electrodo apunta en la dirección del desplazamiento, la técnica es soldadura de derecha con ángulo de ataque. La orientación del electrodo y su efecto sobre la anchura y la penetración de la soldadura se ilustran en la **Figura 2.26**.

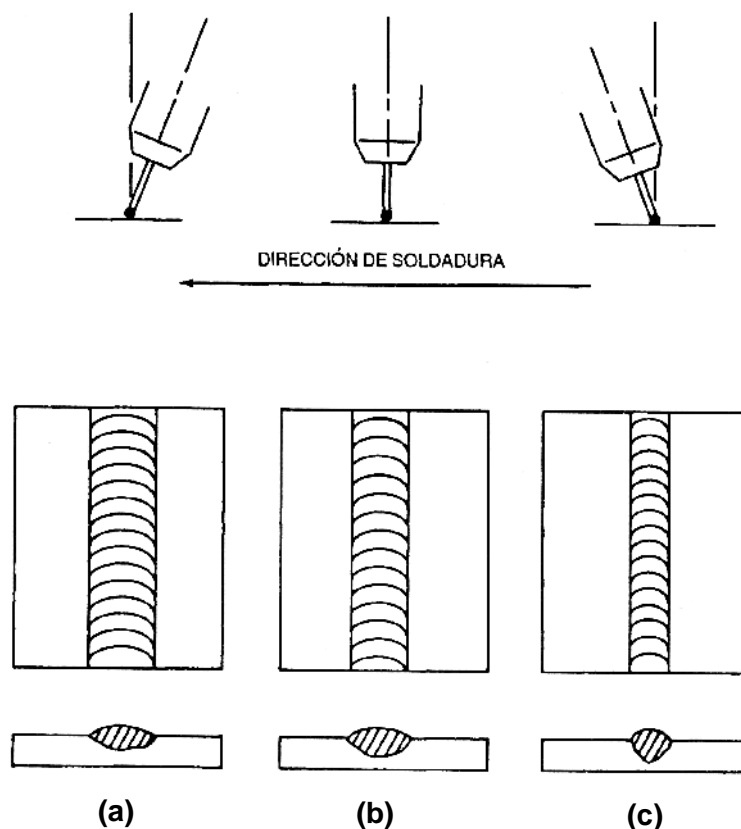


Figura 2.26 Efecto de la posición del electrodo y de la técnica de soldadura: (a) Técnica de derecha, (b) Soplete perpendicular y (c) Técnica de revés (23)

Cuando el electrodo se saca de la perpendicular dándole un ángulo de ataque, y todas las demás condiciones se mantienen sin alteración, la penetración disminuye y la franja de soldadura se hace más ancha y plana. La penetración máxima en la posición plana se obtiene con la técnica de arrastre, empleando un ángulo de arrastre de unos 25° respecto a la perpendicular. Esta técnica también produce una franja más convexa y angosta, un arco más estable y menos salpicaduras en la pieza de trabajo.

Para todas las posiciones, el ángulo de desplazamiento que se usa normalmente es un ángulo de arrastre del orden de 5 a 15 grados, ya que así se controla y protege mejor el charco de soldadura. Si se desea producir soldaduras de filete en la posición horizontal, el electrodo deberá colocarse a unos 45° respecto al miembro vertical (ángulo de trabajo), como se ilustra en la **Figura 2.27**.

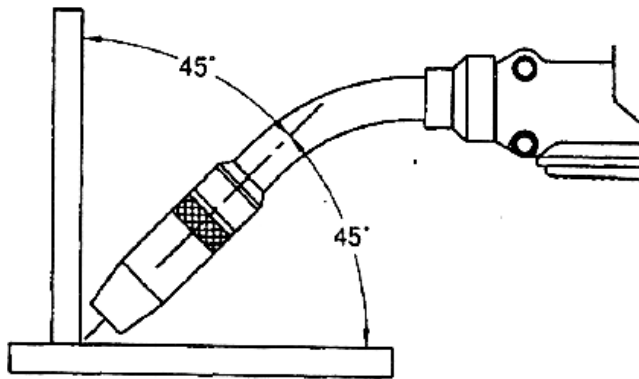


Figura 2.27 Ángulo de trabajo normal para soldaduras de filete (23)

H) Posición de la unión a soldar

En la mayoría de soldaduras con GMAW, se suele emplear la transferencia por aspersion para posiciones plana u horizontal según lo requiera el proceso, pero si el nivel de energía es bajo, la GMAW pulsada y en cortocircuito se pueden usar en todas las posiciones.

Las soldaduras de filete realizadas en posición plana con transferencia por aspersion suelen ser más uniformes, menos propensas a tener un perfil asimétrico o convexo y menos susceptibles a discontinuidades como el socavado, que la mayoría de las soldaduras de filete similares hechas en la posición horizontal. A fin de vencer la atracción de la gravedad sobre el metal de soldadura al soldar en las posiciones vertical y cenital, por lo regular se usan electrodos de diámetro pequeño, con transferencia de metal en cortocircuito o bien por aspersion con corriente continua a pulsos.

Si se suelda posición "plana", la inclinación del eje de soldadura respecto al plano horizontal influirá en la forma de la franja de soldadura, en la penetración y en la velocidad de recorrido. En la soldadura circunferencial en posición plana, el trabajo gira debajo de la pistola soldadora y la inclinación se obtiene moviendo la pistola en cualquier dirección que la aparte del centro muerto superior. Si las uniones lineales se colocan con el eje de soldadura a 15 grados respecto a la horizontal y se suelda cuesta abajo, es posible reducir el refuerzo de la soldadura en condiciones que producirían un refuerzo excesivo si se colocara el trabajo en la posición plana. Al mismo tiempo, la penetración es menor, lo que resulta benéfico cuando se sueldan piezas de lámina.

La soldadura cuesta abajo afecta el perfil y la penetración de la soldadura, como se observa en la **Figura 2.28 (A)**. Al aumentar el ángulo de inclinación, la superficie media de la soldadura adquiere una depresión, la penetración disminuye y la anchura de la franja aumenta. La soldadura cuesta arriba afecta el perfil de la zona de fusión y de la superficie de la soldadura, como se ilustra en la **Figura 2.28 (B)**. Al aumentar el ángulo de inclinación, aumentan también el refuerzo y la penetración, y la anchura de la franja disminuye.

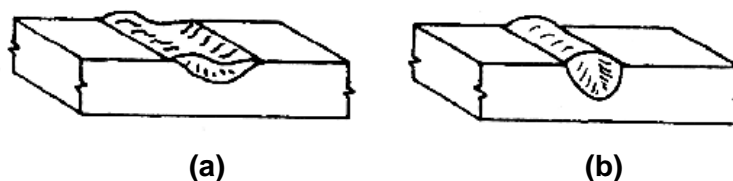


Figura 2.28 Efecto de la inclinación del área de trabajo sobre la forma de la franja de soldadura: (a) Cuesta abajo y (b) Cuesta arriba (23)

I) Polaridad

Es como se define la dirección del flujo de corriente, la polaridad positiva (inversa) se logra cuando el cable del electrodo es conectado a la terminal positiva de la fuente de poder de corriente directa (DC) y el cable de tierra se conecta a la terminal negativa. La polaridad negativa (directa) ocurre cuando el electrodo se conecta a la terminal negativa y la tierra a la terminal positiva.

La corriente alterna (AC) no tiene polaridad, pero es un tipo de corriente. Con la AC el electrodo se alterna al positivo y negativo. Para amperaje fijo es posible utilizar mayores velocidades de alimentación del alambre y mayor depósito con polaridad negativa que con positiva. La AC exhibe una mezcla de ambas características de polaridad negativa y positiva. El campo magnético que circunda cualquier conductor de DC puede causar un fenómeno conocido como soplo de arco, donde el arco es físicamente desviado por el campo. La resistencia del campo magnético es proporcional al cuadrado del valor de la corriente, siendo esto un problema potencial muy significativo en corrientes altas. La AC es menos propensa al soplo de arco y puede usarse algunas veces para sobrellevar este fenómeno (18).

J) Densidad de corriente

Se define como la relación del amperaje y el área de sección transversal del electrodo, para electrodos sólidos. Donde, (δ) es la densidad de corriente, (I) es la corriente y (d) el diámetro del electrodo (ver **Ec. 2.5**).

$$\delta = \frac{I}{d^2} \quad \text{(Ec. 2.5)}$$

Para electrodos tubulares la densidad de corriente es relativa a la sección del área metálica. Cuando la densidad de corriente aumenta incrementará la velocidad de depósito, así como la penetración. Cabe señalar que esta puede lograrse incrementando el amperaje y disminuyendo el diámetro del electrodo. Debido a que el diámetro de éste último está en una función cuadrada, un pequeño decremento en el diámetro puede tener un efecto significativo en la velocidad de depósito y en la penetración (18).

K) Tratamientos térmicos posteriores a la soldadura

El tratamiento térmico post soldadura (PWHT por sus siglas en inglés) normalmente se considera necesario para soldaduras de acero, de espesores gruesos (mayores a 20 mm) con el objeto de reducir el alto nivel de esfuerzos

residuales, mejorando la tenacidad y la tolerancia a defectos en la unión. Los códigos de fabricación normalmente ofrecen una guía en cuanto a tiempo y temperatura para llevar a cabo el PWHT. La temperatura máxima está relacionada con la composición química del acero, el tiempo de permanencia (a la temperatura máxima) depende del espesor del material, la velocidad de enfriamiento se relaciona con el tratamiento en particular y al código o estándar de referencia. La velocidad de calentamiento normalmente está dentro de los rangos de 149 a 177 °C (300 A 350 °F) por hora. El mantenimiento de la temperatura normalmente es de 2.4 min/mm (1 hora por pulgada) y el espesor máximo debe ser uniforme en todo el componente. En algunos casos la velocidad de enfriamiento se puede incrementar cuando la pieza ha sido enfriada a temperaturas de 260 a 316 °C (500 a 600°F). Lógicamente los parámetros establecidos para el PWHT se deben seguir explícitamente para cada pieza (18).

L) Calor de entrada

El calor de entrada es proporcional al amperaje de soldadura por el voltaje de arco dividido por la velocidad de avance. Altos niveles de calor de entrada dan como resultado el aumento de área de sección transversal de soldadura y una mayor ZAC. Un calor de entrada elevado generalmente resulta en una ligera disminución de la cedencia, resistencia a la tensión en el metal depositado y baja tenacidad debido a la interacción del tamaño del cordón y el calor de entrada.

M) Pre calentamiento y temperatura de interpasos

Este tipo de procesos se utilizan para controlar la tendencia al agrietamiento de ciertos materiales base. Respecto a las propiedades del metal base depositado, la mayoría de los sistemas C-Mn-Si, una temperatura entre pases moderada proporciona buena tenacidad. El pre calentamiento y la temperatura entre pases mayor a 288 °C puede afectar negativamente la tenacidad. Cuando el metal base recibe poco o ningún pre calentamiento, resulta en un rápido enfriamiento que puede deteriorar las propiedades de impacto. Por lo tanto es crítico controlar la temperatura de pre calentamiento y entre pases (18; 24).

2.4 Inspección y calidad de la soldadura

Los procesos de soldadura, poseen una terminología específica especializada, como la gran mayoría de los procesos industriales. Estas adecuaciones en los diseños de manufactura o calidad del proceso, tienen como objetivo lograr una comunicación efectiva entre la gente que está relacionada directamente con el proceso, operaciones, equipo, materiales, diseño y otras actividades pertenecientes a los métodos de unión involucrados. Debido a la importancia del empleo correcto y adecuado de estos términos, los organismos encargados de la regulación y estandarización de las aplicaciones y del desarrollo científico y tecnológico de los procesos de soldadura a nivel mundial, establecen códigos que estandarizan los términos a emplearse y la definición de los mismos.

En general, la mayoría de los procesos de soldadura implican la fusión de un material metálico (aporte, metal base) y a la posterior solidificación. Los cambios de estado generados se desarrollan a velocidades de enfriamiento muy rápidas, dando como resultado transformaciones metalúrgicas y alteraciones dimensionales que tienen un efecto considerable en las propiedades físicas, mecánicas y químicas en el cordón de soldadura (26).

El desarrollo y diseño de la ingeniería de soldadura debe comenzar antes de los procesos de producción, los cuales deben de tener en cuenta la variabilidad y el efecto de los parámetros operativos que permitan establecer una unión sana y de calidad capaz de soportar las demandas de operación a las que será sometida durante su vida útil.

Generalmente, en el metal base y las juntas soldadas aparecen o presentan imperfecciones, defectos o discontinuidades relacionadas con el proceso de soldadura. Por lo anterior, es necesario el uso de códigos que dictaminen el tamaño, tipo, número, clasificación, distribución y rangos de tolerancia, permitidos en el diseño original del proceso. Es por ello que la inspección tiene como función principal determinar si la unión soldada cumple con los requerimientos mínimos de aceptación para el proceso.

Dentro de los métodos para evaluación de la calidad se encuentran los ensayos no destructivos (END), los cuales pertenecen a un área de la ingeniería encargada del diseño de las operaciones y servicios, ya que, su ejecución es relativamente rápida. El empleo de nuevas tecnologías como las imágenes digitales, la radiografía por neutrones, el electromagnetismo, la termografía o la emisión acústica, han constituido ser herramientas indispensables de uso cotidiano en los últimos años, para industrias que desean mantenerse a la vanguardia del mercado con sus productos. Los procesos de manufactura de componentes, aditamentos, subensambles, dispositivos, equipos e instalaciones, en los cuales se ven involucradas un gran número de actividades cuyo propósito está bien definido y delimitado; entre las que se encuentran principalmente: el diseño, manufactura, montaje, instalación y calidad.

El desarrollo de nuevas tecnologías y la exigencia de los productos a más sofisticados requisitos de seguridad, han impulsado a establecer nuevas condiciones de inspección, por lo cual se estableció la necesidad de verificar hasta un 100% los componentes críticos. Esta condición planteó una seria dificultad en los departamentos de calidad y seguridad industrial, por lo cual fue necesario el empleo de técnicas rápidas que asegurasen la calidad sin comprometer los tiempos de producción, como por ejemplo los ensayos no destructivos, con los cuales se mide la sanidad e integridad de los componentes sin afectarlos o dañarlos. Lo anterior fue posible al relacionar alguna propiedad del material con algunas características críticas del componente examinado. En la actualidad, el empleo de pruebas no destructivas suele ser una de las actividades más comunes en todos los sectores a nivel industrial.

2.4.1 Pruebas de uniones soldadas

Existen varios procesos para inspeccionar las uniones y piezas soldadas, los cuales se dividen en ensayos no destructivos y ensayos destructivos. Los primeros son métodos que, sin dañar la pieza evaluada, posibilitan la detección de discontinuidades y aportan información precisa sobre el estado y la calidad de los cordones de soldadura.

Por otro lado, los ensayos destructivos son una serie de pruebas de destrucción física de la soldadura con el fin de evaluar sus características mecánicas, físicas y de servicio. Este tipo de pruebas se utiliza con frecuencia en un gran número de aplicaciones industriales. Algunas de estas aplicaciones incluyen la calificación de los WPS y las pruebas de rendimiento para la calificación del soldador, la inspección y muestreo de las soldaduras del proceso de producción, inspección y análisis de fallas. Por lo general implican el corte y/o ruptura del componente y la evaluación de diferentes características mecánicas y/o físicas de la pieza (9).

2.4.1.1 Ensayos no destructivos

Los exámenes no destructivos (END) están definidos por la norma ANSI/AWS A3.0, la cual establece las condiciones de adecuación para componentes o materiales según su propósito específico, lo cual incluye el uso de técnicas que no afecten su integridad (9; 26). En los END no se emplean piezas sometidas a pruebas que afecten de forma permanente sus propiedades; sin embargo, si la finalidad es la de evaluar la calidad de las piezas inspeccionadas, esto es, su homogeneidad y continuidad, estos ensayos contribuyen en gran medida al aseguramiento de la calidad, contribuyendo con la integridad y la fiabilidad de las partes examinadas.

Con la finalidad de asegurar la correcta aplicación de los END, es necesario tomar en cuenta ciertos factores que tienen influencia sobre su efectividad, tales como: 1) Los diferentes métodos de END no son de aplicación general sino más bien específica, y no existe ningún método en particular que pueda cubrir los objetivos de la aplicación de los END para todas las situaciones o casos. Por lo general cada método se complementa con otro u otros y aun con pruebas destructivas; 2) Cada método tiene un ámbito específico de aplicación determinando por el tipo de información que se desea obtener de la pieza a examinar, sus condiciones superficiales, el tipo de material, el método de fabricación, su configuración geométrica, sus requisitos de diseño y por aspectos económicos o por una combinación de dos o más de estos factores; 3) Cada

método no destructivo tiene sus ventajas y limitaciones, y su empleo debe estar asociado con los requisitos de las normas y los documentos contractuales aplicables, los cuales contienen los criterios de aceptación correspondientes (27).

Los métodos de ensayos no destructivos que se utilizan con mayor frecuencia en la actualidad son los siguientes:

- Inspección visual (VT)
- Líquidos penetrantes (PT)
- Radiografía (RT)
- Ultrasonido (UT)
- Electromagnetismo (Corrientes parasitas o Corrientes de Eddy) (ET)
- Detección de fugas (LT)
- Radiografía neutrónica (NRT)
- Emisión acústica (AET)
- Análisis de vibraciones (VA)
- Pruebas térmicas e infrarrojas (TIR)
- Comprobación (Proof testing) (PRT)
- Métodos de prueba con Laser

2.4.1.2 Ensayos destructivos

Las pruebas destructivas a que se someten las juntas y productos soldados se pueden clasificar en mecánicas, químicas y metalográficas, y cada una de estas clasificaciones incluye un número relativamente grande de pruebas particulares para satisfacer los requisitos especificados. Dentro de los ensayos más significativos se encuentran:

- Ensayo de resistencia a la tensión
- Ensayo de resistencia al dobléz
- Ensayo de Nick-Break
- Ensayo de resistencia al impacto y Ensayo de dureza

2.4.2 Discontinuidades y defectos de soldadura y metal base

Los metales base y las juntas soldadas generalmente presentan imperfecciones que varían en naturaleza, tamaño, frecuencia, localización y distribución. Tales imperfecciones pueden representar un riesgo en la integridad y la seguridad de equipo o estructura que las contiene.

Cada norma sobre bienes soldados establece los criterios de aceptación para las diferentes imperfecciones que pueden presentarse en las uniones soldadas, y una de las funciones principales del inspector de soldadura consiste en determinar si el trabajo que esta inspeccionando cumple con tales criterios de aceptación.

Normalmente a estas imperfecciones se les llama discontinuidades o defectos y casi siempre están presentes en las uniones soldadas. Los criterios de aceptación de las normas sobre cada aplicación establecen el tipo, tamaño, número y distribución que pueden ser tolerados.

En la mayoría de las ocasiones existe confusión entre la diferencia de estos dos términos. Una discontinuidad es una interrupción de la estructura típica de un material, tal como una falta de homogeneidad en sus características mecánicas metalúrgicas o físicas; y un defecto es una o varias discontinuidades por su naturaleza, tamaño o defecto acumulado no son permitidas por el criterio de aceptación del estándar aplicable.

Algunas discontinuidades pueden ser aceptables y los defectos siempre son rechazables. Los defectos ponen en riesgo la utilidad y seguridad del producto que los contiene, y una tarea clave del inspector, es identificar, rechazar y reportar los defectos existentes, así como verificar, por medio de los métodos de reinspección apropiados, que las reparaciones necesarias se llevan a cabo efectivamente, de manera que el producto reparado cumpla con los criterios de aceptación especificados; también debe elaborar los reportes de reinspección.

Discontinuidades inherentes. Se forman durante el proceso de solidificación del metal líquido. Estos tipos de discontinuidades están proporcionalmente relacionadas con la composición y calidad del metal, la forma del vaciado y el proceso de solidificación, además, se incluyen discontinuidades producidas por las variables primarias en proceso, tales como: una alimentación inadecuada, vertedero en mal estado, alta temperatura de vaciado, velocidad de vaciado, inclusiones no metálicas y gases atrapados.

Discontinuidades de proceso. Están relacionadas con los procesos de manufactura tales como: maquinado, tratamientos térmicos, recubrimientos metálicos, conformado en caliente (forjado, extruido, rolado, laminado, etc.), conformado en frío (doblado, prensado, laminado etc.) y soldadura.

En la mayoría de estos procesos las discontinuidades sub-superficiales se pueden transformar en superficiales debido a los cambios que afectan al proceso. Un ejemplo de ello se muestra en la **Figura 2.29**.



Figura 2.29 Ejemplo de laminación (28)

Discontinuidades de servicio. Son generadas debido a las operaciones y condiciones de servicio a las que son sometidas durante su vida útil, dentro de los cuales se encuentran esfuerzos de tensión o compresión (ver **Figura 2.30**), corrosión atmosférica, fatiga, o fricción.



Figura 2.30 Discontinuidad por servicio (28)

Las discontinuidades de soldadura y el metal base pueden clasificarse en los siguientes grupos:

- Discontinuidades por la estructura metalúrgica en la unión soldada.
- Discontinuidades en la unión soldada
- Discontinuidades provenientes del metal base
- Imperfecciones y discontinuidades relacionadas con los requisitos dimensionales

2.4.2.1 Discontinuidades en la estructura metalúrgica de la unión soldada

Este tipo de discontinuidades aparecen de forma inherente en la soldadura y generalmente se desarrollan en términos de la interrupción de la continuidad física del MS o la ZAC.

A) Fracturas

Las fracturas aparecen en las uniones soldadas o en el metal contiguo debido a esfuerzos internos, los cuales sobrepasan la resistencia máxima del metal. Este tipo de discontinuidades son producidas por varios factores entre los cuales destacan discontinuidades lineales como faltas de penetración o de fusión, las inclusiones de escoria o porosidad lineal; por muescas mecánicas relacionadas con el diseño del ensamble soldado o bien la rigidez de la junta la cual hace más difícil absorber las contracciones y expansiones térmicas propias del proceso de soldadura.

El empleo de altos amperajes, ocasionan sobrecalentamientos localizados lo cual propicia la aparición de este tipo de discontinuidades. Algunos de los factores que favorecen su aparición son los esfuerzos residuales altos y la fragilización por hidrógeno. Existen diferentes tipos de fracturas y su clasificación generalmente se basa en su orientación con respecto a la soldadura y también por la temperatura a la que se forman; desde este punto de vista se pueden agrupar en fracturas en caliente y en frío.

- a) *Fracturas en caliente.* Se forman durante el proceso de solidificación y se propagan de forma intergranular (entre granos).
- b) *Fracturas en frío.* Se forman después del proceso de solidificación, son asociadas frecuentemente con fragilización por hidrógeno. Se propagan de forma inter y transgranular (entre y a través de los granos).

Dependiendo de la forma y su desarrollo, las fracturas también se pueden clasificar en:

Fracturas longitudinales. Son aquellas que se encuentran paralelas a la soldadura, ya sea que estén en la línea de centro del material de aporte o bien, en la zona afectada por el calor del metal base (ver **Figura 2.31**). En soldaduras de secciones de espesor grueso, este tipo de fracturas son originadas frecuentemente por las altas velocidades de enfriamiento y condiciones severas de restricción. En soldaduras de arco sumergido, éstas discontinuidades son frecuentemente asociadas con altos amperajes y velocidades de avance, y en ocasiones, se relacionan con problemas de porosidad, que no se muestran en la superficie.

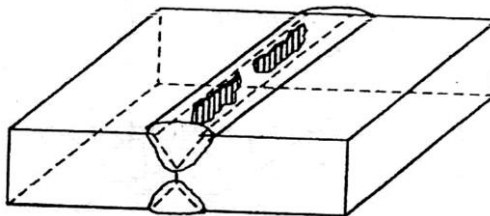


Figura 2.31 Representación gráfica de fracturas longitudinales (29)

Las fracturas longitudinales formadas en pequeñas soldaduras entre grandes secciones, son comúnmente el resultado de altas velocidades de enfriamiento y de grandes restricciones. Un ejemplo de ello se muestra en **Figura 2.32**.



Figura 2.32 Fractura longitudinal en el centro de la soldadura (28)

Fracturas transversales. Son perpendiculares a la dirección de la soldadura, se pueden localizar exclusivamente en el metal de soldadura, o bien, pueden ser propagadas de éste a la zona afectada por el calor y dentro del metal.

En la mayoría de los casos las fracturas transversales se forman solo en la ZAC y no en la soldadura (ver **Figura 2.33**).

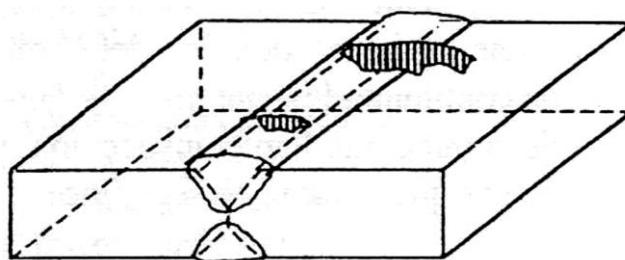


Figura 2.33 Representación gráfica de fracturas transversales (29)

Este tipo de fractura se debe principalmente a los esfuerzos de contracción longitudinales que actúan sobre el metal de aporte con baja ductilidad y juntas que tienen un alto grado de restricción (ver **Figura 2.34**).



Figura 2.34 Fracturas transversales en el metal de soldadura (28)

Fracturas en la interface de la soldadura. Estas se desarrollan en la interface de la soldadura donde inician y se desarrollan por la concentración de esfuerzos a lo largo del cordón (ver **Figura 2.35**); su aparición es favorecida por exceso de convexidad en el cordón o por un esfuerzo residual muy alto.

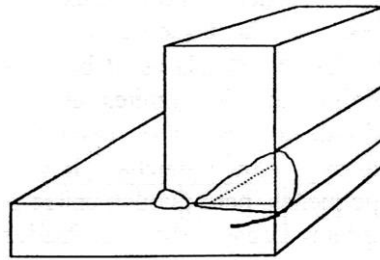


Figura 2.35 Representación gráfica de fracturas en el pie de la soldadura (29)

En general, estas discontinuidades se inician en la superficie del metal base, pero tienden a propagarse a través de la zona afectada por el calor. Por lo general son fracturas producidas en frío (ver **Figura 2.36**).

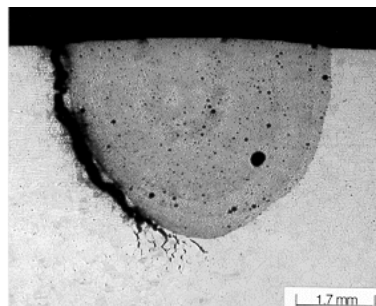


Figura 2.36 Fractura en el pie de la soldadura de la soldadura (28)

Fracturas en el cráter. Se presentan cuando el arco es terminado de forma incorrecta. Son consideradas fracturas en caliente y generalmente su profundidad es pequeña. En algunas ocasiones se denominan “*fracturas estrella*” (ver **Figura 2.37**) debido a su frecuente tendencia de propagación en varias direcciones a partir del centro del cráter, pero también pueden tener otras formas. Este tipo de fractura es el resultado de interrumpir la operación de soldadura y en consecuencia la contracción del metal de aporte y la formación de cráteres.

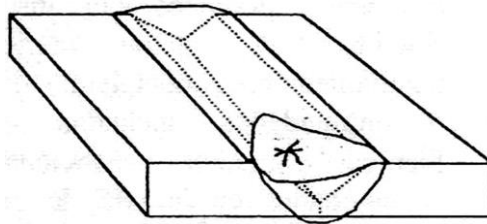


Figura 2.37 Representación gráfica de fracturas en el cráter (29)

Las fracturas generalmente se propagan hasta el borde del cráter, no obstante, en ocasiones pueden ser punto de inicio de fracturas longitudinales, en particular cuando se finaliza la soldadura (ver **Figura 2.38**).

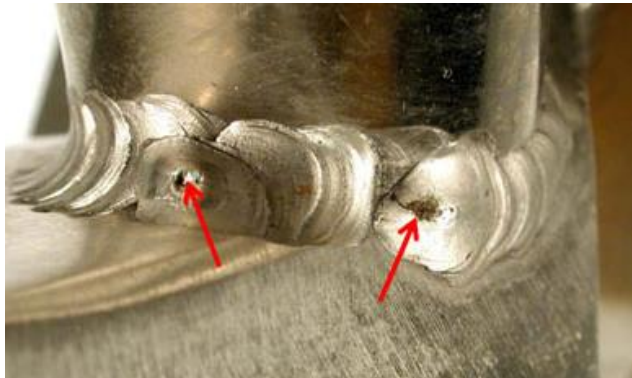


Figura 2.38 Fracturas en el cráter de los reinicios de la soldadura (30)

Fracturas en la raíz. Generalmente son fracturas que se forman en la ZAC y se encuentran distribuidas en intervalos regulares por debajo del cordón, delimitando la soldadura donde existen esfuerzos residuales mayores.

Frecuentemente son fracturas de poca longitud, pero al incrementarse en número tienden a unirse y formar fracturas largas y continuas (ver **Figura 2.39**). Pueden llegar a convertirse en un problema serio, particularmente cuando se presentan de forma combinada con la presencia de contaminación por hidrógeno.

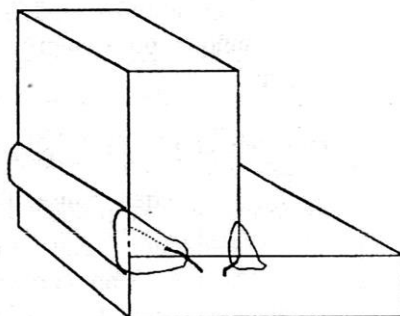


Figura 2.39 Representación gráfica de fracturas en la raíz de la soldadura (29)

Este tipo de defectos cuentan con microestructuras que tienen una ductilidad relativamente baja y alta resistencia y dureza (HRC superior a 30) y esfuerzos residuales altos (Ver **Figura 2.40**).

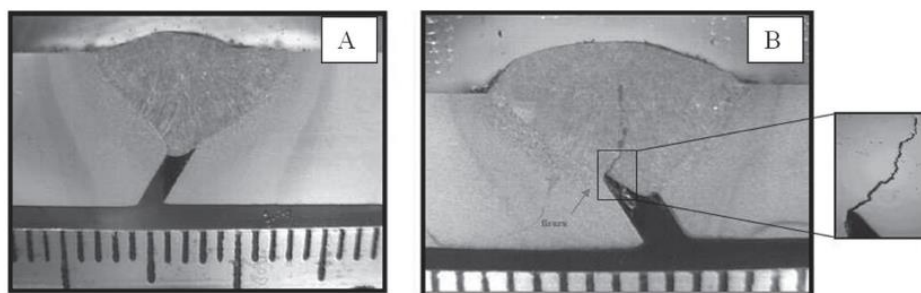


Figura 2.40 Fractura de raíz. (A) Probeta sin fractura y (B) Probeta fracturada (resultados de ensayo Tekken, vista transversal de ZAC) (28)

Fracturas debajo del cordón y en la zona afectada por el calor. En general, son fracturas en frío que se forman en la ZAC; pueden ser longitudinales o transversales. En la mayoría de las veces aparecen de forma aislada y aleatoria debajo del cordón de soldadura, delineado en los límites de la soldadura donde los esfuerzos residuales son más altos. Frecuentemente presentan tamaños pequeños, pero pueden unirse para formar fracturas largas y continuas, que

pueden llegar ser un problema serio, particularmente cuando se presentan de manera simultánea las siguientes condiciones: presencia de hidrógeno, microestructuras susceptibles al agrietamiento y esfuerzos residuales altos. Las fracturas por debajo del cordón de soldadura, son discontinuidades internas y no pueden detectarse mediante inspección visual (a no ser que la junta se seccione).

Fracturas de borde. Son normalmente fracturas en frío. Inician y se desarrollan a lo largo del borde de soldadura, en donde se concentran grandes esfuerzos de contracción. Estas fracturas, en general son el resultado de las contracciones térmicas en la ZAC (ver **Figura 2.41**).



Figura 2.41 Fractura de borde en la unión de tubería industrial (28)

Fractura de garganta. Se consideran como fracturas longitudinales, las cuales se localizan en la cara de las soldaduras de ranura y de filete. Generalmente, aunque no siempre, son fracturas en caliente.

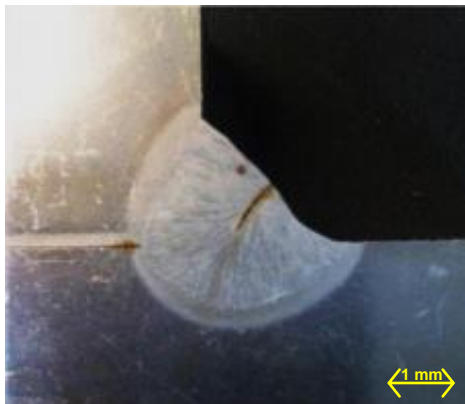


Figura 2.42 Fractura de garganta en soldadura de filete (28)

B) Porosidad

La porosidad es un tipo de discontinuidad que aparece por gas atrapado durante la solidificación del metal. Generalmente, los poros presentan forma cuasi esférica, pero también pueden ser de geometría irregularmente alargada. En algunos casos cuando la porosidad no es excesiva o su distribución y tamaño es pequeño, la presencia de esta no es crítica debido a que no tienen bordes agudos los cuales pueden ser concentradores de esfuerzos.

La presencia de porosidad excesiva es un indicador de la falta de control en los parámetros de soldadura, de un mal diseño y preparación de juntas o bien, de la contaminación de la materia prima, presencia de óxido y humedad en la superficie del metal base. Otra causa puede ser la pérdida o contaminación del gas de protección o un manejo inadecuado del flujo durante la soldadura.

Según su forma y distribución, los poros se pueden clasificar en:

Porosidad distribuida uniformemente. Este tipo de porosidad está distribuida de manera uniforme y aleatoria a lo largo del metal de soldadura (ver **Figura 2.43**). Algunas de las causas probables con este tipo de discontinuidad se relacionan con la técnica de soldadura inadecuada, la preparación incorrecta de las juntas o errores en el manejo de la materia prima.

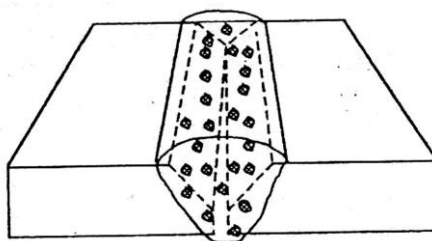


Figura 2.43 Representación gráfica de porosidad distribuida uniformemente (29)

La manera de prevenir este tipo de discontinuidades es el manejo adecuado de los materiales, técnicas correctas de soldaduras y de preparación de juntas. Un ejemplo de ello se muestra en la **Figura 2.44**.



Figura 2.44 Porosidad distribuida uniformemente a lo largo del cordón de soldadura (28)

Porosidad agrupada. Son grupos focalizados de poros separados por longitudes considerables de metal de soldadura sano a lo largo del metal soldado (ver **Figura 2.45**).

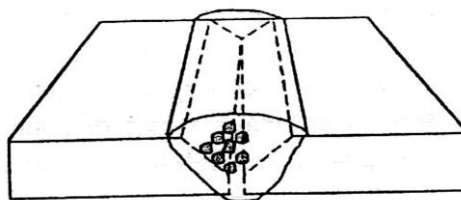


Figura 2.45 Representación gráfica de porosidad agrupada (29)

Entre las causas más probables destaca un mal inicio o final inadecuado del cordón de soldadura, otra causa común es el llamado soplo de arco (arc blow) el cual puede ser prevenido al bajar la intensidad de la DC o bien cuando sea posible, soldar con AC; cambiando la conexión del cable al otro extremo de la pieza de trabajo haciendo conexiones en varios puntos (ver **Figura 2.46**).



Figura 2.46 Porosidad agrupada al final del cordón de soldadura (28)

Poros túnel. Es una cavidad alargada que se extiende de la raíz de la soldadura hacia la superficie (ver **Figura 2.47**). Ocurre principalmente en soldaduras de ranura.

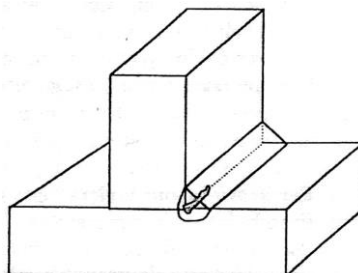


Figura 2.47 Representación gráfica de porosidad en túnel o cilíndrica (29)

En la mayoría de los casos, los poros superficiales están asociados con porosidad debajo de la superficie (Ver **Figura 2.48**).



Figura 2.48 Porosidad en túnel sub-superficial a lo largo del metal soldado (28)

Porosidad alineada. Este tipo de discontinuidad presenta una trayectoria recta a lo largo del cordón de soldadura, frecuentemente a lo largo de los límites del metal de soldadura con el metal base, los límites entre cordones o cerca de la raíz de la soldadura (ver **Figura 2.49**).

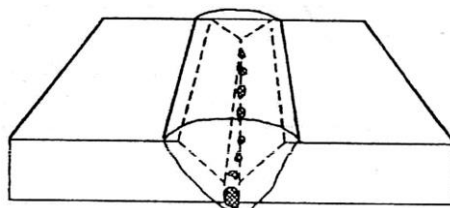


Figura 2.49 Representación gráfica de porosidad lineal cerca de la raíz de la soldadura (29)

La porosidad lineal puede ser causada por contaminación reactiva durante la soldadura dando como resultado la generación de gases en las zonas contaminadas (ver **Figura 2.50**).



Figura 2.50 Porosidad lineal en soldaduras de filete (28)

C) Penetración incompleta

Se presenta cuando el arco eléctrico no es capaz de fundir uno o ambos lados de la raíz. Esta discontinuidad puede presentarse en ranuras soldadas por uno o por ambos lados e indeseable cuando la raíz de la soldadura estará sujeta a la aplicación de esfuerzos de tensión o dobléz, ya que las áreas no fundidas permiten la concentración de estos, lo que da como resultado la formación de una fractura sin deformación apreciable, adicionalmente los esfuerzos de contracción y la consecuente distorsión que sufren las partes durante la soldadura pueden provocar el desarrollo de fracturas en el área no fundida ya que llegan a extenderse a través del espesor de la soldadura.

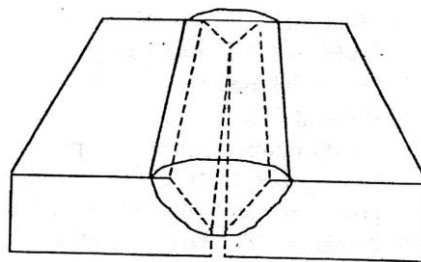


Figura 2.51 Representación gráfica de penetración incompleta (29)

El empleo de ensayos no destructivos para la inspección de uniones soldadas por diferentes procesos de fusión, permiten asegurar que las soldaduras tienen penetración completa como es el caso de estructuras civiles y líneas de tubería.

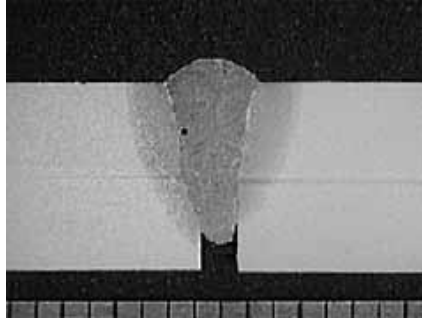


Figura 2.52 Penetración incompleta en una junta a tope (31)

Existen diversas causas para aparición de esta discontinuidad entre las cuales destacan: el tipo de proceso de soldadura, bajos amperajes de operación, diseño inadecuado de la junta como por ejemplo: tamaño de la cara de raíz fuera de tolerancia, abertura de raíz angosta o el ángulo de la ranura muy cerrado; algunas otras causas son: espesor demasiado grueso para que el arco de soldadura puede penetrar, el uso de electrodos de diámetro inadecuado con respecto al diseño de la junta, velocidades de soldadura muy altas (ver **Figura 2.52**).

D) Inclusiones

Inclusiones de escoria. Son partículas sólidas no metálicas atrapadas en el cordón de soldadura o entre el metal de soldadura y el metal base (ver **Figura 2.53**). Estas discontinuidades no son exclusivas de algún proceso de arco en particular. Generalmente, estas inclusiones son el resultado de fallas en la técnica de soldadura, en el diseño de la junta, o en una limpieza inadecuada entre los cordones de la soldadura. En la mayoría de los casos, la escoria disuelta fluiría hacia la parte superior de la soldadura, pero en casos extraordinarios la presencia de muescas agudas en la interfase de metal base y de soldadura, o entre los cordones de soldadura, frecuentemente provocan que la escoria quede atrapada bajo el metal de soldadura.

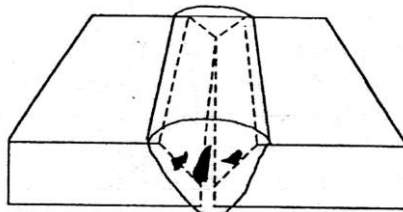


Figura 2.53 Representación gráfica de inclusiones de escoria (28)

Inclusiones de Tungsteno. Se denominan a las partículas de tungsteno atrapadas en el MS y son exclusivas del proceso GTAW (TIG). Este proceso utiliza un electrodo de tungsteno no consumible, el cual crea el arco entre la pieza de trabajo y el electrodo. Si el electrodo es sumergido en el charco de soldadura, o si la corriente es muy alta, se depositarán partículas de tungsteno, o se romperá la punta del electrodo y quedará atrapada en la soldadura.

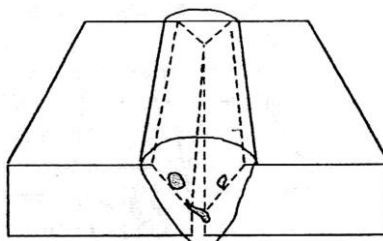


Figura 2.54 Representación gráfica de inclusiones de tungsteno (28)

Dichas inclusiones aparecen como manchas claras en la radiografía, pues el tungsteno es más denso que el acero y absorbe más radiación. En la **Figura 2.54** se muestra una vista de una placa radiográfica con inclusiones de tungsteno. Casi todas las demás discontinuidades, incluyendo las inclusiones de escoria, se muestran como áreas oscuras en las radiografías porque son menos densas que el acero.

E) Fusión incompleta

Es la falta de unión entre el metal de soldadura y las caras del metal base o la superficie de otros cordones (ver **Figura 2.55** y **Figura 2.56**). Esta discontinuidad es también conocida como falta de fusión.

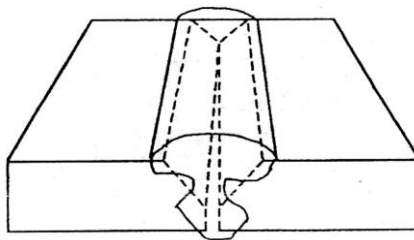


Figura 2.55 Representación gráfica de fusión incompleta (29)

Generalmente se debe a un amperaje bajo o bien a una velocidad de avance relativamente alta lo que no permite la fusión completa del metal base o de los cordones adyacentes de soldadura. Otra posible causa es escoria que al fundirse no permite la unión del metal aportado.

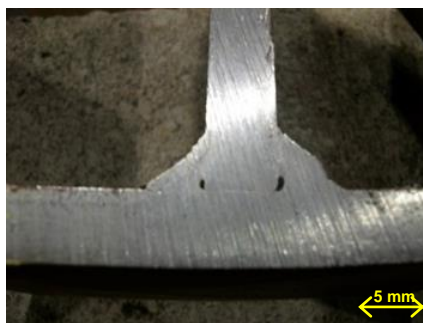


Figura 2.56 Falta de fusión en la raíz del cordón de soldadura (28)

F) Socavado

Es la erosión provocada por el arco eléctrico y puede presentarse en la interfase entre el metal de aporte y el metal base o entre dos cordones de soldadura (ver **Figura 2.57**). Es una discontinuidad lineal y su aceptación o rechazo dependerá de su profundidad y de su longitud ya que su presencia crea una muesca que actúa como un concentrador de esfuerzos y reduce la sección efectiva afectando la resistencia de la junta, particularmente a los esfuerzos de fatiga. Normalmente, es provocado por el empleo de amperajes o voltajes altos o longitud de arco largo, también es provocado por una técnica incorrecta de soldador y manipulación inadecuada del electrodo (32; 33; 29).

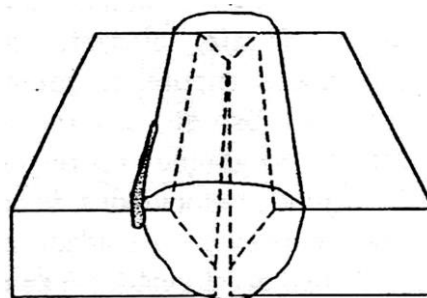


Figura 2.57 Representación gráfica teórica de socavado (29)

G) Llenado incompleto

Es una depresión de la junta soldada en la cual la cara de la soldadura o la superficie de la raíz se extienden por debajo de la superficie del metal base como se muestra en la **Figura 2.58**; algunas veces queda descubierta una porción de la cara de la ranura. En la superficie de la raíz de soldaduras hechas por un solo lado, esta discontinuidad es conocida también con el término no estandarizado de concavidad de raíz.

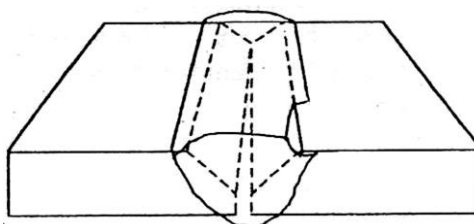


Figura 2.58 Representación gráfica de llenado incompleto (29)

H) Traslape o cordón traslapado

Es la protuberancia del metal depositado que se extiende más allá del pie o la raíz de la soldadura (ver **Figura 2.59**). Es una discontinuidad superficial que constituye una muesca mecánica que actúa como concentrador de esfuerzos y casi siempre se considera rechazable.

Dentro de las causas probables se encuentra el control insuficiente de las operaciones de soldadura: oscilación excesiva del electrodo, velocidad de avance lenta asociada con corriente alta, posición de soldadura incorrecta (por ejemplo, soldaduras de filete de tamaño relativamente grande depositadas con cordón sencillo en posición horizontal o vertical), selección inapropiada de los consumibles de soldadura, preparación inapropiada de la junta y óxidos firmemente adheridos al metal base, mismos que pueden interferir con la fusión.

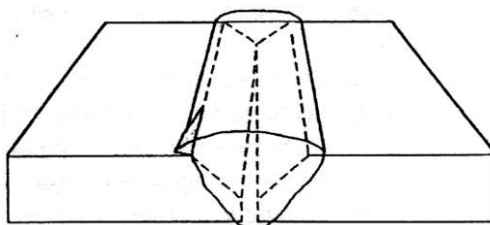


Figura 2.59 Representación gráfica de un cordón traslapado (29)

I) Desgarre laminar

Discontinuidad subsuperficial en el metal base. Esta discontinuidad tiene forma similar a un desnivel o montículo, con grietas escalonadas como se muestra en **Figura 2.60**; su orientación básica es paralela a la superficie de laminación o forjado y normalmente está localizada dentro de la zona afectada térmicamente o justo por debajo de ésta.

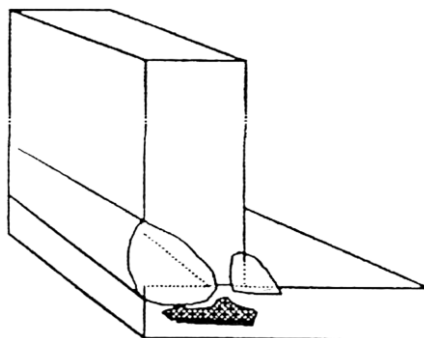


Figura 2.60 Representación gráfica de un desgarre laminar (29)

Esta discontinuidad es causada por los esfuerzos de tensión a lo largo del espesor del metal base que se generan durante las operaciones de soldadura. El desarrollo del desgarre laminar es favorecido por la presencia de inclusiones no metálicas de forma plana y paralelas a la superficie del metal base. El desgarre laminar tiende a ocurrir en planchas y perfiles estructurales de espesor gruesos y sometidos a un trabajo mecánico limitado desde su etapa de lingote hasta el espesor final. Su ocurrencia se ve favorecida por la aplicación de depósitos masivos de soldadura adyacentes al espesor de las placas.

2.4.2.2 Discontinuidades en estructura y propiedades de juntas soldadas

Además de las imperfecciones descritas, existen otras condiciones y discontinuidades relacionadas con las propiedades, estructura y apariencia, que afectan adversamente a las juntas soldadas. A continuación, se describen brevemente las imperfecciones de este tipo.

A) Golpes de arco

Son discontinuidades que se producen intencional o accidentalmente, cuando se establece el arco eléctrico entre la pieza de trabajo y el electrodo fuera del área de metal de soldadura permanente.

Consiste en pequeñas áreas localizadas del metal fundido y térmicamente afectado, o en cambios del contorno superficial de cualquier objeto mecánico sobre el que se inició o desplazó el arco fuera de las áreas a fundir durante la soldadura.

Las áreas con golpe de arco contienen regiones de metal que fundió, solidificó y enfrió rápidamente. Los golpes de arco son indeseables y con frecuencia no son aceptables, ya que pueden originar fracturas de las partes que los contienen particularmente si son de aceros de media o alta aleación.

La mayoría de las normas requiere que las áreas con golpe de arco sean removidas y que su eliminación efectiva sea verificada (ver **Figura 2.61**).

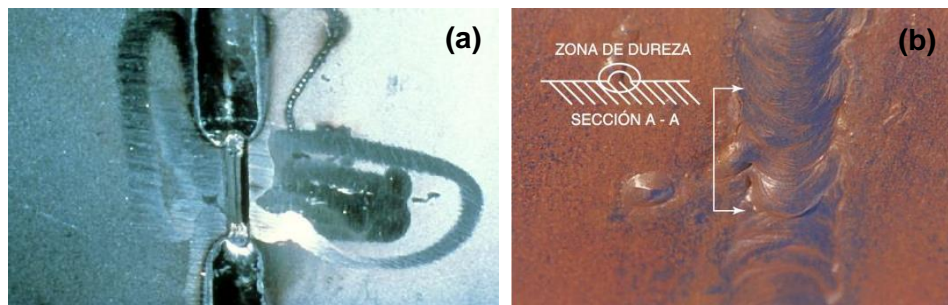


Figura 2.61 Golpe de arco: (a) Dirección errada del arco, (b) Reinicio incorrecto (32)

B) Salpicaduras o chisporroteo

Son partículas metálicas expulsadas durante la soldadura y que no forman parte de la junta. Por definición, las salpicaduras son partículas que son lanzadas lejos del metal base y de la soldadura, pero algunas de estas se adhieren al metal base contiguo (33). Por lo general las salpicaduras no se consideran un problema serio, a menos de que su presencia interfiera con las operaciones posteriores, particularmente con la ejecución de exámenes no destructivos, o afecte la utilidad o la apariencia de la parte o el componente (ver **Figura 2.62**).



Figura 2.62 Salpicaduras sobre metal base (30)

C) Condiciones indeseables en general

Por lo general las juntas soldadas deben tener uniformidad en las propiedades, composición química y microestructura en el cordón de soldadura, el metal base y la zona afectada por el calor, pero en la realidad, siempre existe heterogeneidad

en estas zonas; tales diferencias suelen resultar perjudiciales para el desempeño seguro de los componentes soldados. En todo caso, la condición que siempre se necesita satisfacer es que las propiedades de la junta, tanto en el metal de soldadura, el metal base y la zona afectada por el calor, sean lo más parecidas posible o compatibles. Esto significa, que la unión soldada en su conjunto posea (en la medida de lo posible y cumpliendo los requisitos de las normas aplicables) propiedades similares –resistencia a la tensión ductilidad, resistencia al impacto, dureza, resistencia a la corrosión y composición química, entre otras- a fin de que las partes soldadas puedan tener un comportamiento satisfactorio durante servicio. Los medios para cumplir la condición anterior son provistos por las normas, a través de sus requisitos sobre la preparación de las especificaciones de procedimientos de soldadura adecuadas para cada aplicación, su calificación mediante pruebas (o su precalificación, si ésta procede) y su aprobación.

2.4.2.3 Discontinuidades provenientes del metal base

A) Laminaciones

Discontinuidad plana, generalmente extendidas y paralelas a la superficie de laminación que se encuentran en el área central de productos laminados, tales como placas, laminas y perfiles. Las laminaciones se forman como resultado de porosidades, cavidades de contracción o inclusiones no metálicas en el lingote original a partir del cual se fabricó el producto laminado; el proceso de laminado provoca que tales discontinuidades se unan, extiendan, crezcan y adquieran forma plana en la parte central del espesor de la pieza.

Algunas limitaciones pueden ser eliminadas debido a las altas temperaturas y presiones del laminado, pero otras persisten y pueden ser completamente internas, también pueden extenderse a los extremos y bordes y resultar visibles en la superficie, o bien, pueden quedar expuestas por operaciones de corte y maquinado, situaciones en las que pueden ser verificadas por medio de líquidos penetrantes o partículas magnéticas (32).

Las partes metálicas que contienen laminaciones, por lo general no son capaces de conducir satisfactoriamente los esfuerzos de tensión a través de la dirección de espesor, por lo que el tamaño y frecuencia de las laminaciones están restringidas por las especificaciones correspondientes (ver **Figura 2.63**).

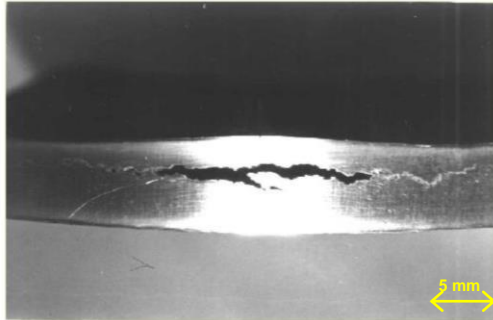


Figura 2.63 Macrografía de laminación en un recipiente a presión (28)

B) Delaminación

Es la separación de una laminación debida a esfuerzos aplicados. Estos esfuerzos pueden ser generados por operaciones de soldadura o por presión. Pueden ser detectadas con ultrasonido (con has recto), o, si aflojaran a la superficie de los bordes, visualmente.

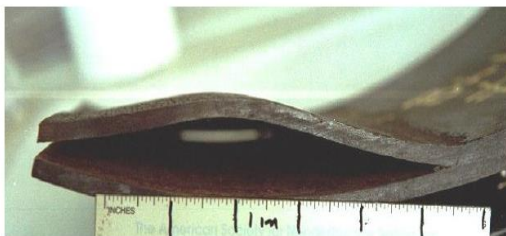


Figura 2.64 Ejemplo de delaminación (28)

C) Costuras y pliegues

Discontinuidades en los metales base fabricados por medio de operaciones que involucran deformaciones plásticas.

2.4.2.4 Discontinuidades relacionadas con los requisitos dimensionales

Las uniones soldadas, generalmente deben de cumplir con el tamaño, forma, acabado y otras características dimensionales específicas. Los requisitos que deben satisfacer estas características y las tolerancias correspondientes están especificados en los dibujos, contratos y normas aplicables.

Las uniones soldadas que no cumplen con las especificaciones deben ser corregidas antes de su aceptación final. Las discontinuidades y otros tipos de imperfecciones clasificadas dentro de esta categoría se describen brevemente a continuación:

A) Distorsión

El calor que se genera durante la soldadura por arco eléctrico, así como la solidificación del metal de soldadura provocan la expansión y contracción térmica de la unión soldada, lo que da como resultado la generación de esfuerzos internos después de que la soldadura se ha enfriado y causan algún grado de distorsión que puede llegar a ser tan severo que puede exceder las tolerancias dimensionales.

El establecimiento de la secuencia de soldadura apropiada por lo general resulta útil para balancear los esfuerzos y reducir la distorsión. Los métodos para corregir la distorsión de productos o componentes que ya se terminaron de soldar son uno o más de los siguientes:

- Operaciones de enderezado con o sin aplicación de calor
- Remover las soldaduras que causan la distorsión y volver a aplicarlas
- Adición de metal de soldadura en áreas específicas
- Aplicación de un tratamiento térmico posterior a la soldadura

En cualquiera de los casos la aplicación de los métodos anteriores dependerá de las especificaciones establecidas y de los términos estipulados en el contrato entre el cliente y fabricante (ver **Figura 2.65**).

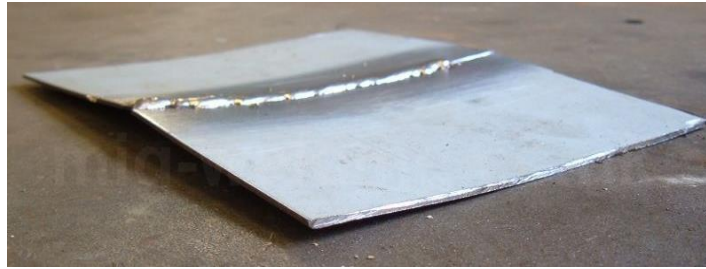


Figura 2.65 Distorsión en placas soldadas (GMAW) (28)

B) Preparación incorrecta de la junta

Para soldar satisfactoriamente cada unión se establece los diseños de una junta específicos, con la geometría y las dimensiones consistentes con el espesor y tipo de material a soldar y con los procesos de soldadura a emplear. Si la preparación de los bordes a unir no cumple con el diseño establecido, existirá alto riesgo de ocurrencia de discontinuidades en la soldadura, así como del incremento de distorsión.

Como puede apreciarse, es un factor crítico que la preparación de la junta cumpla con el diseño establecido en dibujos y procedimientos, y una de las responsabilidades clave del inspector es asegurar tal cumplimiento.

C) Tamaño incorrecto de la soldadura

Los dibujos detallados, los símbolos de soldadura y las normas referidas en los contratos especifican el tamaño que debe tener toda soldadura, y cada norma establece tolerancias permitidas.

Las soldaduras que no tienen el tamaño correcto, particularmente si resultan de tamaño menor al especificado (aunque algunas normas, sobre todo las europeas, tampoco permiten soldaduras de tamaño menor al especificado), se consideran defectuosas y deben ser detectadas y corregidas. Su detección se realiza por medio de su inspección visual y con calibradores de soldadura, y es una de las funciones del inspector realizar tal detención.

D) Perfil incorrecto de la soldadura

El perfil o contorno de las soldaduras ya terminadas influye en el comportamiento durante servicio de las partes soldadas, ya que las cargas involucradas pueden provocar efectos de concentración de esfuerzos en condiciones tales como soldaduras con convexidad o refuerzo excesivos. En soldaduras de pasos múltiples, el perfil inadecuado de un cordón incrementa el riesgo de ocurrencia de discontinuidades, tales como fusión incompleta, grietas e inclusiones de escoria, al aplicar los pasos subsecuentes.

Los criterios de aceptación relacionados con los perfiles de soldadura también están incluidos en las diferentes normas, y la falta de cumplimiento con respecto a estos criterios constituye defectos de soldadura, mismo que deben ser identificados, rechazados y reportados por el inspector de soldadura a fin de que el fabricante o el contratista procedan a su corrección. Las principales discontinuidades e imperfecciones de esta categoría son: los traslapes, soldaduras cóncavas y convexidad y refuerzos de soldadura excesivos. Por lo general, este tipo de discontinuidades involucran condiciones que pueden alterar el comportamiento previsto durante el servicio de las partes soldadas y poner en riesgo la seguridad del proceso en general.

E) Productos terminados con dimensiones incorrectas

Las normas sobre estructuras, equipos y partes soldadas, y en algunos casos, los dibujos y especificaciones de ingeniería, también establecen los requisitos dimensionales, y las tolerancias aplicables con los que deben cumplir los bienes fabricados.

El incumplimiento de estos requisitos es motivo de rechazo de los productos involucrados, ya que se ve afectada su utilidad y su comportamiento durante el servicio; el inspector de soldadura también tiene, entre sus funciones, la de asegurar la conformidad con respecto a este tipo de características (32; 33; 29).

En la **Tabla 2.18** se da una relación de las discontinuidades comúnmente encontradas en soldaduras depositadas con diferentes procesos.

Tabla 2.18 Discontinuidades en soldaduras depositadas con diferentes procesos (34)

Proceso de soldadura	Tipo de discontinuidad						
	Porosidad	Escoria	Fusión incompleta	Penetración incompleta	Socavado	Traslape	Grieta
Por Arco							
SW			X		X		X
PAW	X		X	X			X
SAW	X	X	X	X	X	X	X
GTAW	X		X	X			X
GMAW	X	X	X	X	X	X	X
FCAW	X	X	X	X	X	X	X
SMAW	X	X	X	X	X	X	X
CAW	X	X	X	X	X	X	X
Por Resistencia							
RSW			X				X
RSEW			X				X
PW			X				X
FW			X				X
UW			X				X
Con Gas Combustible y O₂							
OAW	X		X	X	X	X	X
OHW	X		X	X			X
PGW	X		X				X
En Estado Solido							
CW			X				X
DFW			X				X
EXW			X				
FOW			X				
FRW			X				
USW			X				
Otros							
EBW	X		X	X			X
ESW	X	X	X	X	X	X	X
IW			X				X
LBW	X		X				X
PEW			X				
TW	X	X	X				X

Nota. Traducción de la tabla 2 de la norma ANSI/AWS B1.10-86R

2.4.3 Control de la calidad del proceso GMAW

Los procedimientos de control de calidad para las uniones de GMAW son muy similares a los que se usan para otros procesos. De acuerdo con las especificaciones aplicables, los procedimientos de inspección deberán servir para determinar si es apropiado el desempeño del soldador o del operador, para calificar un procedimiento de soldadura satisfactorio y para realizar un examen completo del producto final soldado.

La inspección de la soldadura del producto terminado se limita a los métodos de exámenes no destructivos como la inspección visual, líquidos penetrantes, partículas magnéticas, radiografía y ultrasonido.

Las pruebas destructivas (de tensión, corte, fatiga, impacto, flexión, fractura, pelado, sección transversal o dureza) por lo regular se limitan al desarrollo de ingeniería, la calificación de procedimientos de soldadura y la calificación del rendimiento de los soldadores y operadores (23).

2.4.3.1 Posibles problemas en el proceso

Pérdida de ductilidad causada por hidrógeno. Este tipo de problema es causado por la presencia de hidrógeno en el charco de soldadura, si bien no es muy probable que esto suceda en este tipo de procesos (GMAW), ya que no se usan fundentes o recubrimientos higroscópicos. Sin embargo, es recomendable tener en cuenta causas de aparición de hidrógeno.

Por ejemplo, la humedad en del gas protector debe ser lo suficientemente bajo (ver **Tabla 2.13**). El aceite, la grasa y los compuestos protectores presentes en el electrodo o el metal base pueden llegar a desarrollarse como fuentes potenciales de absorción de hidrógeno en el charco de soldadura.

Los fabricantes de electrodos están conscientes de la importancia que es la limpieza y generalmente se preocupan mucho por suministrar un electrodo limpio y libre de cualquier remanente del proceso de fabricación.

Contaminación con oxígeno y nitrógeno. El oxígeno y el nitrógeno pueden representar problemas más graves que el hidrógeno en el proceso GMAW (23). Si el gas de protección no es totalmente inerte o la protección es parcial, estos elementos pueden ser absorbidos de la atmósfera.

Los óxidos como los nitruros pueden reducir la tenacidad de la unión soldada, por lo cual el metal depositado por GMAW presenta menor tenacidad en comparación con otros procesos como el GTAW. Sin embargo, cabe señalar que es posible añadir al gas protector oxígeno en proporciones de hasta el 5 % o más sin afectar adversamente la calidad de la soldadura (ver **Tabla 2.15** y **Tabla 2.16**).

Limpieza. La limpieza del metal base cuando se emplea GMAW es más crítica en comparación con otros procesos, de ahí la importancia de limpiar minuciosamente el área de soldadura antes de soldar y entre cada pasada; en este caso es preciso aplicar procedimientos minuciosos de limpieza química (solventes, lavado, electroquímicos, etc.) o eliminación mecánica de los óxidos metálicos (ultrasonido, pulido, etc.).

Fusión incompleta. El modo de transferencia por cortocircuito en GMAW proporciona un menor aporte de calor que da como resultado poca penetración en el metal base. Esto es deseable en materiales de espesor delgado y al soldar fuera de posición, pero si la técnica de soldadura no es la apropiada, el resultado puede ser una fusión incompleta, sobre todo en el área de la raíz o a lo largo de las caras del cordón.

2.4.3.2 Discontinuidades en el proceso GMAW

Al igual que la mayoría de los procesos de soldadura, en el proceso GMAW la aparición de discontinuidades es un problema recurrente en la calidad de dicho proceso.

En la **Tabla 2.19** y la **Tabla 2.20** se presentan las discontinuidades que aparecen en este proceso de soldadura (23).

Tabla 2.19 Principales discontinuidades en el proceso GMAW (23)

Discontinuidad	Posible causa	Acciones correctivas
Socavado	Velocidad de desplazamiento excesiva	Reducir la velocidad de desplazamiento
	Voltaje de soldadura demasiado alto	Reducir el voltaje
	Corriente de soldadura excesiva	Reducir la velocidad de alimentación del alambre
	Insuficiente permanencia	Prolongar la permanencia en el borde del charco de soldadura.
	Ángulo de la pistola	Cambiar el ángulo para que la fuerza del arco ayude a colocar el metal
Porosidad	Cobertura de gas protector insuficiente	Optimizar el flujo de gas. Aumentar el flujo hasta desplazar todo el aire de la zona de soldadura. Reducir el flujo excesivo para evitar la turbulencia y el encapsulamiento de aire en la zona de soldadura. Eliminar fugas de las líneas de gas. Eliminar corrientes de aire (ventiladores, extractores, puertas abiertas, etc.) que incidan sobre el arco de soldadura. Restaurar por medio de calentadores los reguladores congelados (tapados) cuando se suelda con CO ₂ . Reducir la distancia de la boquilla a la pieza de trabajo. Detener la pistola al final de la soldadura hasta que se solidifique el metal fundido
	Contaminación por gas	Usar gas protector gado soldadura
	Contaminación del electrodo	Usar solo electrodo limpios y secos
	Contaminación de la pieza de trabajo	Quitar de la superficie de trabajo toda la grasa, aceite, humedad, óxido, pintura y suciedad antes de soldar
	Excesivo voltaje de arco	Usar un electrodo más desoxidante Reducir voltaje
	Tubo de contacto demasiado alejado	Reducir extensión
Fusión incompleta	Las superficies de la zona de soldadura no están libres de películas de aceite o de exceso de óxido. Insuficiente aporte de calor.	Limpiar todas las caras de los surcos y las superficies de la zona de soldadura, eliminando todas las impurezas de forja antes de soldar. Aumentar la velocidad de alimentación del alambre y el voltaje del arco. Reducir la extensión del electrodo. Minimizar el zigzaguo excesivo a fin de producir un charco más controlable. Aumentar la velocidad de recorrido
	Técnica de soldadura inadecuada	Si se usa una técnica de zigzaguo, permanecer momentáneamente en las paredes del surco. Mejorar el acceso a la raíz de las uniones. Mantener el electrodo dirigido hacia el borde delantero del charco. Usar un ángulo de surco suficiente para permitir el acceso al fondo del surco y a las paredes con la extensión del electrodo correcta, o usar un surco en "J" o en "U".
	Velocidad de recorrido excesiva	Reducir la velocidad de recorrido

Tabla 2.20 Continuación (23)

Discontinuidad	Posible causa	Acciones correctivas
Penetración incompleta en la unión	Preparación incorrecta de la unión	El diseño de la unión debe proveer acceso apropiado al fondo del surco y al mismo tiempo mantener la extensión del electrodo correcta. Reducir la cada de raíz en caso de que sea excesivamente grande. Aumentar la separación en la raíz en uniones a tope y aumentar la profundidad del bisel trasero.
	Técnica de soldadura incorrecta	Mantener el ángulo del electrodo norma a la superficie de trabajo a fin de lograr penetración máxima. Mantener el arco en el borde delantero del charco.
	Corriente de soldadura insuficiente	Aumentar la velocidad de alimentación del alambre (corriente de soldadura)
Excesiva perforación por fusión	Excesivo aporte de calor	Reducir la velocidad de alimentación del alambre (corriente de soldadura) y el voltaje. Aumentar la velocidad de desplazamiento
	Preparación incorrecta de las uniones	Reducir la apertura de raíz. Aumentar la dimensión de la cara de la raíz
Fracturas en el metal de soldadura	Diseño incorrecto de las uniones	Mantener las dimensiones del surco correctas para que sea posible depositar suficiente metal de aporte y sobreponerse a condiciones de restricción.
	Razón profundidad/anchura de la soldadura demasiado alta	Aumentar el voltaje o reducir la corriente, o ambas cosas, a fin de ensanchar la franja de soldadura o reducir la penetración.
	Franja de soldadura demasiado pequeña (sobre todo en franjas de filete y de raíz).	Reducir la velocidad de desplazamiento para aumentar el área seccional del depósito.
	Excesivo aporte de calor, que causa demasiado encogimiento y distorsión	Reducir la corriente o el voltaje, o ambas cosas. Aumentar la velocidad de desplazamiento.
	Fragilidad en caliente	Usar electro con mayor contenido de manganeso (usar arco más corto para minimizar la pérdida de manganeso en el arco). Ajustar el ángulo del surco para que pueda añadirse suficiente metal de aporte. Ajustar la secuencia de pasos para reducir la restricción sobre la soldadura durante el enfriamiento. Cambiar a otro metal de aporte que confiera las características deseadas.
	Fuerte restricción de los miembros de la unión	Usar precalentamiento para reducir la magnitud de los esfuerzos residuales. Ajustar la secuencia de soldadura a fin de reducir las condiciones de restricción
	Enfriamiento rápido en el cráter del extremo de la unión	Eliminar los cráteres con la técnica de paso hacia atrás
Fracturas en la zona afectada por el calor	Endurecimiento en la ZAC	Precalentar para hacer más lenta la tasa de enfriamiento
	Excesivos esfuerzos residuales	Utilizar tratamiento dérmico para liberar tensiones.
	Pérdida de ductilidad por hidrógeno	Usar electrodos limpios y gas protector seco. Eliminar contaminantes del metal base. Mantener la soldadura a temperaturas elevadas durante varias horas antes de enfriar (la temperatura y el tiempo necesarios para eliminar el hidrógeno varían dependiendo del tipo de metal base).

2.4.3.3 Localización de problemas

La localización de problemas en cualquier proceso requiere un conocimiento exhaustivo del equipo y de la función de los diversos componentes, de los materiales que intervienen y del proceso mismo. En el caso de la soldadura por arco de metal y gas ésta es una tarea más complicada que en el de otros procesos, en virtud de la complejidad del equipo, el número de variables y las interrelaciones de dichas variables.

Por conveniencia, los problemas pueden clasificarse de acuerdo con estas tres categorías: eléctricos, mecánicos y de proceso. Los problemas de este último tipo se cubrieron en la sección 2.4.2 de este capítulo. Las **Tabla 2.21** a **Tabla 2.23** señalan algunos de los problemas que pueden presentarse e indican cuáles podrían ser sus causas y posibles remedios (23).

Tabla 2.21 Localización de problemas de proceso que pueden presentarse en GMAW (23)

Problema	Posible causa	Remedio
Arco inestable	Área de soldadura sucia	Limpiar para eliminar inclusiones, óxido, etc.
	Angulo de pistola incorrecto	Usar ángulo de ataque o arrastre de unos 15°
Depósito de soldadura muy oxidado	Distancia boquilla-trabajo excesiva	Reducir. Debe estar entre 13 y 19 mm (1/2 y 1/4 in)
	Corrientes de aire	Proteger de las corrientes el área de soldadura
	Tubo de contacto no centrado en la boquilla de gas	Centrar el tubo de contacto
Porosidad en la franja de soldadura	Material base sucio	Limpiar para eliminar incrustaciones, óxido, etc.
	Velocidad de alimentación del alambre excesiva	Reducir
	Humedad en el gas protector	Cambiar cilindro de gas
	Electrodo contaminado	Mantener protegido el alambre durante el uso. Limpiar el alambre antes de que entre en el alimentador.
El alambre del electrodo se embota en la pieza de trabajo	Velocidad de alimentación de alambre excesiva	Reducir la velocidad
	Voltaje de arco demasiado bajo	Aumentar el voltaje
	Se fijó una pendiente excesiva en la fuente de potencia (para transferencia en corto circuito)	Restablecer para reducir la pendiente
Exceso de salpicaduras	Voltaje de arco excesivo	Reducir el voltaje
	Se fijó una pendiente insuficiente en la fuente de potencia (para transferencia en cortocircuito)	Ajustar hacia arriba la pendiente
	Tubo de contacto demasiado retraído en la boquilla	Ajustar o cambiar por uno más largo
	Tasa de flujo de gas excesiva	Reducir el flujo

Tabla 2.22 Localización de problemas mecánicos que pueden presentarse en GMAW (23)

Problema	Posible causa	Remedio
Alimentación irregular del alambre	Insuficiente presión en los rodillo impulsores	Ajustar
	Tubo de contacto tapado o desgastado	Limpiar o reemplazar
	Alambre de electrodo con dobleces	Recortar, cambiar de carrete
	Cable de la pistola enrollado	Enderezar cables, colgar el alimentador de alambre
	Forro del conducto sucio o desgastado	Limpiar o reemplazar
	Conducto demasiado largo	Acortar o usar un sistema de impulso de empuje-tracción
El alambre de electrodo se enrolla en el rodillo impulsor	Excesiva presión de los rodillo de alimentación	Ajustar
	Forro del contacto o punta de contacto incorrectos	Usar forro y punta de contacto del tamaño correspondiente al electrodo
	Rodillos impulsores o guías de alambre mal alineados	Revisar y alinear debidamente
	Restricción de la pistola o en su cable	Quitar la restricción
Depósito de soldadura muy oxidado	Fugas de aire o agua en la pistola y los cables	Comprobar que no haya fugas y reparar o reemplazar si es necesario
	Flujo de gas protector restringido	Revisar y limpiar la boquilla
El alambre de electrodo deja de avanzar durante la soldadura	Presión de rodillos impulsores excesiva o insuficiente	Ajustar
	Rodillos impulsores del alambre mal alineados o desgastados	Alinear y/o reemplazar
El alambre avanza pero no fluye gas	Forro o tubo de contacto tapado	Limpiar o reemplazar
	El cilindro de gas está vacío	Reemplazar y purgar las líneas antes de soldar
	La válvula del cilindro de gas está cerrada	Abrir válvulas del cilindro
	El medidor de flujo no está ajustado	Ajustar hasta obtener el flujo especificado en el procedimiento
	Restricción en la línea de gas o en la boquilla	Revisar y limpiar
Porosidad en la franja de soldadura	Falla en el solenoide de una válvula de gas	Reparar o reemplaza
	Válvula del cilindro de gas cerrada	Abrir la válvula
	Insuficiente flujo de gas protector	Comprobar que no haya restricciones en la línea de gas en la boquilla; corregir
	Fugas en las líneas de suministro del gas (incluida la pistola)	Comprobar que no haya fugas (sobre todo en las conexiones); corregir
El motor alimentador del alambre funciona pero el alambre no avanza	Insuficiente presión en los rodillos impulsores	Ajustar
	Rodillos alimentadores de alambre incorrectos	Usar rodillos impulsores diseñados para el tamaño de alambre empleado
	Presión excesiva sobre el freno del carrete de alambre	Reducir la presión del freno
	Restricción en el forro del conducto o en la pistola	Revisar el forro y la punta de contacto Limpiar y/o reemplazar
La pistola de soldadura se sobrecalienta	Forro o tubo de contacto incorrecto	Revisar y reemplazar con componentes del tamaño correcto
	Línea de refrigerante estrangulada o tapada	Revisar y corregir
	Nivel de refrigerante bajo en el depósito de la bomba	Revisar y agregar refrigerante si es necesario
	La bomba de agua no funciona correctamente	Revisar y reparar o reemplazar

Tabla 2.23 Localización de problemas eléctricos presentes en el proceso GMAW (23)

Problema	Posible causa	Remedio
Las pistola de soldadura se sobrecaliente	Amperaje demasiado alto para la pistola	Reducir el amperaje o cambiar a pistola de mayor capacidad
Dificultad para iniciar el arco	Polaridad equivocada	Verificar la polaridad e invertir las terminales si es necesario.
	Mala conexión con la pieza de trabajo	Fijar bien la conexión del cable de trabajo
Alimentación del alambre irregular	Fluctuaciones en el circuito de potencia	Verificar el voltaje de línea
	Polaridad equivocada	Comprobar la polaridad e invertir las terminales si es necesario
Sobrecalentamiento de los cables	Cables demasiado delgados o largos	Verificar los requerimientos de transporte de corriente, cambiar o acortar si es necesario
Falta de control sobre la velocidad de alimentación del alambre	Conexiones de cables flojas	Apretar
Arco inestable	Alambres rotos o flojos en el circuito de control	Revisar y reparar si es necesario
	Tarjeta de circuitos impresos defectuosa en el gobernador	Cambiar tarjeta de circuitos impresos
	Conexiones de cables flojos	Apretar conexiones
	Fusible quemado en el circuito de control	Cambiar fusible
Falta de alimentación del electrodo	Fusible quemado en la fuente de potencia	Cambiar fusible
	Interruptor de gatillo de la pistola defectuoso o terminales rotas	Verificar conexiones, cambiar interruptor
	Motor impulsor quemado	Revisar y cambiar
El alambre avanza pero no fluye gas	Falla del solenoide de una válvula de gas	
	Conexión deficiente con la pieza de trabajo	Apretar si esta suelta; limpiar la pieza de trabajo de aceite, oxido, etc.
El alambre avanza pero no recibe corriente (no hay arco)	Conexiones de cable flojas	Apretar
	Bobina o platinos del conductor primario defectuoso	Revisar o cambiar
	Terminales del control del contacto rotas	Revisar o cambiar
Porosidad en la soldadura	Alambres al solenoide de una válvula de gas rotos o flojos	Revisar o cambiar

2.4.4 Procesos de simulación y control de la calidad

Los procesos de unión y soldadura son esenciales para el desarrollo de prácticamente todos los procesos de fabricación industrial. Sin embargo, estos procesos a menudo suelen tener un mayor costo que el producto en sí, además de aumentar las dificultades de producción que se esperarían con este tipo de procesos.

Existen una serie de razones por la cual estas dificultades se presentan en los procesos de manufactura convencionales:

- La soldadura y la unión son procesos multifacéticos, tanto en términos de las variaciones del proceso, como en las disciplinas necesarias para resolver el problema
- Diseño inadecuado de las juntas tienen como resultado el rechazo de piezas debido a la concentración de esfuerzos en los puntos más altos del ensamble y son, por lo tanto, las partes más débiles del componente
- Dificultad al momento de realizar la unión (35)

Debido a que hay muchos procesos de soldadura por fusión, una de las mayores dificultades para el ingeniero de fabricación es determinar qué proceso producirá propiedades aceptables al menor costo. Cualquier cambio en la geometría, el material, el valor del producto final, o el tamaño de la línea de producción, así como la posibilidad de unirse a algún equipo, son factores que puede influir en la elección del método de unión. Para pequeños lotes de piezas complejas, la fijación puede ser preferible a la soldadura, mientras que para largas series de producción, las soldaduras pueden ser una alternativa de mayor dureza y menor costo (35).

El control de la calidad en este tipo de procesos es uno de los requisitos obligatorios que debe cumplir cualquier tipo de soldadura. Dentro de estos procesos, se generan fenómenos de transporte que tienen impacto en la calidad de uniones soldadas por procesos de fusión.

Transporte de flujo de fluido en el charco de soldadura. La fusión del material de aporte y el metal base en el charco de soldadura es considerado un fenómeno dinámico. El líquido en el charco de soldadura está sujeto a la acción de diversas fuerzas externas e internas, las cuales dan como resultado el movimiento del fluido a alta velocidad. El flujo del fluido es importante dado que

afecta la forma de la soldadura y se relaciona con la formación de una gran variedad de defectos en la soldadura.

El líquido en movimiento transporta el calor y, a menudo domina el transporte de calor en el charco de soldadura. Dado que el transporte de calor por el flujo de masa depende de la dirección y la velocidad del movimiento del fluido, la forma del charco se puede diferir drásticamente de la predicha por el perfil de flujo de calor por conducción. Los gradientes de temperatura también se ven afectados por el flujo del fluido, dando como resultado un cambio en la microestructura de la soldadura.

Transporte de masa en el arco. El movimiento de gas a alta velocidad se produce en y alrededor del arco durante la soldadura. El movimiento del gas es debido en parte al flujo de gas, pero, más importante aún, al impulso de fuerzas electromagnéticas asociadas con el propio arco. En soldaduras metálicas con arco y gas (GMA por sus siglas en inglés), el depósito de metal líquido se transfiere a través del arco desde el electrodo a la pieza de trabajo. Tanto el modo y la velocidad de transferencia de metal tienen efectos importantes en la forma del charco de soldadura. El transporte masivo en y alrededor del arco es importante en la soldadura GMA (GMAW); una descripción detallada de este fenómeno se presentó en la sección 2.3.5.

Soldadura de arco con protección de gas. El flujo del fluido sin duda se produce en los charcos de soldadura GMAW, pero los estudios sobre los detalles de su naturaleza y efectos son muy limitados. En el modo de transferencia por aspersión, el impacto de la corriente de las pequeñas gotas desde el electrodo en el baño de soldadura forma una sustancial depresión o cráter. Este es el mecanismo responsable de la penetración de tipo dedo típica observada con argón como gas de protección. Por lo tanto, la penetración depende principalmente en el impulso de la corriente de pequeñas gotas. La relación del perfil de penetración y el impulso de la corriente de las gotas se puede observar en la **Figura 2.66** como una excelente correlación de ambas variables.

Debido a la fuerza impulsora las gotas en dirección de la soldadura, la viscosidad cinemática del gas de protección se ve directamente afectada. Por ejemplo, el argón tiene una viscosidad cinemática sustancialmente mayor que el helio, por lo tanto, el argón conduce la corriente del metal depositado más eficazmente, lo que resulta en una penetración más profunda que los procesos que utilizan helio **Figura 2.23**.

La fuerza del arco o penetración también puede ser alterada por el cambio de la presión atmosférica (36). Otra manera de modificar la profundidad de penetración es difundir la corriente de las gotas sobre la superficie de la soldadura. Esto se puede lograr mediante la aplicación de un campo magnético transversal variable (37).

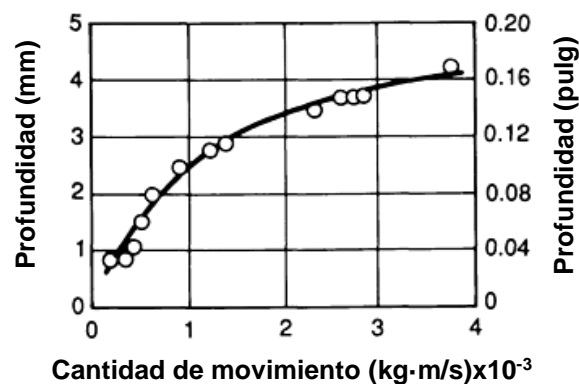


Figura 2.66 Representación gráfica de los perfiles de penetración/momento (35)

Transferencia de calor en soldadura. Durante la soldadura por fusión, los ciclos térmicos producidos por la fuente de calor en movimiento causan cambios en el estado físico, en la metalurgia de las transformaciones de fase y la resistencia térmica debida al movimiento transitorio del metal. Al terminar el ciclo de soldadura, el producto acabado puede contener discontinuidades físicas causadas por la rápida solidificación, o la aparición de microestructuras adversas que se deben a un enfriamiento inadecuado, o al esfuerzo residual y la distorsión de la zona soldada.

No se puede depender solo del control de la calidad (ED, END, WPS, etc.), que en la mayoría de los casos es utilizado como un sistema de contención sin llevar acabo el aseguramiento de la calidad de todo el proceso. Este hecho puede ser consecuencia de la gran demanda y los altos flujos de producción en los sistemas operativos de manufactura del sector industrial, en el cual es imposible en la mayoría de los casos realizar una inspección al 100% de toda la producción.

Es por ello que en la actualidad se desarrollan sistemas de optimización para cubrir estos dos requisitos. Las simulaciones han probado ser una herramienta muy útil al momento de tomar decisiones sobre el proceso de producción. Estas simulaciones están basadas en una serie de consideraciones entre las que podemos destacar: composición química, propiedades físicas, microestructura, materia prima, consumibles, equipo, etc. En este sentido, se puede analizar el modelo integral unificado (UIM por sus siglas en inglés) desarrollado para para simular los fenómenos de transporte que se producen durante el proceso de GMAW.

En el estudio se tomaron en cuenta diferentes variables como acoplamiento interactivo entre el plasma de arco y la fusión del electrodo, la formación de gotas, el modo de transferencia y el choque sobre la pieza; y la dinámica del charco de soldadura. La modelación matemática de los perfiles de temperatura y material depositado puede ser expresada en términos de los gradientes de temperatura y la composición del charco de soldadura. Los balances de cantidad de movimiento, continuidad y transferencia de calor fueron empleados para determinar los perfiles de distribución de temperatura, de velocidad y el potencial eléctrico del material depositado en el charco de soldadura.

$$\nabla(\lambda\nabla\theta) + \rho C_p v \frac{\partial\theta}{\partial w} + \dot{Q} = \rho C_p v \frac{\partial\theta}{\partial t} \quad \text{Ec. 2.5.1}$$

Las variables específicas utilizadas en la modelación de proceso GMAW, se mencionan en la **Tabla 2.24**, las cuales fueron definidas mediante la simulación por elementos finitos del charco de soldadura.

Tabla 2.24 Condiciones de soldadura (38)

Nomenclatura	Unidades
Gas de protección	Argón
Flujo volumétrico del gas de protección	23 (L min ⁻¹)
Diámetro de la tobera	19.1
Corriente de soldadura	220 (A)
Diámetro del electrodo	1.6 (mm)
Distancia de contacto	25.4 (mm)
Longitud de arco inicial	8.0 (mm)
Espesor de la pieza	5.0 (mm)
Diámetro de la pieza	30.0 (mm)
Velocidad de alimentación del electrodo	4.5 (cm s ⁻¹)
Tiempo de arco	1 (s)

En la **Figura 2.67**, se muestran los perfiles obtenidos para un tiempo de 100 segundos de tiempo de arco.

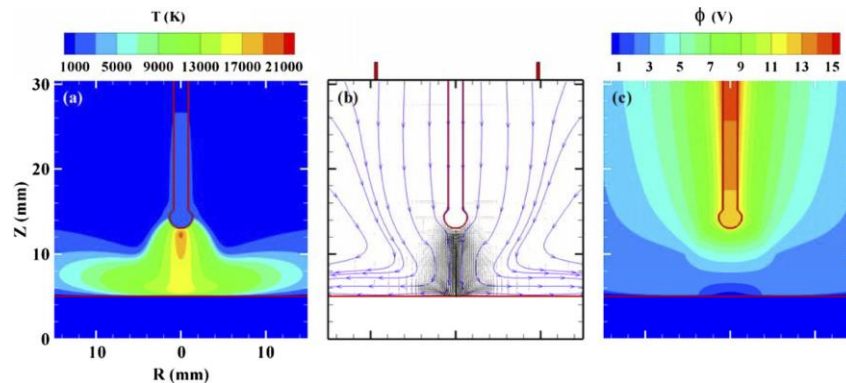


Figura 2.67 La temperatura, la velocidad del plasma de arco y las distribuciones de potenciales eléctricos en $t = 100$ ms. (a) distribución de la temperatura; (b) distribución de la velocidad; (c) la distribución de potencial eléctrico (38)

En el estudio, se encontró que la transferencia por aspersion y la superficie del charco de soldadura tienen efectos significativos en las distribuciones de los perfiles transitorios de densidad de corriente, la temperatura y la presión de arco del arco, que normalmente presentan un perfil uniforme constante.

Como se puede observar las herramientas de simulación, son útiles para la predicción del comportamiento del charco de soldadura, geometría, perfil de profundidad, etc. El uso de la modelación matemática para la interpretación numérica de los procesos de soldadura ha sido la pieza angular para disminuir las fallas y optimizar los procesos de inspección de calidad de la actualidad.

2.5 Hermeticidad y detección de fugas

La palabra fuga aparece en el ramo de recipientes herméticos y no solo tiene que ver con la tecnología de vacío, también este término es usado por los ingenieros que trabajan con presiones elevadas. Una fuga implica una fisura, perforación o porosidad en la pared de la envolvente que contiene o separa diferentes líquidos o gases permitiendo el escape de un medio cerrado.

La función básica de la detección de fugas es la localización y medición de la fuga en productos o sistemas sellados. En la mayoría de los casos, una prueba de fugas es un paso en el control de calidad para asegurar la integridad de un sistema y es usualmente una prueba no destructiva.

Algunos productos típicos en los cuales es necesario realizar una detección de fugas son: cámaras de vacío, televisores, tubos de rayos catódicos, componentes electrónicos sellados herméticamente, recipientes a presión, recipientes con aerosoles, recipientes con aislamiento al vacío, bombas, sistemas de refrigeración, plantas de químicos o nucleares, latas de bebidas, productos que incluyen fuelles metálicos, microscopios electrónicos, marca pasos etc.

A pesar de que con las tecnologías modernas es prácticamente imposible fabricar envoltentes selladas o un sistema que garantice ser a prueba de fugas sin que sean probados. La pregunta clave es: ¿Cuál es la fuga máxima aceptable para obtener un rendimiento y vida del producto aceptable?

Para responder esta y otro tipo de preguntas existen diversas metodologías para el empleo y selección de la mejor combinación de pruebas para la detección de fugas que existen en la actualidad. Los métodos para la detección de fugas se encuentran directamente relacionados con la sensibilidad o tolerancia que será permitida dentro de las especificaciones de diseño del producto o los requerimientos que se tengan con el cliente.

2.5.1 Fundamentos de detección y pruebas de fugas

La prueba de fugas es la rama de los ensayos no destructivos que se refiere a la fuga o entrada de líquidos o gases presurizados en componentes evacuados o sistemas destinados a mantener estos líquidos.

Las fugas de fluidos (líquidos o gases) pueden penetrar desde el interior de un componente o hacia el exterior, o viceversa, como resultado de un gradiente de presión entre las dos regiones o como resultado de la permeación a través de una barrera poco extendida. Las pruebas de fugas abarcan procedimientos para uno o una combinación de los siguientes casos:

- Localización (detección y localización de fugas)
- Determinación de la tasa de fugas de un escape o de un sistema
- Monitoreo de fugas

El uso de las pruebas de fugas en sistemas productivos ha ido en aumento debido a la importancia por el creciente valor de los estándares de calidad, y las garantías en productos manufacturados, además del constante aumento en la sensibilidad de los componentes y sistemas hacia los contaminantes externos.

2.5.1.1 Objetivo de la detección de fugas

Al igual que otras formas de ensayos no destructivos, las pruebas de fugas tienen un gran impacto en la seguridad y el rendimiento de un producto. Además de disminuir los costos al reducir el número de productos reelaborados, reparaciones en garantía, y las reclamaciones de responsabilidad.

Las razones más comunes para la realización de una prueba de fugas son:

- Para evitar la pérdida de materiales costosos o de energía
- Para evitar la contaminación del medio ambiente
- Para asegurar que es un componente o sistema fiable

Terminología. Los siguientes términos deben entenderse en sus definiciones estrictas en el campo de pruebas de fugas:

- **Fuga.** Una discontinuidad real a través de la pared o paso por el cual fluye un fluido; una fuga es simplemente un tipo especial de defecto
- **Filtración.** El líquido que ha fluido a través de una fuga
- **Tasa de fugas.** La cantidad de fluido que pasa a través de la fuga por unidad de tiempo bajo condiciones específicas; adecuadamente expresada en unidades de volumen o masa por unidad de tiempo
- **Fuga mínima detectable.** El agujero más pequeño o paso discreto que puede ser detectado
- **Tasa de fuga mínima detectable.** La tasa de flujo de fluido detectable más pequeño

2.5.1.2 Tipos de fugas

Una fuga real. Es esencialmente una fuga localizada, es decir, un pasaje discreto a través del cual puede fluir un fluido (comúnmente, un agujero). Una fuga de este tipo puede tomar la forma de un tubo, una grieta, un orificio, o similares. Al igual que otros defectos, todas las fugas son diferentes.

Las fugas tienden a crecer con el tiempo, y a funcionar de manera distinta en diferentes condiciones de presión y temperatura. El sistema también puede sufrir pérdidas de presión debido a la permeación de una barrera poco extendida; a este tipo de fugas reales se denomina fugas distribuidas.

Un gas puede fluir a través de un sólido que no tenga agujeros lo suficientemente grandes para permitir que más de una pequeña fracción del gas fluya a través de cualquier agujero. Este proceso implica la difusión a través del sólido y también puede implicar varios fenómenos superficiales, como la absorción, la disociación, la migración, y desorción de moléculas de gas (39).

Fugas virtuales. Implican la desorción gradual de los gases de superficies o escape de gases a partir de componentes casi cerrados dentro de un sistema al vacío. No es raro que un sistema al vacío pueda tener ambos tipos fugas al mismo tiempo (39).

2.5.1.3 Tipos de flujo en fugas

Los tipos de flujo en fugas incluyen fenómenos como la permeación, el flujo molecular, el flujo de transición, el flujo viscoso, flujo laminar, flujo turbulento, y el flujo ahogado o estrangulado. El tipo de flujo correspondiente a una instancia específica de la fuga, la cual es una función del diferencial de presión, tipo de gas, tamaño y forma de la fuga.

Algunos de estos tipos de flujo también se producen en lugares tales como conexiones de las tuberías.

Permeación. Es el paso de un fluido a través y fuera de una barrera sólida que no tiene agujeros suficientemente grandes como para permitir que más una pequeña fracción de la fuga total pueda pasar a través de cualquier agujero. Este proceso implica la difusión a través de una barrera sólida y puede involucrar a otros fenómenos, como la absorción, disociación, la migración, y desorción.

Flujo molecular. Se produce cuando el recorrido libre medio del gas es mayor que la dimensión de la sección transversal más larga de las fugas. El recorrido libre medio es la distancia media que una molécula viajará antes de chocar con otra molécula. Es una función lineal inversa de la presión. En el flujo molecular, la fuga (flujo) es proporcional a la diferencia en las presiones. El flujo molecular es un fenómeno frecuente en las pruebas de vacío.

Flujo de Transición. Se produce cuando el recorrido libre medio del gas es aproximadamente igual a la dimensión de la sección transversal de la fuga. Las condiciones de flujo de transición están entre los de flujo laminar y molecular.

Flujo viscoso. Se produce cuando el recorrido libre medio del gas es menor que la dimensión de la sección transversal de la fuga. En flujo viscoso, la fuga (flujo) es proporcional a la diferencia de los cuadrados de las presiones. El flujo viscoso se produce en sistemas de alta presión tales como las que se encuentran en aplicaciones de sondeo con detectores. Éste tipo de flujo se encuentra por encima de un valor crítico del número de la Reynolds, NRe (alrededor de 2100 para el flujo circular de la tubería), el flujo se vuelve inestable, dando lugar a innumerables remolinos o vórtices.

Flujo laminar y turbulento. El flujo laminar se produce cuando la distribución de velocidad del fluido en la sección transversal del paso u orificio tiene un perfil parabólico. El flujo laminar es una de dos clases de flujo viscoso; el otro es un flujo turbulento. Las partículas en el flujo turbulento siguen caminos muy erráticos, pero las partículas en el flujo laminar siguen líneas rectas. El término flujo viscoso se utiliza a veces incorrectamente para describir el flujo laminar.

Flujo estrangulado, o flujo sónico. Se produce bajo ciertas condiciones de configuración y presión. Supongamos que existe un pasaje en la forma de un orificio o un tubo Venturi, y se supone que la presión del nivel de agua arriba se mantiene constante. Si la presión de agua abajo se disminuye gradualmente, la velocidad del fluido a través de la garganta o de orificio se incrementará hasta que alcance la velocidad del sonido. La presión del agua abajo en el momento en el que la velocidad orificio alcanza la velocidad del sonido se llama presión crítica. Si se reduce la presión en el agua por debajo de esta presión crítica, la velocidad no aumentará más lejos que la velocidad producida por el orificio, dando como resultado el aumento máximo en la tasa de flujo másica (39).

2.5.1.4 Principios de dinámica de fluidos

Las fugas generalmente caen dentro de la disciplina de la dinámica de fluidos. Sin embargo, sólo los principios elementales de dicha disciplina son útiles para ciertos tipos de sistemas. Es necesario aplicar diversas estrategias para la mayoría de las exigencias en la práctica de detección de fugas.

Los modelos matemáticos son muy útiles para probar los sistemas de gas, y la siguiente discusión se centra principalmente en este tipo de sistemas. La ecuación de estado de un gas ideal (es decir, un gas formado por partículas puntuales en las cuales los choques son perfectamente elásticos) es:

$$PV = NRT \quad \text{Ec. 2.6}$$

donde P es la presión absoluta del gas, V es el volumen del recipiente que contiene el gas, T es la temperatura absoluta del gas, N es el número de moles de gas, y R es la constante universal de los gases. La constante, R, es el mismo para todos los gases (ideal); el valor numérico de R depende del sistema de unidades en las que se miden P, V, y T. El número de moles de gas, N, es igual a la masa del gas en gramos dividido por el peso molecular en gramos del gas. Independientemente del peso molecular, 1 mol de un gas contiene siempre 6.022×10^{23} moléculas (Número de Avogadro) (39).

En la prueba de fugas, las presiones se miden en términos de la presión atmosférica. Por acuerdo internacional, la presión de la atmósfera estándar es de 1013250 dinas/cm². Esto es equivalente a la presión ejercida por un 760 mm (30 pulg) de la columna mercurio, a 0 ° C (32 ° F), bajo una aceleración normal de la gravedad de 980665 cm/s² (32.1740 ft/s²). Otra unidad de presión utiliza comúnmente, especialmente en la tecnología de vacío, es el torr, que es 1/760 de una atmósfera estándar, equivalente a 1 mm (0.04 pulg) de mercurio.

El valor numérico de la constante de los gases, R, en dos conjuntos de útiles de unidades es:

$$R = \frac{0.8205 \text{ L}\cdot\text{atm}}{\text{mol}\cdot\text{K}} = \frac{62.3 \text{ torr}\cdot\text{L}}{\text{mol}\cdot\text{K}} \quad \text{Ec. 2.7}$$

Las ecuaciones de estado, en conjunto con valores de presión, volumen y temperatura, se utilizan para determinar la cantidad total de gas en un sistema cerrado. La cantidad de gas de una composición dada se puede expresar en términos de total número de moléculas, la masa total de gas, o cualquier cantidad

proporcional a éstos. Por ejemplo, un recipiente a presión de volumen V_1 se presuriza a P_1 (mayor que la presión atmosférica) a la temperatura T_1 y se dejó reposar durante un período de tiempo. Al final de este período, la presión ha disminuido a una P_2 . Si la temperatura del sistema es constante y el gas en el recipiente no ha cambiado en volumen, la disminución de la presión debe ser el resultado de una pérdida de gas en el sistema por una fuga presente en el recipiente. Sin embargo, si la temperatura T_2 es inferior a T_1 , la disminución de la presión puede ser causada por una disminución en el volumen de gas como resultado de la refrigeración. Si la cantidad de gas no ha cambiado, se deduce de la ecuación **Ec. 2.6** que P_1 , V_1 , T_1 , V_2 y T_2 deben satisfacer la relación:

$$\frac{P_1 V_1}{T_2} = \frac{P_2 V_2}{T_2} \quad \text{Ec. 2.8}$$

Si se asume que $V_1=V_2$, la ecuación **Ec. 2.8** se reduce a:

$$\frac{P_1}{T_2} = \frac{P_2}{T_2} \quad \text{Ec. 2.9}$$

Por lo tanto, si P_2 ha disminuido en proporción a la disminución de la temperatura, el sistema determinará que no se ha filtrado una tasa detectable por el medidor de presión y termómetro utilizados para controlar el sistema. Si se sabe que la precisión y la tolerancia de estos instrumentos, tiene una tasa máxima de fuga detectable existe la posibilidad de que no se puede calcular.

Si la reducción de la presión no puede ser explicada por la reducción de la temperatura (es decir, si la **Ec. 2.9** no está satisfecha), una fuga o fugas están presentes, y la tasa de fuga se puede determinar mediante el cálculo de la pérdida en la cantidad de gas (39). Tomando en cuenta la **Ec. 2.6**, la pérdida de gas (expresado en número de moles) y donde V es constante, viene dada por:

$$\Delta N = N_2 - N_1 = \left[\frac{P_1}{T_2} - \frac{P_2}{T_2} \right] \left[\frac{V}{R} \right] \quad \text{Ec. 2.9}$$

Para la mayoría de los sistemas, el volumen del sistema se asume como constante. Sin embargo, todos los recipientes a presión se expanden, y en algunos casos el volumen aumenta; por otra parte, el volumen puede variar con la expansión o contracción térmica. Cuando muy se requiere, se deben hacer estimaciones precisas y correcciones explícitas de la tasa de fuga para estos efectos.

Una fuga puede presentar varios tipos de flujo, dependiendo del gradiente de presión, temperatura y composición del fluido. Por lo tanto, es importante identificar el tipo de flujo que existe con el fin de predecir el efecto al cambiar estas variables. Debido a que la fuga puede ser una fractura, un agujero, la permeación, o una combinación de éstos, su configuración es a menudo imposible de determinar, pero los datos generales empíricos pueden establecer el tipo de flujo para los gases (39). Si la tasa de fuga es:

- Por debajo de 10^{-6} atm·cm/s, el flujo es molecular
- 10^{-4} a 10^{-6} atm·cm/s, el flujo es de transición
- 10^{-2} a 10^{-6} atm·cm/s, el flujo es laminar
- Mayor que 10^{-2} atm·cm/s, el flujo es turbulento

Estos tipos de flujo de gas se describen con más precisión por el número de Knudsen:

$$N_K = \frac{\lambda}{d} \quad \text{Ec. 2.10}$$

donde N_K es el número de Knudsen, λ es el recorrido libre medio del gas, y d es el diámetro de la fuga. La relación entre N_K , y régimen de flujo es:

- $N_K < 0.01$ (Flujo laminar, o un régimen alto)
- $0.01 < N_K < 1.00$ (Flujo de transición)
- $N_K > 1.00$ (Flujo molecular)

2.5.2 Métodos para la detección de fugas

Los métodos de prueba de fugas pueden clasificarse de acuerdo a la presión y al tipo fluido (gas o líquido) en el sistema. En las siguientes secciones se describen los métodos de prueba de fuga de sistemas más comunes (40).

A) Prueba de burbuja en agua (Inmersión)

La prueba de burbuja de inmersión en agua, también llamada "prueba de la burbuja" o "mojado", es una técnica tradicional y relativamente primitiva para la detección de fugas. Esta prueba consiste en sumergir una parte del componente a presión, por lo general con alta presión de aire seco o nitrógeno, en un tanque de agua y observar el escape de las burbujas como se muestra en la **Figura 2.68**. Cuanto más grande y más frecuentes son las burbujas, más grande será la fuga. Es posible realizar la detección de fugas relativamente pequeñas, pero muy difícil de detectar.

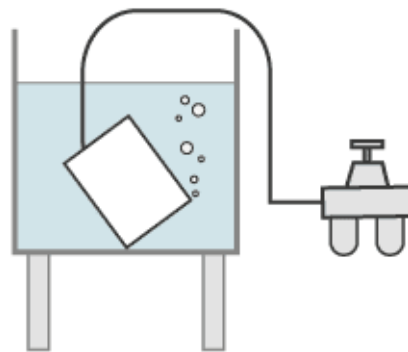


Figura 2.68 Representación gráfica de la prueba de burbuja (39)

La principal limitación de este método es la sensibilidad, la cual está relacionada con la tasa mínima fuga detectable. Teniendo en cuenta una burbuja esférica de radio R , su volumen interno V estará dado por:

$$V = \frac{4}{3}\pi R^3$$

Ec. 2.11

Sea p la presión dentro de la burbuja y t el tiempo necesario para formar la primera burbuja, la tasa de fugas \dot{Q} será:

$$\dot{Q} = pV/t \quad \text{Ec. 2.12}$$

Los dos parámetros clave que determinan la sensibilidad de este método son: el tamaño de la burbuja más pequeña detectable por el operador y el tiempo de espera para la generación de la burbuja. Este tiempo debe ser compatible con la tasa de producción y con la atención del operador. Es razonable considerar que la burbuja más pequeña que un operador podría detectar tiene 1 mm de radio y que el tiempo de espera es de 30 segundos. Suponiendo que la presión dentro de la burbuja está a presión atmosférica, se puede afirmar a partir de las ecuaciones anteriores que el volumen de la burbuja es $V = 0.0042 \text{ cm}^3$ y por lo tanto la tasa mínima fuga detectable es:

$$\dot{Q} = \frac{pV}{t} = \frac{(1000 \text{ mbar})(0.0042 \text{ cm}^3)}{30 \text{ s}} = 1 \cdot 10^{-4} \frac{\text{mbar} \cdot \text{l}}{\text{s}} \quad \text{Ec. 2.13}$$

Este es un valor teórico. La verdadera sensibilidad está fuertemente influenciada por muchos factores externos, como las condiciones de iluminación, la turbidez del agua, ubicación de la unidad y la colocación y el movimiento del agua. Todas estas cuestiones, junto con la dependencia del operador, limitan la sensibilidad útil de $5 \cdot 10^{-4} \text{ (mbar} \cdot \text{l)/s}$, hasta $1 \cdot 10^{-3} \text{ (mbar} \cdot \text{l)/s}$.

Algunas prácticas recomendadas para mejorar el uso de este método, consisten en:

- El aumento de la presión interna en incrementos, puede aumentar la probabilidad de encontrar una fuga y puede disminuir el tiempo en la localización de la fuga.
- Añadir algún detergente al agua para disminuir la tensión superficial, lo que ayuda a evitar que el gas se escape aferrándose a las paredes del componente.

- El uso de diferentes gases (por ejemplo, helio) y/o líquidos puede dar algunas ventajas en el rendimiento del sistema, pero ser una desventaja económica al aumentar el costo.
- El agua caliente en el tanque de prueba puede aumentar la presión dentro del sistema de componentes o tuberías. No es recomendable el uso de nitrógeno seco, ya que el nitrógeno no aumenta su presión de manera significativa. Por otro lado, el uso de un refrigerante el cual está contenido en el sistema o componente, puede ayudar considerablemente a aumentar la presión y, por lo tanto, aumenta la posibilidad de encontrar la fuga.

Esta técnica ofrece una precisión en la detección de fugas de $1 \cdot 10^{-3}$ (mbar·l)/s la cual es útil para una gama de aplicaciones con un alto volumen de producción y, en muchos casos, la localización de fugas es muy económica. Sin embargo, las desventajas van desde una sensibilidad relativamente baja, alta dependencia del operador y la posible contaminación por parte de los residuos del fluido y la probabilidad de tener que secar las partes después de realizar la prueba.

Por otra parte, cuando se trata de la inspección de componentes muy grandes y se requiere una manipulación excesiva del componente, poniendo partes dentro y fuera de los tanques, la complejidad del proceso aumenta y el aumento de los daños también. El costo del proceso se ve incrementado por el uso de una gran cantidad de espacio y la producción de una cierta cantidad de aguas residuales.

B) Prueba de burbuja en solución detergente

En lugar de sumergir la pieza en agua, la unidad presurizada que será inspeccionada se rocía con una solución de jabón y el operador es capaz de ver las burbujas formadas por el gas que se escapa desde el orificio donde se encuentra la fuga. Las soluciones de jabón están disponibles en diferentes presentaciones. Algunos tienen un pincel aplicador y otros tienen un *dabber* (una pelota absorbente unida a un alambre rígido en el interior de la tapa.).

Algunas marcas pueden incluso tener un aplicador de pulverización para cubrir rápidamente grandes áreas de la tubería en un corto período de tiempo. Esto es una ventaja, pero también es complicado y consume mucho tiempo de limpieza. Algunas soluciones de jabón, incluso tienen una base anticongelante para evitar que se congele en el invierno. Otros pueden tener una densidad más baja para que sean aún más sensibles a flujos de fugas muy pequeñas. Este método tiene una sensibilidad mayor que la inmersión en agua. La detección de fugas se permite hasta $1 \cdot 10^{-5}$ (mbar·l)/s y es adecuado para sistemas muy grandes.

Este método es la mejor solución cuando se conoce el área aproximada donde puede existir una fuga. En este caso, la solución de jabón se utiliza solamente en esa área específica para detectar y localizar una fuga. Es el método más simple menos costoso y eficaz, que se conoce actualmente. Sin embargo, si el operador no sabe dónde está la fuga, podría ser más caro debido a los costos de mano de obra. El aumento de la presión del gas aumenta la probabilidad de la localización de la fuga y en menos tiempo. Sin embargo, para la seguridad del operador, la presión debe limitarse a 1700 kPa (250 psi).

La prueba de la burbuja de jabón está limitada por algunos inconvenientes. El área a pulverizar debe ser una superficie simple y de fácil acceso. En tubos con aletas o la parte inferior de un intercambiador de calor grande, sería extremadamente difícil, si no imposible, para el operador rociar la parte y ver una burbuja. Por otra parte, este método de aplicación no es muy adecuado para líneas de alta producción.

C) Pruebas que involucran cambios de presión

Los métodos de prueba de fugas que involucran cambios de presión, muestran la tasa total de fuga del objeto de prueba; sin embargo, estos métodos no muestran la ubicación de la fuga, por lo que, según el tipo de aplicación se pueden dividir en: prueba de caída de la presión, prueba de aumento de presión y la prueba de diferencia de presión (41).

Prueba de caída de presión. Este método consiste en presurizar el sistema con un gas a alta presión, normalmente aire seco o nitrógeno. A continuación, el componente se desconecta de la alimentación de gas y, después de un período de estabilización, su presión interna se controla a través del tiempo. La caída de presión Δp se mide en un tiempo Δt y puede ser representado como se observa en la **Figura 2.69**.

Si la presión en el sistema cae rápidamente, hay una gran fuga presente en ese componente o sección del sistema. Si la presión del sistema cae lentamente, hay una pequeña fuga presente (42). Si la presión sigue siendo la misma, ese componente está libre de fugas. La tasa de fuga \dot{Q} puede ser fácilmente calculada teniendo en cuenta el volumen V del componente. Esto es:

$$\dot{Q} = \frac{\Delta p V}{\Delta t} \quad \text{Ec. 2.14}$$

La sensibilidad de la detección de fugas está relacionada con el tiempo de prueba, la resolución del medidor de presión y el volumen. Los sistemas más avanzados permiten la medición de la variación de la presión hasta 70 Pa (0.010 psi) de la presión de prueba y, dependiendo del volumen de las unidades de prueba, el ciclo de detección de fugas puede ser tan corto como 30 segundos y garantiza alta resolución.

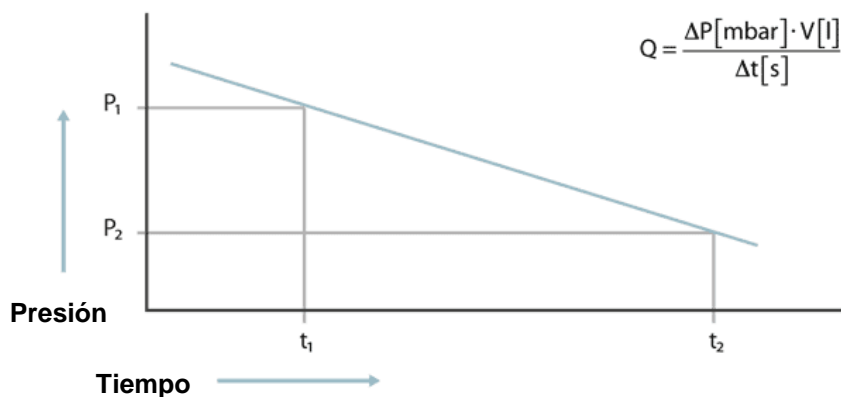


Figura 2.69 Gradiente de caída de presión en función del tiempo (39)

Si se considera un volumen interno del componente de $V = 1.5 \text{ dm}^3$ (0.4 gal) con una caída de presión de $\Delta p = 70 \text{ Pa}$ (0.010 psig) y una presión de prueba de $p = 3450 \text{ kPa}$ (500 psig) en $\Delta t = 60 \text{ s}$, la tasa de fuga es:

$$\dot{Q} = \frac{\Delta p V}{\Delta t} = \frac{(0.7 \text{ mbar})(1.5 \text{ l})}{60 \text{ s}} = 1.7 \cdot 10^{-2} \frac{\text{mbar} \cdot \text{l}}{\text{s}} \quad \text{Ec. 2.15}$$

Varios factores externos, tales como las variaciones de temperatura y deformaciones mecánicas, afectan a esta prueba. La presión interna, de hecho, depende de la temperatura, y las fluctuaciones térmicas pueden causar cambios en la presión, alterando los resultados.

La sensibilidad de esta técnica de prueba depende de la resolución de la medición de presión, tiempo de prueba y los valores de presión. Los tiempos de prueba más largos permiten un control más sensible pero, de esta manera, la prueba puede ser muy lenta debido a que algunas fugas de bajo nivel pueden requerir un periodo muy largo para comenzar a fluir, algunos incluso horas. Cuanto mayor sea la presión, más rápido se puede determinar si existe una fuga. Sin embargo, las preocupaciones de seguridad del operador limitan el valor de la presión máxima admisible y las medidas de seguridad. Los componentes se pueden probar contra fugas a presiones bajas, menores de 2 MPa (290 psig) sin protección, y presiones más altas, 7 MPa (1000 psig), se tiene que utilizar equipo de seguridad. Utilizando la presión adecuada, este método de ensayo cumple con las especificaciones técnicas de organismos internacionales para la realización de este tipo de pruebas, tales como el Underwriters Laboratory (UL), así como prueba de explosión y las normas europeas EN378.

El ensayo de rutina está diseñado para probar la resistencia mecánica del circuito de tubos de refrigeración, con el fin de para encontrar la tubería rota, y la separación entre articulaciones mal soldadas. Los rangos de presión para la prueba varían dependiendo de la unidad de prueba, es decir, si es un componente del circuito de refrigeración, o si se trata de un circuito de refrigeración completo con un compresor (43).

El rendimiento de la prueba se puede mejorar utilizando un diferencial de presión. En este modo, la unidad de prueba se presuriza junto con un volumen de referencia y las dos tendencias de presión se comparan. Prueba de caída de presión es una prueba “*pasa/no-pasa*”. Mientras que detecta la presencia de una fuga, la localización de la fuga requiere el uso de otras técnicas, como burbujas de jabón, o mejor, el uso de detección con un gas indicador. Por lo general, el límite de sensibilidad para la prueba de caída de presión está en el intervalo de $1 \cdot 10^{-3}$ mbar·l/s sin gradiente de caída de presión y hasta $1 \cdot 10^{-4}$ mbar·l/s para la prueba de caída de presión con gradiente de presión.

Esta técnica de prueba de fugas tiene algunas ventajas. Este método identificará positivamente si existe o no una fuga mediante el control de la caída de presión. Si se produce alguna pérdida de carga, significa que existe una fuga, sin alguna duda. Además, este método se puede emplear de forma totalmente automática, a fin de evitar los errores del operador.

Este procedimiento es una prueba de fugas preliminar que detecta fugas grandes antes de la operación de prueba de fugas automática definitiva utilizando un gas indicador, por ejemplo, helio. Esta prueba detecta más del 90%, de las piezas defectuosas, especialmente aquellas que no son soldadas correctamente.

Si la unidad de prueba tiene una fuga grande (es decir, un exceso de apertura en la junta soldada) sin hacer la prueba de caída de presión en primer lugar, las grandes cantidades de gas indicador se saldrían de la unidad de prueba. La contaminación de helio resultante, en gran volumen y su concentración, harían que el sistema no funciona durante horas.

Otra ventaja del llenado con nitrógeno, además de la tensión mecánica y la prueba de fugas, es la purga del circuito de prueba para la reducción de humedad. Tras la finalización con éxito de la prueba de caída de presión, el componente está listo para la prueba final. La desventaja de este método es que no identifica, donde es la fuga, sólo si hay existe una fuga presente o no.

D) Prueba de la decadencia de vacío o aumento de presión

Una prueba de caída de vacío o aumento de presión funciona en el sentido opuesto de la prueba de caída de presión. Este método implica la evacuación de la pieza a presiones suficientemente bajas y, después de la estabilización de la presión, se mide el aumento en la presión causada por el medio de prueba que intenta entrar en el componente. Sólo las piezas que son capaces de soportar esta presión externa se pueden probar de esta manera (por ejemplo, piezas de plástico de pared delgada no pueden ser probados debido al peligro de colapso).

Incluso si en la prueba de la decadencia de vacío no es posible conseguir más de una atmósfera de diferencia de presión desde el interior hacia el exterior, el uso de algunos disolventes (es decir, alcohol, acetona o similares) exalta el incremento de presión debido a la fugacidad del disolvente entrar en la fuga. Este enfoque, sin embargo, tiene algunas deficiencias, tales como la posibilidad de congelación del disolvente, provocando fugas temporales, o el deterioro en las juntas del elastómero por acción de los disolventes. Con respecto a la prueba de caída de presión, esta técnica tiene algunas ventajas. Este método es menos sensible a los cambios de temperatura ya que la presión dentro del componente es menor que la presión atmosférica (44).

Los métodos de vacío suelen ser muy sensibles a pequeños cambios de presión, por lo que la sensibilidad teórica podría ser muy alta, de hasta $1 \cdot 10^{-5}$ mbar·l/s. Sin embargo, la superficie de la desgasificación y la evaporación de líquido afectan y limitan la sensibilidad real.

Por ejemplo, una pequeña cantidad de agua, incluso unos pocos gramos, comienza a evaporarse a 2 kPa (0.3 psia) hasta 1 Pa (7.5 micras Hg) el contenido de vapor de agua es tan alta que el aumento consiguiente de presión es comparable a una fuga, dando como resultado la creación de un falso positivo. En los circuitos de refrigeración donde el desprendimiento de gases del petróleo es tan importante que podría confundirse con una fuga, la sensibilidad se limita a $1 \cdot 10^{-3}$ mbar·l/s.

Al inicio de la prueba hay un aumento no lineal de la presión como se puede observar en la **Figura 2.70** procedente de la desgasificación de las paredes internas debido a la humedad dentro del componente.

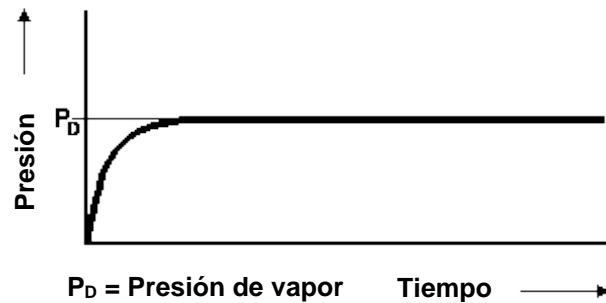


Figura 2.70 Curva de presión del componente con vacío (39)

Cuando la presión sobrepasa la presión de saturación del vapor de agua, el cambio de presión se convierte en una función lineal. De la función lineal resultante se puede obtener el volumen de fugas a partir de la presión y el tiempo como se muestra en **Figura 2.71**.

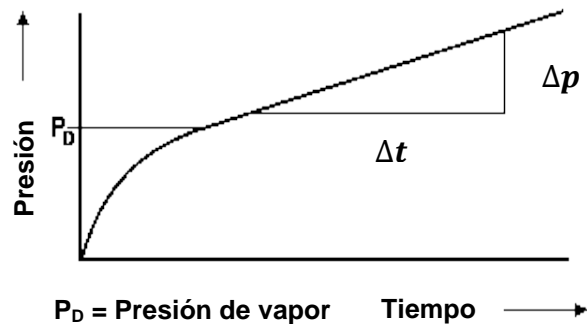


Figura 2.71 Representación gráfica del aumento lineal de presión (39)

El método de descompensación de vacío puede ser un proceso completamente automático y, de esta manera, es independiente del operador. Esta técnica es una prueba "pasa/no pasa". Detecta la fuga total del sistema y cuantas fugas pueden existir; la localización de fugas requiere de otras técnicas.

Prueba con diferencia de presiones. Es un método integral que involucra una lectura más precisa y complicada del diferencial de presiones. La presión en el objeto de prueba es comparada con la presión del contenedor estándar, la cual es constante. El indicador de presión tiene un rango de precisión de aproximadamente 100 mbar a gran escala, mientras que la presión total de la prueba puede ser de 10 bar (ver **Figura 2.72**). En el periodo de prueba ambos contenedores se llenan lentamente y simultáneamente hasta alcanzar la presión estándar del proceso. Durante este tiempo se debe tender especial cuidado con el medidor de caudal de fuga, ya que, puede sufrir un exceso de presión si el llenado es demasiado rápido y variable causando un error en la lectura del diferencial de presión. Después de llenar ambos contenedores existe un tiempo de espera para la estabilización interna de la presión e iniciar la prueba. Por lo tanto, con ese sistema es posible tener una sensibilidad en el manómetro de 1 mbar durante una presión total de 10 bar, además de tener una mejor oportunidad de superar los problemas de cambios en la temperatura. Si ambos recipientes son de dimensiones similares, tal que, la temperatura sufra una variación en el mismo grado y en la misma dirección la tasa de fuga se calculará de la misma manera a partir de la diferencia de presiones por el número de veces del volumen dividido por el tiempo de medición (39).

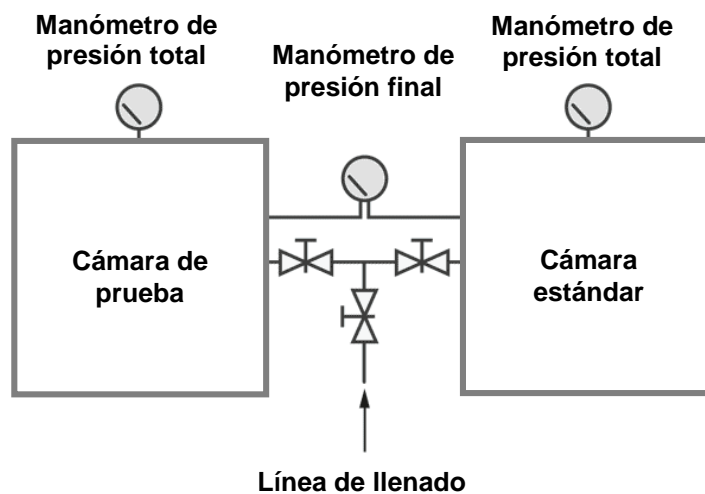


Figura 2.72 Prueba con diferencia de presiones (39)

E) Prueba de fugas con gas de trayectoria

El término "prueba de fugas con gas indicador" describe un grupo de métodos de ensayo que se caracterizan por detectar y medir el flujo de un gas indicador a través de una fuga. Estas técnicas son diferentes dependiendo del gas indicador utilizado y de la tecnología empleada. Los gases indicadores más comúnmente utilizados son los halógenos (CFC, HCFC y HFC refrigerante), helio y una mezcla de 95% nitrógeno y 5% de hidrógeno. A pesar de la sencillez de los dispositivos de detección electrónicos que emplean halógenos, estos gases están perdiendo su atractivo como gas indicador, debido a las normas de protección ambiental estipuladas en los protocolos de Kyoto. Por otro lado, el helio y especialmente la mezcla de hidrógeno-nitrógeno están ganando un gran interés para este tipo de aplicaciones.

El helio se ha utilizado con éxito como un gas indicador por mucho tiempo debido a sus propiedades físicas. No es ni tóxico ni inflamable y es un gas inerte y no reacciona con otros compuestos. El helio tiene poca viscosidad y baja masa molecular, lo que facilita que pase a través de las grietas. En las mismas condiciones ambientales, el helio fluye a través de orificios 2.7 veces más rápido que el aire. Debido a que la concentración de helio en el aire es baja (5 ppm), es fácil de detectar un incremento de la concentración de helio. Sin embargo, hay algunas deficiencias (45).

El helio difunde lentamente en la atmósfera, por lo que, en el caso de grandes fugas, su alta concentración contaminará la zona por un largo tiempo, incluso horas. Además, el helio es costoso, incluso es más costoso que los gases de halógeno. El detector de helio más adecuado se basa en un espectrómetro de masas, que es un aparato costoso y delicado que requiere mucho cuidado y mantenimiento, y es más adecuado para un laboratorio que para la industria.

Una mezcla relativamente nueva de gas indicador es la compuesta por nitrógeno e hidrógeno 95/5. El hidrógeno tiene una serie de propiedades que lo convierten en un excelente gas indicador para la prueba de fugas, incluso en

sectores con altos niveles producción en el sector industrial. Es el elemento más ligero, con la más alta difusión molecular y la más baja viscosidad que cualquier otro gas, por lo que es fácil de llenar, evacuar y disipar. Se encuentra y pasa a través de una fuga más rápido, es más fácil de limpiar y ventilar, y sus moléculas no se pegan a las superficies tan fácilmente como los átomos de helio. Más importante aún, tiene la tasa más alta de fugacidad que cualquier otro gas. Por otra parte, la concentración normal de hidrógeno en el aire (0.5 ppm) es diez veces menor que la del helio.

Los detectores del gas indicador que utilizan hidrógeno utilizar un sensor de semiconductor y no tienen partes móviles, por lo que se requiere mantenimiento constante en cada uno de los componentes internos del detector. Estos dispositivos no se ven afectados por la presencia de otros gases.

El hidrógeno puro nunca debe ser usado como gas indicador, sino que debe ser una mezcla de grado industrial estándar de 5% de hidrógeno en nitrógeno, no inflamable (especificación ISO 10156), y de fácil acceso a los proveedores de gases industriales.

Es importante recordar que la concentración de fondo en el aire es un factor limitante para cualquier detector de gases. Existen dos maneras de llevar a cabo las pruebas de fugas con gas indicador: la primera de ellas con detección externa de gas indicador, el cual mide el escape de gas de la unidad llena (método “de adentro hacia afuera”), y el segundo, la detección interna del gas indicador que entra por los orificios hacia adentro de la unidad (método “de afuera hacia adentro”).

Los métodos “adentro hacia afuera” se pueden ejecutar con una sonda detectora atmosférica o con detección de cámara de vacío, mientras que el método de “afuera hacia adentro” se aplica generalmente al poner la unidad a ensayar en una habitación que contiene el gas indicador o, muy raramente, rociando gas indicador en la superficie de la unidad. Cada uno de estos métodos se describe en detalle en las siguientes secciones:

Sonda detectora, o Sniffer. Es la prueba más simple de los métodos "adentro hacia afuera". Esta técnica de detección de fugas utiliza una sonda detectora o *sniffer* para detectar fugas en una unidad previamente llenada y presurizada con un gas indicador. Antes de llenar la unidad con el gas indicador, ésta debe ser evacuada o purgada, por lo que se utiliza un equipo de bombeo, sin importar el tamaño del dispositivo.

Este método es estrictamente dependiente del operador. De hecho, la sonda (o vara) es desplazada sobre la parte del componente y detecta la fuga a su paso como se muestra en la **Figura 2.73**. La velocidad, la distancia a la pieza y la sensibilidad de la sonda, determinan la exactitud de la detección de fugas. Sin embargo, este método localizará una fuga en una parte de la unidad, a diferencia de los otros métodos descritos, ya que tiene la capacidad de detectar fugas tan pequeñas como $1 \cdot 10^{-7}$ mbar·l/s, dependiendo del gas indicador (45).

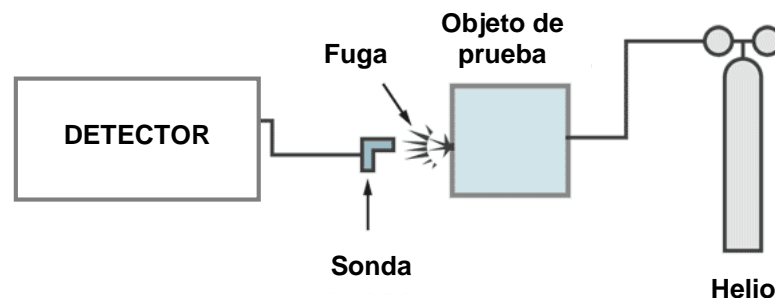


Figura 2.73 Esquema del proceso con sonda detectora (39)

Este método no es recomendable en un entorno de alto volumen de producción, al menos que sea para la localización y reparación de fugas. En función del gas indicador, puede implicar una inversión relativamente baja de herramientas, lo que representa un método económico de detección de fugas. Sin embargo, el costo del gas indicador puede ser significativamente mayor y, en caso de un gas especialmente caro, se tiene que considerar el uso de un proceso recuperación de gas adecuado, aumentando aún más los costos generales de detección.

Dentro de las desventajas se incluyen: una alta probabilidad de fugas debido a la dependencia del operador, equipos frágiles en ambientes agresivos, y rechazar partes buenas (a causa de la imposibilidad de cuantificar la fuga). Algunas sondas y los detectores requieren mantenimiento y calibración periódica para asegurar el correcto funcionamiento, ya que son sistemas complejos compuestos de bombas de vacío, espectrómetro de masas y accesorios de vacío. Los detectores electrónicos, sin partes móviles, son muy rentables. Algunos de estos detectores son sensibles a otros gases que el indicador utilizado. Por lo tanto, al utilizar estos sensores, se requiere atención a las condiciones químicas ambientales.

La tasa de fuga mínima detectable por la sonda es la concentración del gas indicador en el área de trabajo, un valor conocido como "nivel de fondo." Este nivel puede cambiar durante el ciclo de producción y aumenta debido a las unidades con fugas, en relación con el gas indicador utilizado.

En caso de una gran fuga en el dispositivo de prueba, una gran cantidad de gas indicador puede escapar de éste y permanece durante mucho tiempo en el área de trabajo, afectando fuertemente los controles posteriores que provocan el rechazo de las piezas buena. Para este tipo de situaciones, una buena práctica es utilizar un sistema de pruebas de fugas preliminar, con la finalidad de no rechazar las partes con detección falsa. Es posible integrar esta prueba preliminar, (es decir, una prueba de caída de presión) en la máquina de llenado de gas indicador, a fin de simplificar el equipo.

Es importante tener en cuenta que las técnicas que utilizan sondas o *sniffing* son métodos locales, lo que permite la inspección de los componentes de forma individual. Cada uno de los puntos sometidos al ensayo pueden tener una fuga por debajo de la sensibilidad del detector, pero la fuga global puede estar por encima del límite de aceptación. Las pruebas globales, como los métodos con cámara de vacío de adentro hacia afuera y de afuera hacia adentro, evitan este problema.

Prueba de acumulación. Este método es una variación de la prueba de fugas utilizando una sonda o *sniffer*. El componente de prueba se coloca en una campana cerrada de contención y es presurizada con el gas indicador. La sonda está conectada a la campana, la cual filtra el gas indicador acumulado durante el período de prueba. Después de la acumulación, el gas indicador es detectado más fácilmente por el sensor y medirá la tasa de fuga global.

Además de las limitaciones características del método de prueba con sonda y gas indicador, esta técnica tiene otros inconvenientes. Cuanto mayor sea el volumen de acumulación, el tiempo de detección es más largo, ya que la tasa de fugas y la sensibilidad dependen del volumen residual y el tiempo de prueba. El incremento de la presión parcial del gas indicador Δp , el flujo de gas \dot{Q} , el volumen residual V y el tiempo de prueba Δt , se pueden relacionar en una ecuación como:

$$\Delta p = \frac{\dot{Q}}{V} \Delta t \quad \text{Ec. 2.16}$$

Este método se utiliza en aplicaciones muy especiales (por ejemplo, pequeños componentes con reducido tamaño de fugas) (46).

Prueba de fugas integral. La prueba de fugas integral es la medición de la tasa fuga total de todo el objeto de prueba. Estos métodos no dan información sobre la localización de las fugas. Esta prueba se puede llevar a cabo por dos métodos:

Prueba desde el exterior hacia el interior (outside-in). El objeto de prueba es evacuado por el detector de fugas de helio. El exterior del objeto de prueba está cubierto por una campana de vidrio que se llena con 100% de helio. El llenado con 100% se logra evacuando la campana de vidrio antes del llenado con helio. En algunos casos, el objeto de prueba no puede ser, ya que pueden ser frágiles para las presiones utilizadas por el sistema (por ejemplo, algunas láminas de plástico) el relleno 100% sólo puede lograrse mediante el lavado en helio y proceder a medir en una abertura de salida la concentración de helio.

Si existe una fuga, el helio que entra por los orificios alcanzará el espectrómetro que luego mostrará directamente la tasa de fuga como se observa en la **Figura 2.74**. Con este tipo de medición, el tiempo de respuesta es insignificante (comparado con las técnicas de localización de fugas). La tasa de fugas aumentara y tendrá una variación conforme transcurra el tiempo de respuesta. El operador tiene que esperar hasta que el medidor de tasa de fugas muestre una lectura estable.

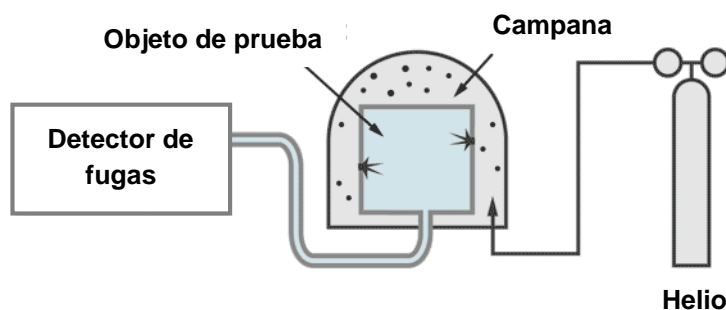


Figura 2.74 Esquema del sistema de prueba desde el exterior hacia el interior (39)

Prueba desde el interior hacia el exterior (inside-out). El objeto de prueba se llena con 100% de helio y se coloca bajo una campana de cristal. La campana de cristal evacuada se convierte en un aditamento recolector del detector de fugas. Si la fuga está presente, dondequiera que se encuentre, el flujo de helio se detecta y será mostrada por el detector de fugas. El tiempo de respuesta es dado por el volumen del resto de la campana de vidrio, dividido por la velocidad de bombeo eficaz en la campana de vidrio.

Los objetos de prueba grandes, que no pueden ser colocados bajo una campana de cristal, pueden ser envueltos por una lámina de plástico. Con una sonda de *sniffer* se mide el aumento de la concentración de helio debajo de la lámina. Antes de la prueba, la sonda de *sniffer* debe ser calibrada para medir la concentración de helio. Esta prueba puede tener largos tiempos de espera. La lámina debe ser metalizada para evitar pérdidas de helio debido a la permeación. El equipo básico de operación para esta técnica se muestra en la **Figura 2.75**.

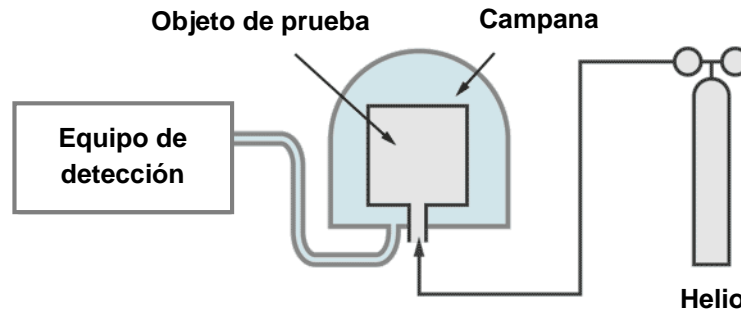


Figura 2.75 Esquema del sistema de prueba desde el interior hacia el exterior (39)

F) Prueba con líquidos penetrantes

Los líquidos penetrantes es una técnica empleada para encontrar fisuras en metales y defectos en soldaduras. Emplea un líquido de baja viscosidad que fácilmente migra hacia la superficie. Estos líquidos se aplican en un lado donde se sospecha existe una fuga, y después de un tiempo migra hacia el otro lado a través del metal. La prueba es sencilla, de bajo costo, deja un registro y su sensibilidad puede ser tan alta como $1 \cdot 10^{-6}$ mbar·l/s.

G) Prueba acústica

La detección acústica de fugas emplea sonido o ultrasonido generado por el gas a medida que se expande por un orificio. Después de presurizar un sistema con gas, las fugas son detectadas desde el exterior con un micrófono muy sensible a frecuencias aproximadas de 40,000 Hz. La detección acústica de fugas es ampliamente empleada en la prueba de líneas de alta presión, ductos etc. Requiere poca instrumentación, es sencilla y rápida; pero está limitada a $1 \cdot 10^{-3}$ mbar·l/s.

H) Prueba con radioisótopos

La detección con radioisótopos es solamente útil para probar la hermeticidad de componentes, estos se colocan en una cámara la cual es evacuada y posteriormente llenada con un gas radioactivo de rastreo usualmente Kriptón 85,

el cual se difunde a través de las grietas en el componente, posteriormente se remueve el compuesto radioactivo, el gas radioactivo atrapado en el elemento a probar se expande nuevamente y su radioactividad es registrada por un sensor. Los instrumentos para medir este tipo de fugas son muy caros; pero permiten medir flujos de hasta $1 \cdot 10^{-11}$ mbar·l/s.

I) Espectrofotómetro de masas

Es el método más sensible para detectar fugas en elementos estáticos en sistemas de vacío. Están ajustados para identificar un elemento de un peso molecular definido, usualmente helio porque tiene un volumen atómico pequeño lo cual le permite difundirse fácilmente a través de las fuentes de fuga, la diferencia relativa en por el medio a probar dan una gran sensibilidad, la presión parcial de helio en el aire es aproximadamente de $4 \cdot 10^{-3}$ mbar.

2.5.2.1 Criterios de selección del método óptimo de detección

Los tres factores principales que determinan la elección del método de prueba de fugas son:

- Las características físicas del sistema y el líquido indicador
- El tamaño anticipado de la fuga
- El motivo de la realización de la prueba (es decir, la localización y la detección de una fuga o medir una tasa de fuga)

Características del sistema. Las características físicas del sistema juegan un papel importante en la selección de los métodos de detección de fugas. Si se utiliza un fluido indicador, ya sea gas o líquido, éste no tiene que ser reactivo con el producto o con alguno de los componentes del sistema.

En general, los elementos o sistemas deben ser a prueba de fugas con el fluido de trabajo real. Este elimina los errores que pudieran ser causados por la conversión de fugas del fluido indicador a las fugas del fluido de trabajo (39).

Si se va a utilizar un gas indicador, se debe considerar a las características del gas. En la mayoría de casos, los gases con altas velocidades de difusión y pequeño tamaño molecular, tal como hidrógeno y helio, son los más ampliamente usados.

Por otro lado, cuando se lleva a cabo el sondeo de la superficie de un recipiente lleno del gas indicador, es preferible utilizar un gas persistente o un gas con una baja velocidad de difusión. El gas persistente permanecerá en el área de la fuga más larga y puede facilitar la detección y localización de fugas debido a un aumento de la concentración del gas indicador.

Tamaño de la fuga. El método y el instrumento deben coincidir o ser sensible al tamaño de la fuga. Los rangos de operación aproximados de varios métodos de detección de fugas se muestran en la **Figura 2.76**. Si la fuga es demasiado grande, el detector de fugas se inhabilitará. Esto es evidente, ya que el detector tomará valores a gran escala y permanecerá allí hasta que sea retirado de la fuente de fugas.

Algunos detectores de gases combustibles, sin embargo, pueden volver a cero en la presencia de una alta concentración de fugas. Por ejemplo, si la relación de vapor-aire del vapor de gasolina se convierte en una mezcla más rica que aproximadamente una parte vapor a nueve partes de aire, la mezcla ya no es combustible, y el detector catalítico puede indicar cero o algún valor nominal, a pesar del hecho de que existen altas concentraciones de vapor de la gasolina.

Las fugas pequeñas también pueden producir ninguna respuesta en un detector dado, eliminando así cualquier posibilidad de encontrar la fuga. Sin embargo, se debe suponer que la fuga es cero. Existe un acuerdo universal de que los términos cero fugas y sin fugas son inexactas. Las especificaciones y métodos de prueba deben definir a las fugas con términos como fuga mínima detectable o tasa de fuga máxima (39).

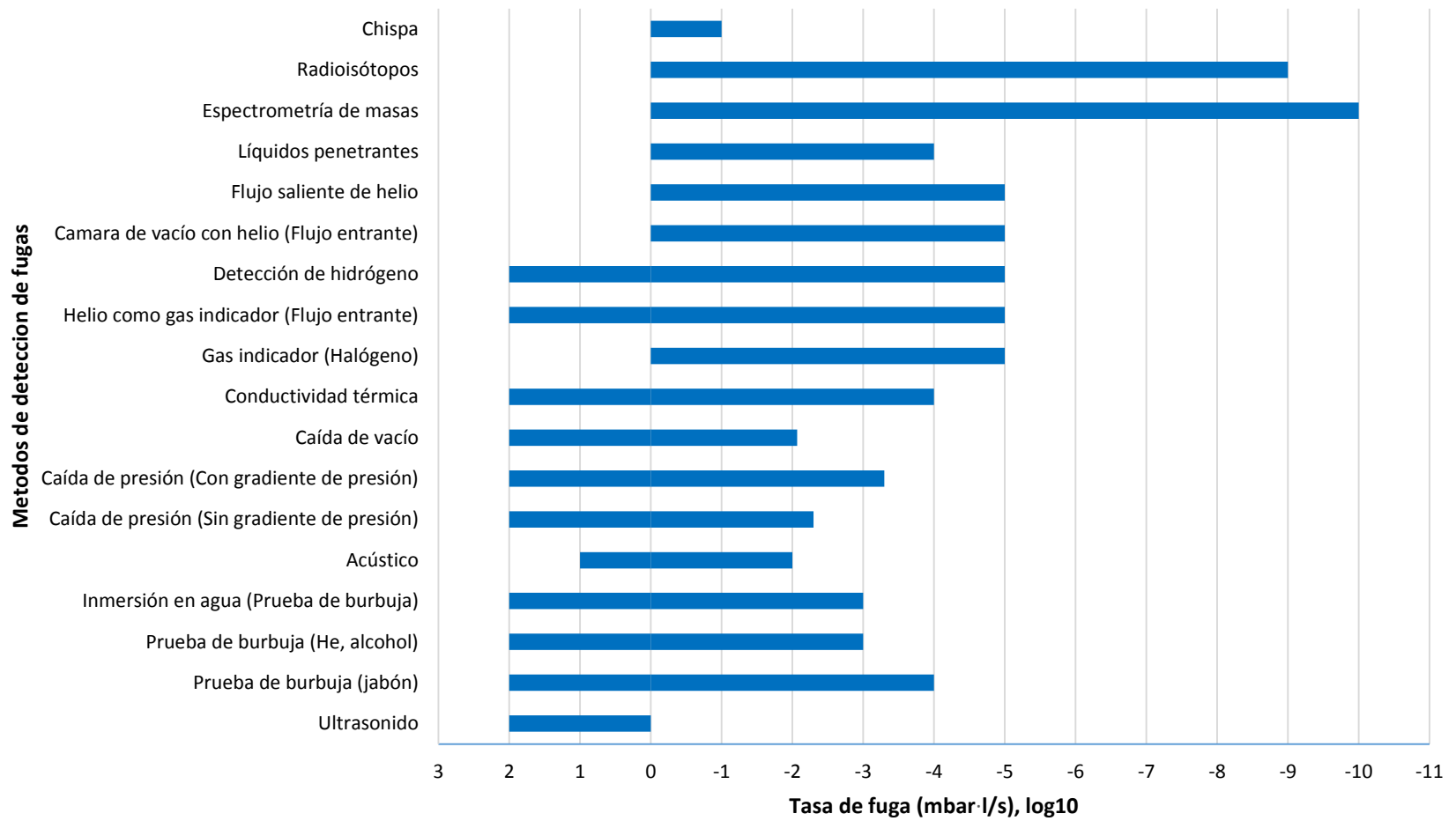


Figura 2.76 Sensibilidad de los diferentes métodos de detección de fugas (39)

Localización de la fuga. La ubicación de fugas requiere de métodos que incluyen el uso de sondas o detectores portátiles con la finalidad de realizar el escaneo en la superficie del recipiente analizado. En los sistemas de vacío, el gas trazador se puede rociar sobre la superficie del recipiente y su punto de entrada puede ser detectado al observar la reacción del detector de fugas como el spray de gas trazador y su movimiento a lo largo de la superficie. En los sistemas de presión, burbujas, inmersión, líquidos penetrantes, e indicadores químicos proporcionan medios de localización fugas a través de la observación visual.

Errores comunes en la detección de fugas. Los errores más comunes encontrados en las pruebas de fugas son:

- El uso de un método muy sensible
- El uso de un solo método de fugas a prueba
- La falta de control del medio ambiente en las proximidades de la fuga

Dado que los métodos sensibles no pueden ser utilizados en la presencia de fugas muy grandes (brutas), las pruebas de fugas deben llevarse a cabo en dos o más etapas, comenzando con las pruebas menos sensibles y progresando a los métodos más sensibles. Este procedimiento ahorra tiempo y dinero.

El control del medio ambiente en las proximidades de la fuga consiste en un número de pasos, dependiendo del método de ensayo empleado. Así pues, si se utiliza un gas trazador, la atmósfera debe ser controlada para evitar la contaminación por el gas trazador que puede ser erróneamente reportado como una fuga. Si se utilizan métodos sónicos o ultrasónicos, el ruido de fondo debe ser controlado. Si existe pequeñas fugas, los contaminantes del aire pueden causar taponamiento temporal de la fuga. Por ejemplo, el taponamiento de una fuga molecular puede ser debido a la condensación del vapor de agua en el orificio. Las partículas en el aire pueden tapar parcialmente una fuga.

CAPÍTULO III

DESARROLLO DEL PROYECTO

3.1 Planteamiento del problema

En la actualidad, el porcentaje de piezas buenas a la primera vez (FPY por sus siglas en inglés) en la empresa es de 85% (ver **Figura 3.1**). Este porcentaje está directamente relacionado con el retrabajo realizado diariamente, el cual consta de entre 5 a 6 tanques por día, o bien, aproximadamente 1500 tanques al año. El costo por retrabajo por cada pieza es de aproximadamente de \$40 USD por hora (retrabajo, inspección, etc.) dando como resultado un costo anual aproximado de \$60000 USD.

Además de lo anterior, el costo anual total aumenta cuando el defecto llega con el cliente (algunas veces puede ser reparado ya ensamblado y otras veces no) y se tiene que regresar a la planta para realizar el retrabajo. Este tipo de retrabajo tiene un costo aproximado por evento de \$3000 USD, si se consideran de 1 a 2 eventos por mes, 24 eventos aproximados al año, el costo anual por este tipo de retrabajo es de aproximadamente \$72000 USD.

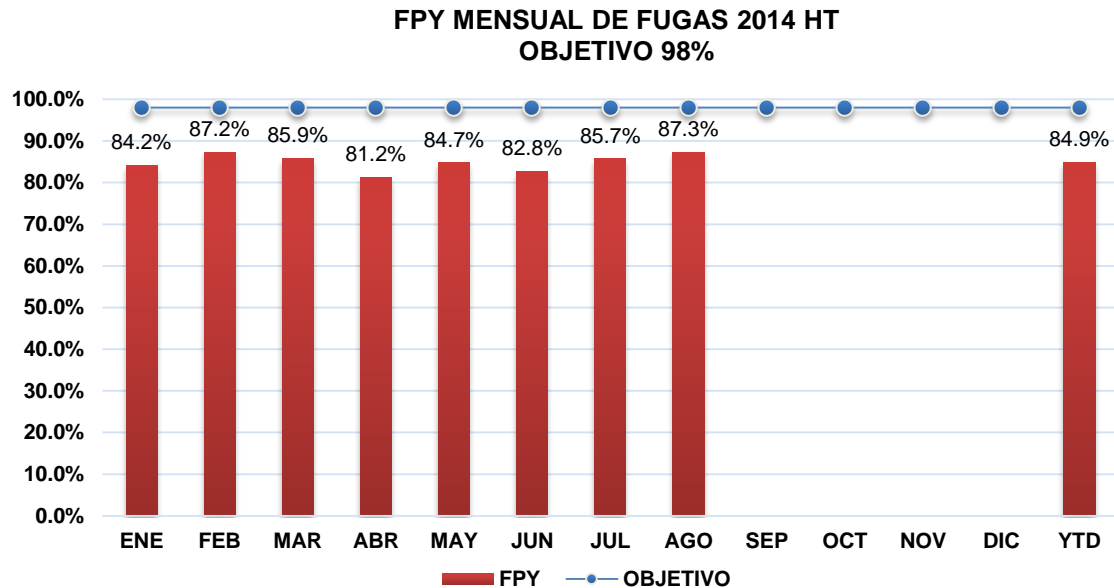


Figura 3.1 Tendencia mensual del indicador FPY en prueba de fugas (30)

3.1.1 Caso de negocio

Los problemas recurrentes en el indicador de fugas es un factor determinante para la decisión de llevar más producto a la planta. Este tipo de defecto ocasiona que la máquina tenga que ser desensamblada para ser reparada o cambiar el tanque, ocasionando retrabajo mayor. Es necesario definir un proceso adecuado para eliminar este problema de raíz de acuerdo a las especificaciones de la planta. El control de calidad en este tipo de procesos es un área de la cual se depende al 100 % (inmersión del tanque presurizado en bañera con solución antioxidante).

3.1.2 Panorama actual

La hermeticidad en los tanques hidráulicos es de vital importancia a la hora de su evaluación e inspección para el correcto funcionamiento de la maquinaria para el suministro al sistema de la potencia hidráulica. Debido a lo anterior, la garantía de una buena soldadura en todos los bordes del tanque y componentes que se encuentren en la interfaz del líquido y el gas es de suma importancia al momento de realizar pruebas de hermeticidad.

En el presente trabajo se realizó un caso de estudio para comprobar la factibilidad de la relación entre la hermeticidad y calidad de la soldadura en relación con los métodos para la detección de fugas que más se adecuen al proceso de manufactura de la planta.

3.2 Desarrollo experimental

Los problemas relacionados con hermeticidad en tanques hidráulicos se ven directamente afectados por los procesos de manufactura, calidad, transporte, etc. Es por ello que se utilizó una metodología Seis Sigma para encontrar la causa raíz de éste tipo de problemas en particular.

3.2.1 Definir situación actual del problema

Dentro del proceso de soldadura de tanques hidráulicos, la hermeticidad es una de las características de vital importancia en los estándares de calidad de la producción en general. Estos indicadores se ven directamente afectados por problemas en las líneas de producción, materia prima, maquinaria, procedimientos de soldadura, etc. La gran mayoría de estos problemas son resultado de la falta de control de calidad, planeación, seguimiento, inspección, etc. Por lo anterior, el diagnóstico de los problemas de hermeticidad relacionados con el proceso de manufactura y calidad de tanques hidráulicos, fue medido y esquematizado utilizando diversas herramientas de calidad.

El proyecto se dividió en dos fases, la primera relacionada con la aparición de defectos y/o discontinuidades en el proceso de manufactura y su relación con la hermeticidad en prueba de fugas. La segunda, es la mejora o la adecuación del sistema de detección de fugas de acuerdo a las especificaciones de la planta.

En la primera fase fueron analizados los datos de inspección de calidad con el fin de determinar cuáles eran los defectos que aparecían con mayor frecuencia en las uniones, ensamble o materia prima del proceso de manufactura. Los datos generados en las auditorías de calidad, fueron utilizados como antecedentes para el diagnóstico actual del problema.

Estos datos muestran la aparición de defectos más comunes encontrados al realizar la prueba de hermeticidad parcial o total de todo el tanque (ver **Tabla 3.1**)

Tabla 3.1 Cuantificación de defectos en rechazos para prueba de fugas (30)

Defecto	Total	Rechazo (%)
Falta de fusión	273	54.5%
Poros	202	40.3%
Poros, falta de fusión	12	2.4%
Fractura	10	2.0%
Unión	3	0.6%
Tapón	1	0.2%
Total	501	

Con el fin de determinar el efecto de los defectos en la contribución en el indicador FPY (problemas vitales), se procedió a estratificar y cuantificar los datos generados en el periodo enero a julio de 2014 en un diagrama de Pareto como se muestra en la **Figura 3.2**.

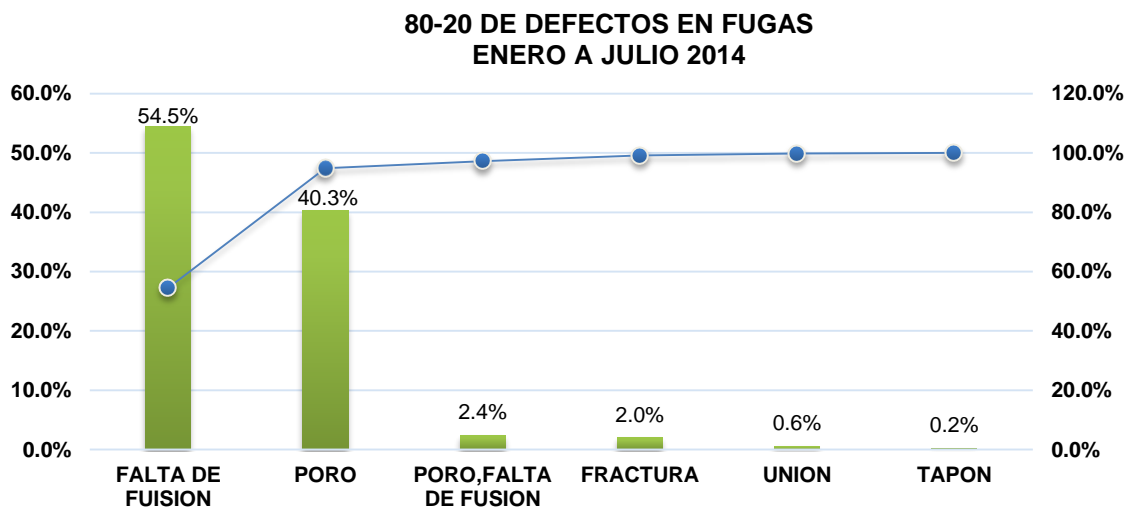


Figura 3.2 Datos generados de defectos en fugas de enero a julio del 2014 (30)

Al realizar el análisis estadístico se observa que, de un total de 3605 tanques examinados, 501 fueron rechazados la primera vez en su inspección. De esta cantidad de defectos, las faltas de fusión y la porosidad generadas en el proceso de soldadura son las discontinuidades que mayormente se presentaron en el periodo.

Algunos otros defectos en subensambles y uniones tienen menor significancia en el indicador FPY, por lo cual, presentan una menor relevancia en comparación con los defectos producidos en operaciones de soldadura. El flujo de producción total para cada uno de los 56 números de parte está representado en la **Tabla 3.2**, para un total de 3605 tanques elaborados en el periodo de enero a julio del 2014.

Tabla 3.2 Número total de piezas producidas por número de parte (30)

No. de parte	Total	No. de parte	Total
1A	1085	39A	5
2A	449	29A	4
4A	379	30A	4
3A	274	26A	4
14A	201	48A	3
5A	176	40A	3
18A	122	27A	3
8A	104	33A	2
11A	101	36A	2
12A	81	41A	2
7A	80	32A	2
19A	78	34A	1
13A	55	43A	1
10A	53	45A	1
15A	42	37A	1
6A	41	49A	1
9A	36	51A	1
35A	27	52A	1
16A	25	53A	1
47A	23	54A	1
17A	20	55A	1
31A	14	56A	1
24A	12	42A	1
28A	12		
20A	12	Gran total	3605
25A	9		
23A	9		
22A	8		
46A	8		
21A	8		
50A	8		
38A	6		

Con el fin de tener un mejor enfoque del problema planteado, se analizó el FPY de cada uno de los tanques así como su efecto en el indicador promedio global en prueba de fugas (ver **Tabla 3.3**).

Tabla 3.3 Análisis estadístico del número de tanques aceptados/producidos (30)

No. de parte	Aceptadas	Rechazadas	Total	FPY	Rechazo (%)	Acumulado (%)
1A	976	108	1085	90%	18.6%	18.6%
2A	395	54	449	88%	9.2%	27.8%
3A	232	42	274	85%	7.2%	35.0%
4A	338	41	379	89%	7.0%	42.0%
5A	136	40	176	77%	6.8%	48.8%
6A	8	33	41	20%	5.6%	54.5%
7A	50	30	80	63%	5.1%	59.6%
8A	77	27	104	74%	4.6%	64.2%
9A	12	24	36	33%	4.1%	68.3%
10A	29	24	53	55%	4.1%	72.5%
11A	82	19	101	81%	3.3%	75.7%
12A	62	19	81	77%	3.3%	79.0%
13A	38	17	55	69%	2.9%	81.9%
14A	187	14	201	93%	2.4%	84.3%
15A	33	9	42	79%	1.5%	85.8%
16A	16	9	25	64%	1.5%	87.3%
17A	13	7	20	65%	1.2%	88.5%
18A	115	7	122	94%	1.2%	89.7%
19A	71	7	78	91%	1.2%	90.9%
20A	6	6	12	50%	1.0%	92.0%
21A	2	6	8	25%	1.0%	93.0%
22A	3	5	8	38%	0.9%	93.8%
23A	5	4	9	56%	0.7%	94.5%
24A	9	3	12	75%	0.5%	95.0%
25A	6	3	9	67%	0.5%	95.6%
26A	1	3	4	25%	0.5%	96.1%
27A	0	3	3	0%	0.5%	96.6%
28A	10	2	12	83%	0.3%	96.9%
29A	2	2	4	50%	0.3%	97.3%
30A	2	2	4	50%	0.3%	97.6%
31A	12	2	14	86%	0.3%	97.9%
32A	0	2	2	0%	0.3%	98.3%
33A	1	1	2	50%	0.2%	98.5%
34A	0	1	1	0%	0.2%	98.6%
35A	26	1	27	96%	0.2%	98.8%
36A	1	1	2	50%	0.2%	99.0%
37A	0	1	1	0%	0.2%	99.1%
38A	5	1	6	83%	0.2%	99.3%
39A	4	1	5	80%	0.2%	99.5%
40A	2	1	3	67%	0.2%	99.7%
41A	1	1	2	50%	0.2%	99.8%
42A	0	1	1	0%	0.2%	100.0%
43A	1	0	1	100%	0.0%	100.0%
44A	1	0	1	100%	0.0%	100.0%
45A	1	0	1	100%	0.0%	100.0%
46A	8	0	8	100%	0.0%	100.0%
47A	23	0	23	100%	0.0%	100.0%
48A	3	0	3	100%	0.0%	100.0%
49A	1	0	1	100%	0.0%	100.0%
50A	8	0	8	100%	0.0%	100.0%
51A	1	0	1	100%	0.0%	100.0%
52A	1	0	1	100%	0.0%	100.0%
53A	1	0	1	100%	0.0%	100.0%
54A	1	0	1	100%	0.0%	100.0%
55A	1	0	1	100%	0.0%	100.0%
56A	1	0	1	100%	0.0%	100.0%
Gran Total	3020	584	3605	84%	100.0%	

El análisis estadístico de los datos obtenidos, puede ser representado en un diagrama de Pareto con el fin de evaluar de una forma práctica y precisa los números de parte que presentan un mayor número de rechazos por unidades producidas (ver **Figura 3.3**).

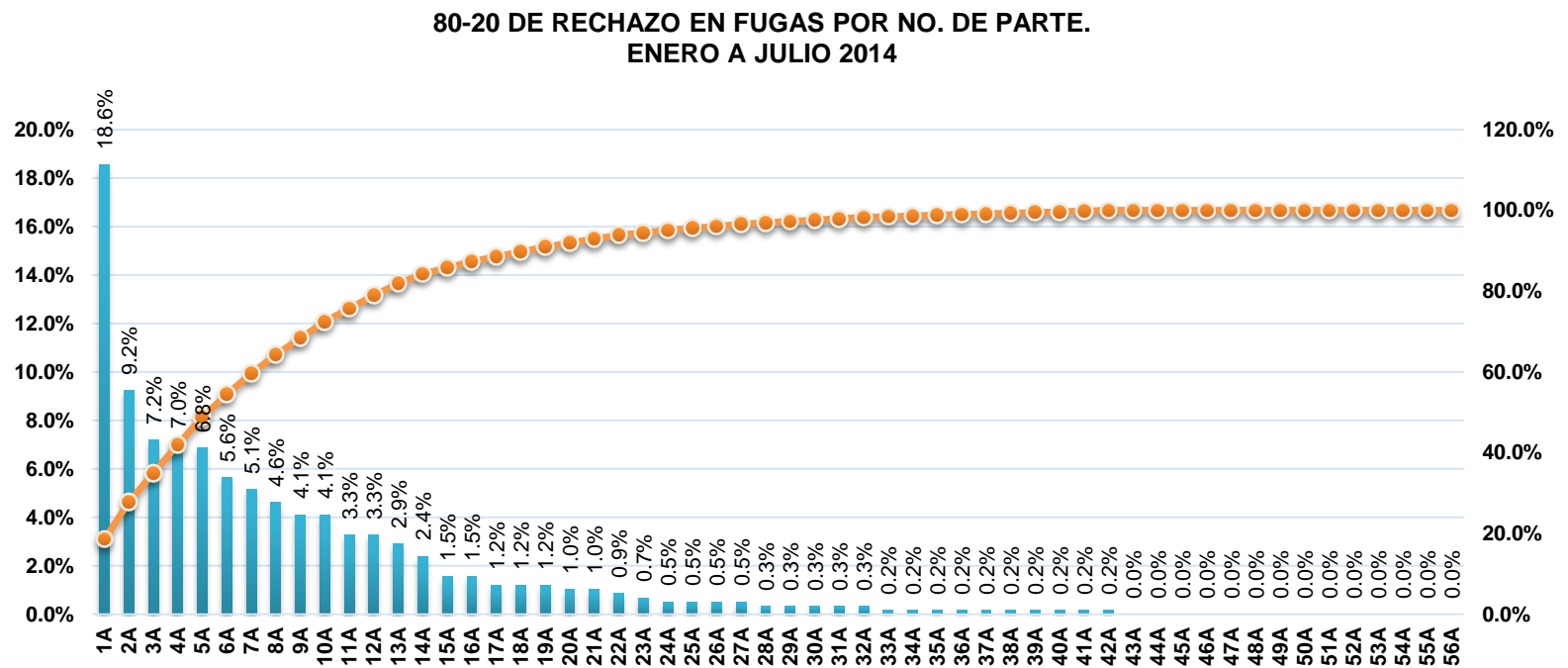


Figura 3.3 Representación de los números de parte con mayor porcentaje de rechazo (30)

Asimismo, se analizó el indicador FPY para cada uno de los operadores involucrados en el proceso de soldadura de cada uno de los números de parte (ver **Tabla 3.4**).

Tabla 3.4 Análisis del número de tanques aceptados/producidos por soldador (30)

Operador	Aceptadas	Rechazadas	Total	FPY	Rechazo (%)	Acumulado (%)
11511	496	50	546	90.8%	8.7%	8.7%
12905	395	48	443	89.2%	8.4%	17.1%
99168	61	42	103	59.2%	7.3%	24.4%
97897	392	40	432	90.7%	7.0%	31.4%
13322	331	29	360	91.9%	5.1%	36.5%
10842	248	28	276	89.9%	4.9%	41.4%
12464	43	22	65	66.2%	3.8%	45.2%
13383	35	21	56	62.5%	3.7%	48.9%
10429	243	20	263	92.4%	3.5%	52.4%
10790	89	20	109	81.7%	3.5%	55.8%
99706	89	20	109	81.7%	3.5%	59.3%
13261	42	17	59	71.2%	3.0%	62.3%
95065	42	17	59	71.2%	3.0%	65.3%
13539	3	16	19	15.8%	2.8%	68.1%
98118	36	16	52	69.2%	2.8%	70.9%
14476	93	14	107	86.9%	2.4%	73.3%
12278	58	12	70	82.9%	2.1%	75.4%
94439	35	12	47	74.5%	2.1%	77.5%
99139	27	12	39	69.2%	2.1%	79.6%
14364	3	10	13	23.1%	1.7%	81.3%
10387	23	9	32	71.9%	1.6%	82.9%
13481	34	9	43	79.1%	1.6%	84.5%
98150	8	9	17	47.1%	1.6%	86.0%
10512	16	7	23	69.6%	1.2%	87.3%
12459	1	7	8	12.5%	1.2%	88.5%
11100	12	6	18	66.7%	1.0%	89.5%
12942	1	6	6	0.0%	1.0%	90.6%
13111	6	5	11	54.5%	0.9%	91.4%
13160	19	5	24	79.2%	0.9%	92.3%
13860	1	5	6	16.7%	0.9%	93.2%
96973	0	5	5	0.0%	0.9%	94.1%
99149	0	5	5	0.0%	0.9%	94.9%
13375	21	4	25	84.0%	0.7%	95.6%
10613	3	3	6	50.0%	0.5%	96.2%
12530	20	3	23	87.0%	0.5%	96.7%
14724	1	3	4	25.0%	0.5%	97.2%
99730	29	3	32	90.6%	0.5%	97.7%
14317	5	2	7	71.4%	0.3%	98.1%
95605	0	1	1	0.0%	0.2%	99.3%
97769	10	1	11	90.9%	0.2%	99.5%
98940	1	1	2	50.0%	0.2%	99.7%
10058	7	0	7	100.0%	0.0%	100.0%
10482	1	0	1	100.0%	0.0%	100.0%
10492	1	0	1	100.0%	0.0%	100.0%
10970	1	0	1	100.0%	0.0%	100.0%
11038	1	0	1	100.0%	0.0%	100.0%
13168	3	0	3	100.0%	0.0%	100.0%
13325	1	0	1	100.0%	0.0%	100.0%
15905	1	0	1	100.0%	0.0%	100.0%
95004	1	0	1	100.0%	0.0%	100.0%
97869	1	0	1	100.0%	0.0%	100.0%
99705	2	0	2	100.0%	0.0%	100.0%
99769	1	0	1	100.0%	0.0%	100.0%
Gran total	3032	573	3605	84.1%	100.0%	

El indicador FPY es una herramienta útil de predicción sobre el desarrollo operacional del personal de trabajo, ya que muestra el desempeño y la calidad del trabajo realizado como una relación entre las piezas rechazadas en la prueba de fugas y las piezas producidas en un flujo normal mensual de producción (ver **Figura 3.4**).

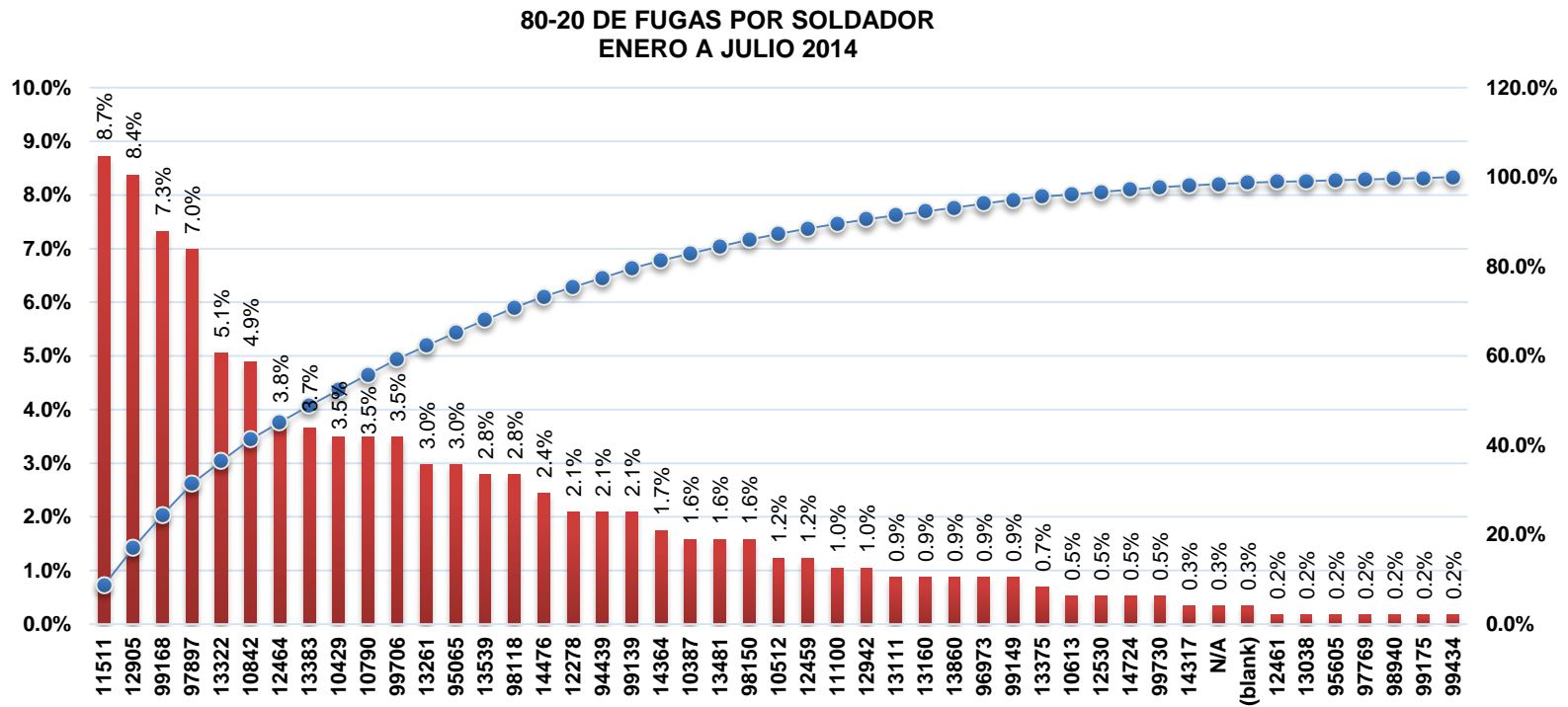


Figura 3.4 Relación del porcentaje de piezas rechazadas y el total de tanques soldados por operador (30)

Para la interpretación de la gráfica de calidad de la **Figura 3.4**, se deben tener en consideración diversos factores entre los que destacan:

- La capacitación y experiencia del personal
- La rotación de personal
- La complejidad del tanque
- La cantidad de tanques soldados por mes
- Especificaciones de diseño
- Cambios de ingeniería
- Matriz de flexibilidad
- La frecuencia de soldadura de un mismo número de parte, etc.

Estas consideraciones son de gran significancia al momento de ajustar las líneas de producción de acuerdo a las capacidades y flexibilidad del personal operativo acorde a las especificaciones de la planta.

3.2.2 Planteamiento de la estrategia

El objetivo principal del caso de estudio es disminuir las piezas de rechazo en prueba de fugas provenientes de operaciones de soldadura y/o ensamble para toda la línea de producción.

Teniendo en cuenta lo anterior, la estrategia prepuesta consiste en estratificar los resultados provenientes del análisis de rechazo en prueba de fugas del periodo enero-julio del 2014 que se muestra en la **Figura 3.3**.

La estratificación consiste en dividir en generaciones los 56 números de parte que actualmente están en producción, con el fin de tener un manejo más controlado de la información proveniente de las auditorías de calidad. Asimismo, esta estrategia supone que al dividir la producción se puede trabajar con la generación que tenga mayor grado de significancia en el indicador FPY global mensual.

La segmentación de las generaciones se puede observar en la **Tabla 3.5** de los 56 números de parte, tomando en cuenta el flujo de producción y su relación con las piezas de rechazo de la **Figura 3.3**.

Tabla 3.5 Generaciones del 80-20% para prueba de fugas (30)

Generación	Número de parte
Generación I	1A
Generación II	2A, Resto de línea 1 (3A, 4A, 5A)
Generación III	Resto de los tanques 80-20%

Se considera el impacto de cada una de las generaciones en el indicador global en prueba de fugas (FPY), la primera generación supone ser un problema vital ya que el porcentaje de rechazo es considerablemente mayor en comparación con las otras dos generaciones (problemas triviales), ya que el efecto del aumento o disminución en el porcentaje de rechazos tiene una repercusión mayor en el indicador FPY global.

Por lo tanto, el empleo de cualquier acción correctiva del problema puede ser replicado en la segunda generación y subsecuentemente en el resto de los tanques con el fin de disminuir el indicador de rechazo de la producción total (todos los tanques).

3.2.2.1 Análisis de la primera etapa (Generación I)

La primera generación está compuesta por un tanque, el número de parte 1A, el cual presenta la mayor cantidad de piezas rechazadas mensualmente. Con el fin de establecer un patrón de similitud en cada uno de los meses de la etapa de diagnóstico, se procedió a realizar un muestreo en el mes de julio, ya que estos resultados eran los más cercanos al periodo de prueba.

Los datos generados, muestran una tendencia similar en la aparición de discontinuidades tales como: faltas de fusión y poros, los cuales presentan un 34% y 56% respectivamente (ver **Figura 3.5**), en comparación con el periodo de diagnóstico de enero a julio en los cuales se presentan porcentajes de 54.5% y 34.3% respectivamente.

**% DE RECHAZO POR DEFECTO DE FUGAS
JULIO HT 2014.**

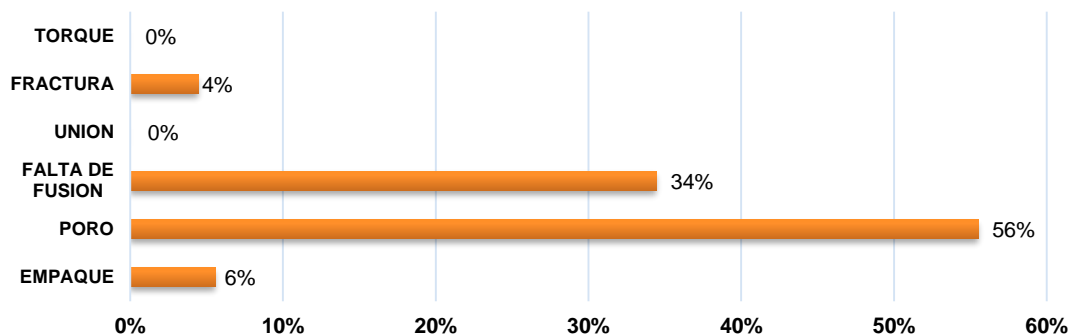


Figura 3.5 Porcentaje de rechazos en fugas por defectos (30)

Los datos generados en el mes de julio, se analizaron un total de 116 tanques para los cuales se obtuvo un incremento en 2 puntos porcentuales en el FPY en comparación con el mes anterior. El total de tanques rechazados para la prueba de fugas y las localizaciones más frecuentes de las diferentes secciones del tanque se muestran en la **Tabla 3.6**.

Tabla 3.6 Datos para fuga en tanques FPY del mes de Julio (30)

Numero de parte:	1A
Período	Julio
Localizaciones frecuentes:	B9, G8, H5, P9, D6, D7, F8, G9
Total de tanques:	116
Total de tanques con defectos:	13
Total de poros:	12
Total de faltas de fusión:	7
FPY	88%
Objetivo	98%

En la **Tabla 3.7** se muestran detalladamente la localización, la frecuencia y el detalle de cada uno de los defectos presentes en cada sección de los tanques rechazados del mes presentes en la **Tabla 3.6**.

De acuerdo a la frecuencia de la aparición de fugas los lugares con mayor incidencia fueron las presentadas en las localizaciones B9 y D6 con 6 fugas respectivamente. Las otras cuentan con una menor influencia por lo que no son de vital importancia.

Tabla 3.7 Localización detallada de los defectos más frecuentes en prueba de fugas (30)

		PRIMERA FIGURA		
		<i>Localización</i>	<i>Frecuencia</i>	<i>Tipo de defecto</i>
Hoja 1 de 2		B9	6	Falta de Fusión
		G8	1	Poros
		H5	1	Poros
		SEGUNDA FIGURA		
		<i>Localización</i>	<i>Frecuencia</i>	<i>Tipo de defecto</i>
		P9	1	Falta de Fusión
		TERCERA FIGURA		
		<i>Localización</i>	<i>Frecuencia</i>	<i>Tipo de defecto</i>
Hoja 2 de 2		D6	6	Poros
		D7	1	Poros
		F8	2	Poros
		G9	1	Poros

La localización B9 corresponde a la soldadura de un tubo (componente 1A-1) en un plano declinado en la parte superior del tanque la cual se muestra en la **Figura 3.6**.

**Figura 3.6** Soldadura alrededor de componente tubular (30)

El análisis detallado de la posición y secuencia de soldadura asistido por el departamento de soldadura, mostró que existe una región de apertura considerable entre ambas placas como se muestra en la **Figura 3.7**, la cual se encuentra dentro de tolerancias permitidas de acuerdo a las especificaciones de diseño. El componente es soldado por completo en línea I por un solo operador, por lo cual se disminuye la aparición de faltas de fusión por malos reinicios en cordones de soldadura realizados en operaciones anteriores.

Las tolerancias de diseño en las operaciones de corte y prensado pueden dar como resultado un favorecimiento entre los valores de los límites aceptables. Esta variación puede ser un problema al momento de realizar la operación de soldadura ya que existe la posibilidad de perder la raíz de fusión por pérdida de ángulo debido a que el espacio entre las placas es mayor.

La variabilidad en el efecto de la contribución de los límites de tolerancias se muestra en la **Figura 3.7**. En esta se observa una apertura que se encuentra dentro de la tolerancia permitida, pero favoreciendo al límite superior (apertura grande), por lo cual es mucho más difícil conservar el ángulo y la raíz del charco de soldadura dando como resultado la aparición de posibles defectos como faltas de fusión, llegando incompleto, socavado, etc.



Figura 3.7 Apertura entre las placas del componente 1A-1 y el cuerpo del tanque (30)

La segunda zona donde se presentaron fugas fue en la zona D6 la cual corresponde a la soldadura de una rosca que presenta porosidad y faltas de fusión como se muestra en la **Figura 3.8** y **Figura 3.9** respectivamente.

Tales defectos pueden ser originados por una gran cantidad de variables dentro del proceso de manufactura. Entre algunos de ellos destaca la limpieza, bajos amperajes, velocidad de avance muy alta, uno incorrecto del líquido antisalpicadura, etc. (23)



Figura 3.8 Porosidad en el cordón de soldadura (30)



Figura 3.9 Defecto por falta de fusión hacia el final del cordón de soldadura (30)

3.2.3 Desarrollo del período de prueba

En el período de prueba inicial, se establecieron una serie de condiciones y herramientas, con la finalidad de agilizar y controlar el manejo de datos generados para su posterior análisis y optimización de la variabilidad del efecto en el proceso, a fin de disminuir discontinuidades tales como: faltas de fusión y poros.

El efecto de la variación de los parámetros, manuales de operación y procedimientos de calidad; además de cambios de personal, turnos, materia

prima, consumibles, maquinaria, etc., son cambios en los procedimientos estándar de trabajo, los cuales tienen impacto directo en la calidad final de producto.

Es por ello, que el estricto apego de los manuales de operación y procedimiento de trabajo estándar, es una forma de garantizar el correcto uso y aplicación de las operaciones de soldadura, a fin de disminuir el porcentaje de piezas rechazadas en prueba de fugas.

Con el fin de desarrollar un plan de mejora a partir de las condiciones actuales de operación, se procedió a realizar la descripción gráfica y su impacto sobre el indicador FPY de cada una de las operaciones de soldadura.

Las causas relacionadas con la mano de obra, maquinaria, metodología, medio ambiente y materia prima, tienen a su vez una serie de sub causas que tienen efecto en la variable estudiada (ver **Figura 3.10**). Por esta razón, se decidió comenzar la prueba tomando la mano de obra como variable objetivo y fijando las demás variables.

Según la anterior definición de variables, el periodo de prueba estaría comprendido para un mes en un solo turno de personal en soldadura. Esto implicaría fijar las operaciones de soldadura y punteo para el número de parte 1A.

El primer equipo está conformado por la operación de punteo (P1) y soldadura (S1) para el turno de día, el cual está representado en la matriz de la **Tabla 3.8**.

Tabla 3.8 Matriz de operaciones para el equipo amarillo (30)

Turno	Día		
	Operación	S1	P1
Día	S1	O	P1S1
	P1	P1S1	O

El decremento considerable en el indicador FPY debido a la aparición de defectos en el área de soldadura (mayormente compuestos por porosidad y faltas de fusión), dan como resultado la aparición de fugas. Por lo anterior, se definieron las posibles variables y parámetros que pueden provocar la aparición de defectos (ver **Tabla 2.19** y **Tabla 2.20**) en el proceso de soldadura que dan lugar a la aparición de fugas la producción en general (ver **Figura 3.10**).

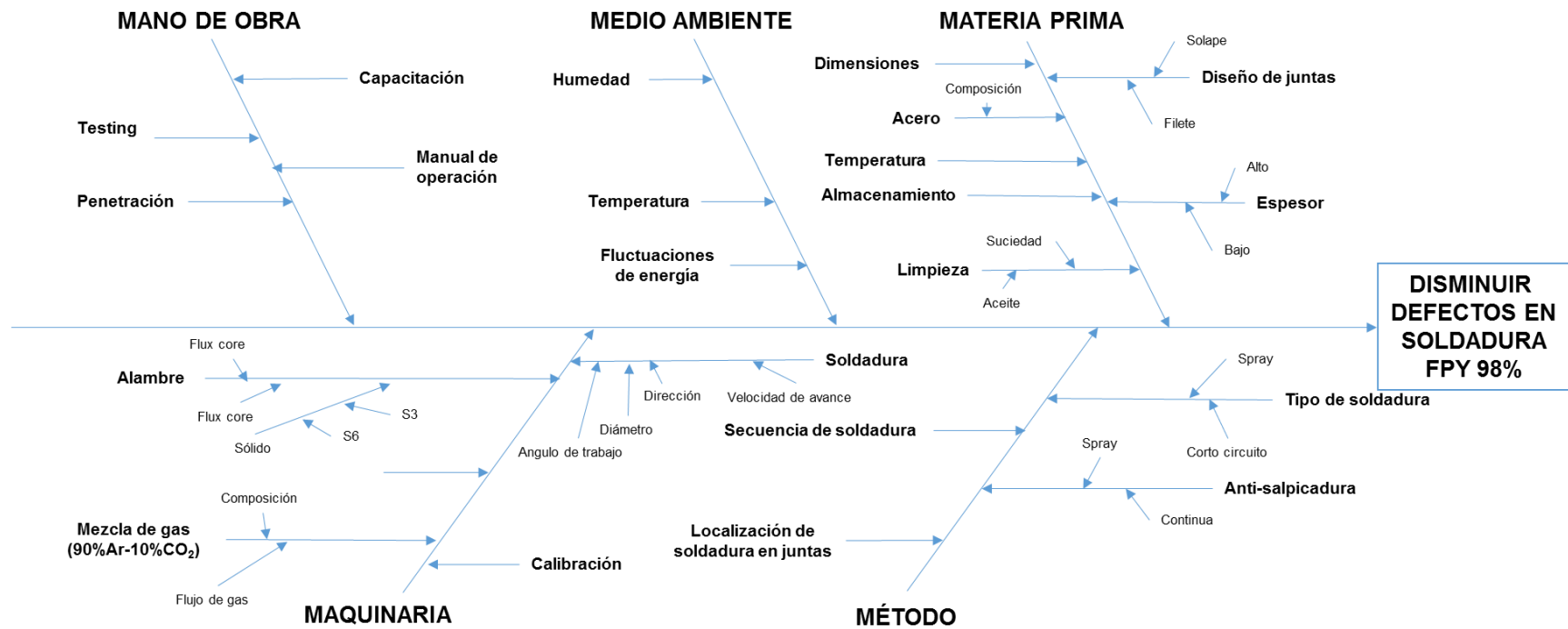


Figura 3.10 Diagrama causa-efecto para las operaciones de soldadura

La selección de los operadores fue tomada de la **Tabla 3.9**, en la cual se enlistan un total de 23 operadores involucrados o que al menos una vez había soldado este número de parte en el periodo de enero a julio del 2014.

Tabla 3.9 Relación de soldadores con en el número de parte 1A (30)

No. de parte	Soldador	Total	
1A	9897	1	
	10429	152	
	10842	210	
	10872	1	
	11100	4	
	11511	3	
	12459	1	
	12530	2	
	13111	2	
	13322	198	
	14317	4	
	14476	98	
	96973	2	
	97897	393	
	98150	1	
	99730	2	
	133222	2	
	Total general		1085

El operador elegido para la primera ronda fue el que tuviera un mayor registro de tanques soldados para este número de parte el cual corresponde al número de nómina 97897, de ahora en adelante se definirá como S1. De igual forma el operador de punteo con nómina 13608 se definirá como P1.

La etapa del periodo de prueba, consistió en dar seguimiento de las operaciones de punteo y soldadura apegándose 100% al manual de procedimiento estándar específico para este número de parte. Dicho procedimiento establece las especificaciones de soldadura, diseño, ingeniería, tolerancias y requerimientos mínimos permitidos de acuerdo a las especificaciones de la norma de la empresa.

Los parámetros de operación que se muestran en la **Tabla 3.10**, corresponden al WPS específico para el número de parte 1A, el cual establece los parámetros utilizados en el proceso de soldadura los cuales deben ser verificados al iniciar cualquiera de las operaciones anteriormente expuestas.

Tabla 3.10 Parámetros generales de operación (30)

Operación	Proceso	
Microalambre (GMAW)	Especificación AWS	A5.18
	Clasificación AWS	ER70S-3
	Diámetro del alambre sólido	0.035 in (0.9 mm)
Máquina	Velocidad de alambre [§]	± 10% MPM
	Voltaje [¶]	± 7% MPM
	Gas de protección	Mezcla 90/10 (Ar/CO ₂)
	Flujo de gas +50% / -20%	45 FCH
	Polaridad	Invertida (DCEP)
Tipos de puntos de soldadura		
	P : Punto Estándar	Filete de 3 mm longitud de 25 mm
	PR : Punto Reforzado	Filete de 3 mm Longitud de 51 mm

Nota: La longitud de la soldadura determina el número de puntos y movimientos especificados en cada secuencia del procedimiento de soldadura.

[§] Especificado en cada secuencia de soldadura en el WPM

[¶] Estipulado en cada secuencia de soldadura en el WPM

Instrucciones Especiales:

- No hacer uniones en esquinas.
- Los TLD, Usados en este procedimiento deberán estar reflejados en el DTS de esta operación.
- En caso de tener gap aplicar un fondeo antes de aplicar las soldaduras de Vista.

Con el fin de corregir la mala ejecución del WPS establecido, se optó por implementar un pequeño taller para la familiarización de algunos cambios de ingeniería, en el cual se expresaban dudas del manual de operaciones con el fin de eliminar cualquier falta de información referente a la secuencia de soldadura.

El control del flujo de información estaba respaldado por el personal de procesos e ingeniería de soldadura, así como, la generación de los datos de contención por el departamento de calidad.

El proceso de seguimiento además de cubrir todas las operaciones del WPS; consistía en llenar una lista de verificación para cada operación de soldadura como la que se muestra en la **Tabla 3.11**.

En este formato se enlistaban un total de 12 tanques de prueba, para un total de 4 rondas (48 tanques/semana por operador aproximadamente), los cuales antes de empezar la operación se verificaban variación de voltaje (fuera de tolerancia), flujo de gas, velocidad de alambre, si hubo algún retrabajo, limpieza de uniones y componentes, y anotar observaciones o recomendaciones al proceso (sugerencias).

Tabla 3.11 Formato utilizado para la verificación de las operaciones del WPS

Numero de ronda:										
Ronda	Muestra	Numero de Parte	Número de Serie	Punteador	Soldador	Flujo de gas	Voltaje	Velocidad de alambre	Retrabajo S/N	Llenado Mapa
1	1									
1	2									
1	3									
1	4									
1	5									
1	6									
1	7									
1	8									
1	9									
1	10									
1	11									
1	12									
Ronda	Muestra	Procedimiento de soldadura S/N	Limpieza/Sopleteo de uniones antes de soldar	Limpiar material en punteo con toalla	No uniones en radios o esquinas	Observaciones y comentario				
1	1									
1	2									
1	3									
1	4									
1	5									
1	6									
1	7									
1	8									
1	9									
1	10									
1	11									
1	12									

Lo anterior fue tomado como un método de control para la verificación del proceso y/o actualización del WPS, ya que la segmentación o estratificación de cada uno de los tanques hace posible un cambio en la forma de realizar el proceso ya que puede haber un mejor manejo de los datos.

Además del control de los parámetros del WSP y la limpieza de componentes en las operaciones de punteo y soldadura, fue necesario emplear un mapa de localización de la distribución de fugas en todo el tanque para determinar la frecuencia con la que aparece una fuga y el tipo de discontinuidad para cada segmento del mapa de localización.

El mapa de localización que se muestra en la **Figura 3.11**, fue distribuido tanto en las operaciones de soldadura (S1 y P1) como al inspector de calidad de la prueba de fugas. Esto con la finalidad de comparar la aparición de fugas en los retrabajos realizados en operaciones anteriores.

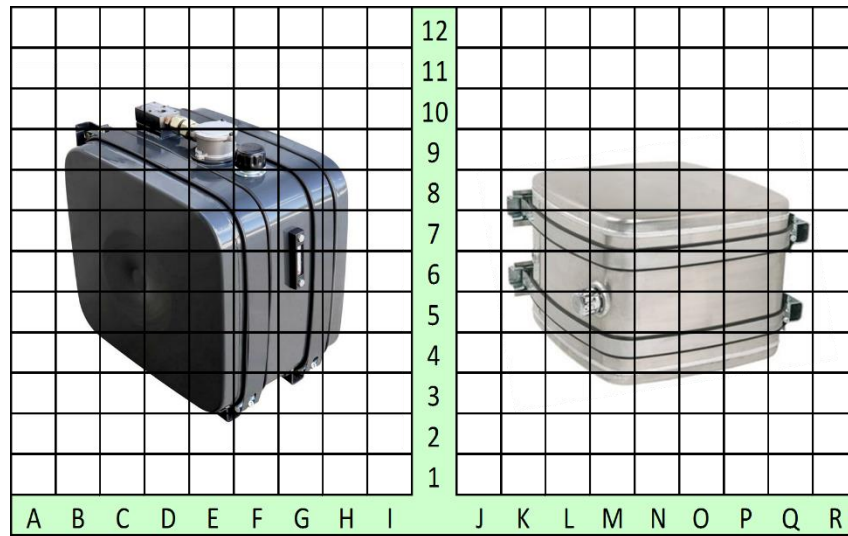


Figura 3.11 Ejemplo de mapa de localización para prueba de fugas y soldadura (30)

Teniendo en cuenta que algunas de las operaciones de soldadura se realizan como operaciones adicionales al punteo por distribución de cargas de trabajo, los segmentos del mapa de localización pertenecientes a estas operaciones fueron marcados con diferentes colores.

Lo anterior con la finalidad de tener un mayor control sobre la causa raíz de la fuga, esto es, que ninguna fuga fuera generada por error para cada uno de los operadores en cada una de las operaciones.

3.2.3.1 Resultados preliminares

Al concluir el periodo de prueba (primera etapa) los datos generados en la contención por el departamento de calidad, se analizaron un total de 21 tanques para los cuales se obtuvo un FPY de 95% un incremento en 7 puntos porcentuales para el número de parte 1A para las operaciones de S1, P1 y S1P1.

La única fuga presente fue una falta de fusión en la región F4 correspondiente a un cordón en una tapa. Es evidente que el apego en su mayoría al WPS es una forma efectiva de aumentar el indicador.

3.2.3.2 Segunda etapa de prueba

La segunda etapa del período de prueba consistió en realizar un segundo muestreo a las líneas de producción del turno de día y el turno de noche, así como la interacción entre ambos turnos, es decir, que la operación P1 pudiera ser soldada por el soldador S2 para las operaciones P1S2 y P2S1 como se muestra en la **Tabla 3.12**.

Tabla 3.12 Relación de operaciones de soldadura y punteo (30)

Turno		Día	Noche	Día	Noche
Turno	Operación	S1	S2	P1	P2
Día	S1	O	O	S1P1	S1P2
Día	P1	S1P1	S2P1	O	O
Noche	S2	O	O	S2P1	S2P2
Noche	P2	S1P2	S2P2	O	O

Los resultados del segundo muestreo se ven reflejados en la **Tabla 3.13**, en la cual se muestra la interacción entre ambos turnos y su FPY individual para cada una de las operaciones de soldadura, así como el detalle de cada una de las fugas relacionadas con soldadura y su localización (ver **Tabla 3.14**).

Tabla 3.13 Resultados combinados de la segunda etapa (30)

Operación	Total de tanques	Total de fugas en soldadura	FPY (%)	Total de fugas en ensamble	Detalle de fugas de ensamble
S1P1	71	4	94.36%	7	7 Tapa
S2P1	19	1	94.73%	4	3 Tapa 1 Tapón
S1P2	34	2	94.11%	7	7 Tapón
S2P2	56	4	92.85%	2	1 Tapón 2 Tapa
Gran total	180	11	93.88%	20	

Tabla 3.14 Localización detallada de fugas en soldadura (30)

PRIMERA FIGURA		
Localización	Frecuencia	Tipo de defecto
Hoja 1 de 2	B9	2 Falta de fusión
	D11	2 Falta de fusión
	F4	1 Falta de fusión
SEGUNDA FIGURA		
Localización	Frecuencia	Tipo de defecto
P9	1	Falta de Fusión
TERCERA FIGURA		
Localización	Frecuencia	Tipo de defecto
Hoja 2 de 2	D6	3 Poros
	F11	1 Poros

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y ANÁLISIS

En la primera etapa del período de prueba los resultados preliminares obtenidos dieron como resultado un 95% de FPY para un solo turno. Es evidente que la correcta aplicación y ejecución del WPS en las diferentes operaciones de inspección y soldadura tiene un impacto significativo sobre el indicador FPY. Basados en los resultados de la primera etapa, se modificaron algunos campos de la hoja de control ya que no se incluían operaciones de limpieza y retrabajo de componentes tanto en operaciones de punteo y soldadura. Los resultados obtenidos de las pruebas de inspección y seguimiento de la segunda etapa, dieron como resultado el aumento del indicador FPY en 5.88 puntos porcentuales, es decir un 93.88% contra un 88% del mes de Julio para el número de parte 1A.

En la segunda etapa además de las fugas relacionadas con procesos de soldadura, aumentaron significativamente las fugas relacionadas con defectos en los componentes como se muestra en la **Figura 4.1**. En esta se observa una apertura inherente en la rosca la cual se encuentra sobre el cordón de soldadura y no puede ser eliminada.

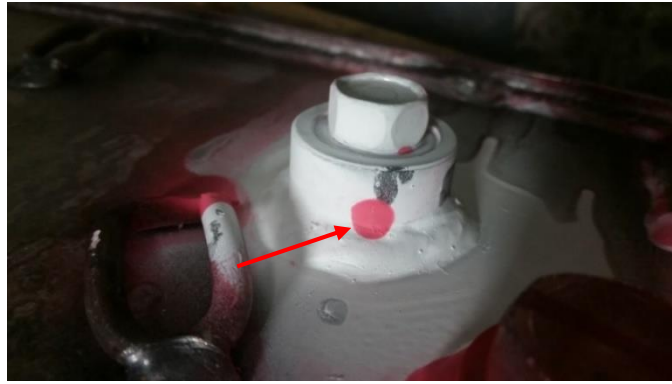


Figura 4.1 Defecto en componente revelado con líquidos penetrantes (30)

La presencia de esta discontinuidad en la rosca proveniente del fabricante externo, es un rubro que es cubierto por calidad de proveedores, que es una subdivisión del departamento de calidad que da seguimiento, genera una alerta de calidad y realiza la notificación al fabricante sobre el inconveniente. Otro problema recurrente en la segunda etapa de prueba fue en la tapa o subensamble que se muestra en la **Figura 4.2**.



Figura 4.2 Subensamble con distorsión en uno de sus vértices (30)

En este componente se presentó distorsión en gran parte de su superficie, por lo que, al momento de asegurar la tapa en el tanque, existía la posibilidad de no garantizar la hermeticidad y fugara por uno de sus vértices. En la **Figura 4.3** se muestra el vértice que presenta distorsión.



Figura 4.3 Cara frontal del vértice que presenta distorsión (30)

En la **Figura 4.4** se puede observar la distribución de las zonas afectadas por el calor las cuales no se encuentran uniformemente distribuidas por la secuencia de soldadura.



Figura 4.4 Cara anterior del vértice con distorsión (30)

Este problema puede ser manejado por una variedad de técnicas las cuales incluyen realizar una fijación rígida, aplicar disipadores de calor y cambios en la secuencia de soldadura. Teniendo en cuenta lo anterior, se emplearon unos sujetadores y unas piezas de metal las cuales hicieron el trabajo conjunto de aletas de enfriamiento (disipadores de calor) para el control de la distribución de calor (ver **Figura 4.5**).



Figura 4.5 Control de la distorsión por fijación rígida y disipación de calor (30)

El ciclo total de soldadura para este subensamble se estimó en 40 minutos para realizar una etapa de enfriamiento entre cada paso de la secuencia de soldadura que duraba 10 minutos aproximadamente. Debido a que los tiempos de línea eran muy elevados para la soldadura del subensamble, se procedió a construir un aditamento el cual fijaba el componente a una placa de metal que actuaba como disipador de calor (ver **Figura 4.6**), con el fin de disminuir las etapas de enfriamiento entre cada paso y así acortar los tiempos de soldadura para este componente.



Figura 4.6 Fijación rígida del subensamble para la secuencia de soldadura (30)

En la **Figura 4.7** se observa la disminución de 5 mm a 1 mm del ángulo de distorsión con respecto a la superficie de la tapa, la cual se encuentra dentro de las tolerancias de diseño.



Figura 4.7 Vista lateral del subensamble (30)

Después de realizar varias pruebas variando el tiempo entre las etapas de enfriamiento utilizando el nuevo aditamento, se obtuvo una disminución en el tiempo total de ciclo de 20 minutos aproximadamente y un aproximado de 10 a 7 minutos entre cada etapa de enfriamiento de la secuencia de soldadura.

4.1 Ensayo en condiciones de operación

La validación del procedimiento, así como la certificación del personal en los diversos procesos de soldadura, son indispensables para el control de la calidad dentro de la fábrica y hacia el cliente.

Estas prácticas tienen que ser ejecutadas y supervisadas por personal calificado en el área que se desea realizar la validación. Dentro de los muchos procedimientos, formatos y metodologías, el uso de procedimientos precalificados, ensayos destructivos y no destructivos se han convertido en una de las formas más eficientes de realizar dicha validación.

Es por ello que dentro del presente trabajo y con el fin de comparar las condiciones óptimas de operación (WPS) y las condiciones de trabajo reales, se evaluaron algunos aspectos del manual de operaciones entre los cuales figuran los parámetros de operación que se muestran en la **Tabla 3.10**, la aplicación del líquido antisalpicadura y la limpieza de componentes.

En primer lugar se evaluó la composición del metal base para saber si coincidía con la especificación de la empresa para un acero ASTM A752 grado 40 y grado 50, para lo cual se realizó un análisis de emisión óptica cuyos resultados se muestran en la **Tabla 4.1**.

Tabla 4.1 Resultados del análisis de espectrometría de emisión óptica

C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo	Cu	V	Nb	Ti	W
0.17	0.82	0.018	0.006	0.04	<0.04	0.02	<0.01	0.034	<0.004	<0.004	<0.004	<0.002

Los resultados de la composición nominal corresponden a la composición de un acero de baja aleación y alta resistencia (HSLA) según la especificación ASTM A572 mostrados en la **Tabla 2.1**.

El incremento en el valor del carbón equivalente (CE) para aceros al carbono y aceros de baja aleación, puede ser calculada con la **Ecuación 4.1**, la cual considera la soldabilidad y los requerimientos permitidos en la especificación de la planta.

El carbón equivalente fue determinado por la ecuación del IIW dando un valor de 0.3176.

$$CE(IIW) = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cu + Ni}{15} + \frac{Cr + Mo + V}{5} \quad \text{Ec. 4.1}$$

$$CE(IIW) = 0.17 + \frac{0.82}{6} + \frac{0.034 + 0.04}{15} + \frac{0.02 + 0.01}{5}$$

$$CE(IIW) = 0.3176$$

La relación entre la soldabilidad y el contenido de carbono puede ser visualizado en la **Figura 4.8** (punto amarillo).

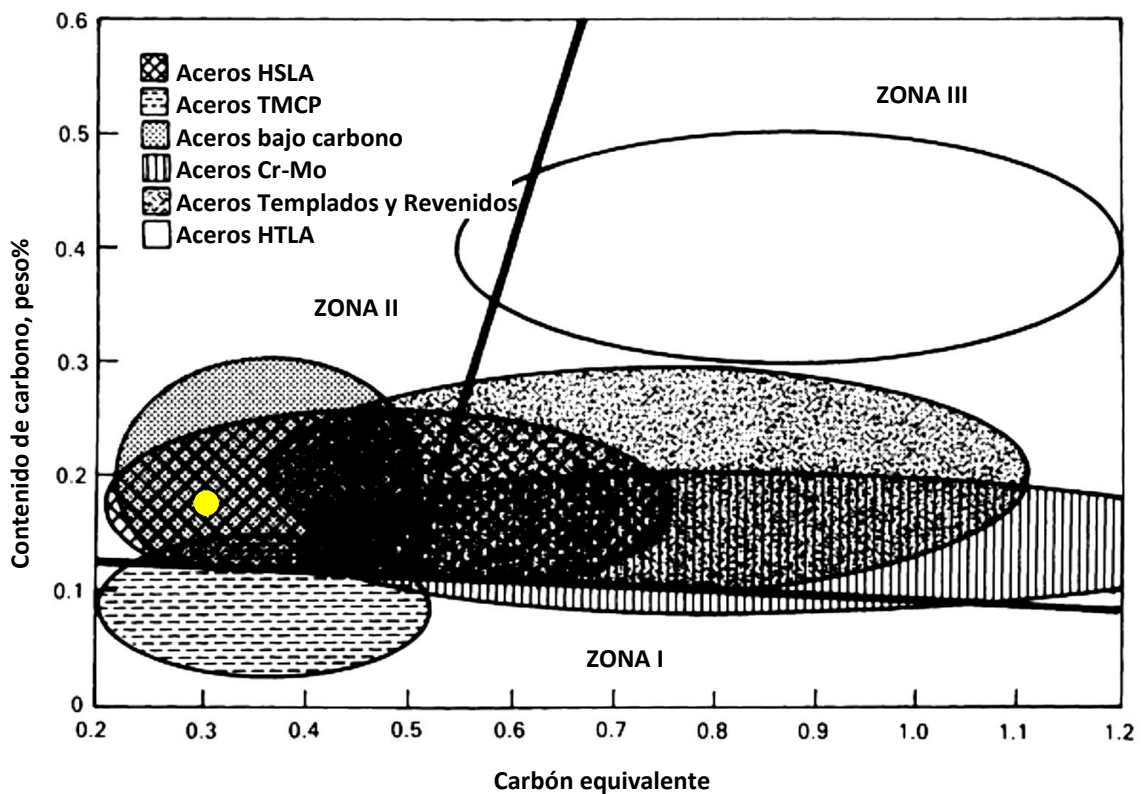


Figura 4.8 Diagrama de Graville sobre el grado de soldabilidad y su relación con el contenido de carbono y el carbón equivalente (35)

En la **Figura 4.8** se observa que el punto amarillo se encuentra en la zona II que es un área soldable bajo cuidados especiales. Los aceros de la zona II tienen mayor contenido de carbono y baja capacidad de endurecimiento. Por lo tanto, es posible evitar agrietamiento en la microestructura como resultado de las altas velocidades de enfriamiento de la ZAC. Esto se puede lograr a través del control de la entrada de calor, y en menor medida, con precalentamiento (47).

Otro de los elementos de mayor importancia para realizar la coalescencia entre el metal base y el material de aporte es la compatibilidad entre la composición química entre ambos materiales.

Es por ello que de acuerdo a la especificación de la empresa, la cual a su vez, hace referencia a la especificación AWS A5.18 (18) la cual se refiere a las especificaciones del material de aporte para aceros al carbono para los procesos GMAW y GTAW. En la **Tabla 4.2** se muestra la composición química del electrodo ER70-3 utilizado en la especificación de la empresa.

Tabla 4.2 Composición química nominal [% e. p.] del electrodo ER70S-3

C %	Mn %	P %	S %	Si %	Ni %	Cr %	Mo %	Cu%
0.06-0.15	0.90-1.40	0.025	0.035	0.45-0.75	-	-	-	0.50

Como se puede observar, la composición química del metal base (ver **Tabla 4.1**) y el electrodo (ver **Tabla 4.2**) son muy parecidas entre sí. Por lo que, es una opción factible para realizar una buena coalescencia entre estos dos materiales.

Para replicar las condiciones óptimas y reales de trabajo en la planta, además de la compatibilidad del metal base y el material de aporte, se utilizaron los mismos parámetros descritos en la especificación de la empresa del manual de operaciones los cuales se muestran en la **Tabla 3.10**

Las únicas variables en el procedimiento fueron la limpieza y el operador. El diseño de las juntas fue en unión tipo T en filete de 3 mm y posición horizontal. Se elaboraron 2 cupones para realizar las pruebas correspondientes. Ambas piezas fueron soldadas con los parámetros anteriormente descritos. La variación entre cada uno de los procedimientos fue la limpieza y la aplicación del líquido antisalpicadura.

La pieza “A” fue preparada limpiando la superficie del recubrimiento anticorrosivo con una toalla de limpieza. Después de esto se realizó el arreglo de la junta en T, fijando ambas placas con unas pinzas (semejantes a las que se utilizan en la planta) y rociándolas con el líquido antisalpicadura. Posteriormente, se procedió a dejar secar el líquido y se eliminó cualquier rastro de humedad utilizando aire seco comprimido. Por último, se procedió a soldar ambas placas y se dejaron enfriar al aire libre sin tratamiento posterior a la soldadura.

La descripción anterior corresponde a las indicaciones generales del WPS mencionadas en la especificación de la empresa para la soldadura de placas de $\frac{1}{4}$ " de los tanques hidráulicos. Estas condiciones "óptimas" de soldadura, garantizan la calidad de la unión soldada bajo estas condiciones; sin embargo, se tiene que señalar que el uso de líquido antisalpicadura es un tema debatido por lo que su uso no se describe como opcional en el manual de operaciones. En la **Figura 4.9** se muestran el MB, la ZAC y el MS de la muestra A.

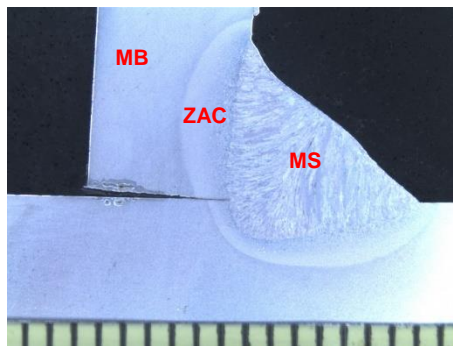


Figura 4.9 Corte de la sección transversal de la muestra A

La muestra B se soldó bajo los mismos parámetros de operación, aunque solo se modificaron algunas condiciones de aplicación y limpieza. En esta segunda muestra no se realizó ninguna operación de limpieza, la aplicación del líquido antisalpicadura fue directo en la junta y sin tiempo de secar manteniendo una humedad relativa en toda la superficie de contacto. Los resultados gráficos de esta segunda muestra se pueden visualizar en la **Figura 4.10**.

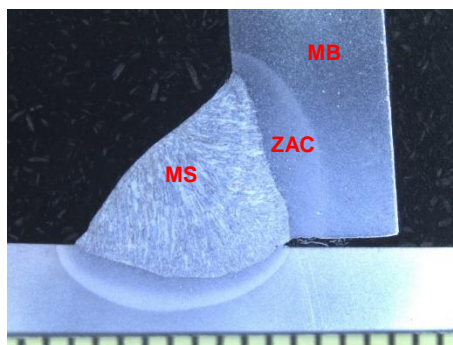


Figura 4.10 Corte de la sección transversal de la muestra B

En la **Figura 4.11**, se muestra la morfología del corte de la sección transversal del cordón de soldadura analizada por MEB. En la cual se puede observar una superficie homogénea y una disminución de inclusiones de escoria, óxido y porosidad superficial, señaladas en color amarillo.

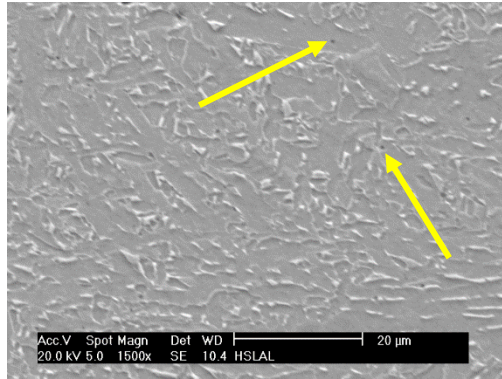


Figura 4.11 Imagen de electrones secundarios que muestra la microestructura del metal de soldadura de la muestra A

La muestra B analizada por MEB, muestra un aumento en la porosidad, la escoria y el óxido superficial en el MS como se puede observar en la **Figura 4.12** señaladas en color amarillo.

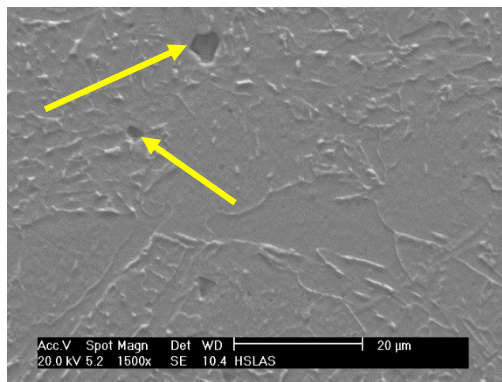


Figura 4.12 Imagen de electrones secundarios que muestra la microestructura del metal de soldadura de la muestra B

Los ensayos de microdureza fueron realizadas en dos secciones perpendiculares al cordón de soldadura como se muestra en la **Figura 4.13**.

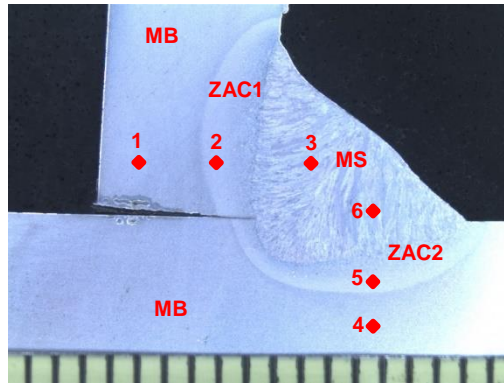


Figura 4.13 Zonas indentadas en la unión soldada. MS, MB, ZAC1 y ZAC2

En la **Figura 4.14**, se muestran los perfiles de microdureza de ambas muestras. Como se puede observar la muestra B presenta una disminución en la dureza en varias zonas de evaluadas, en comparación con la muestra A. Lo anterior puede ser el resultado de la formación de inclusiones de escoria, óxidos frágiles y gases atrapados debido a la ionización del agua y el surfactante presentes en el líquido antisalpicadura.

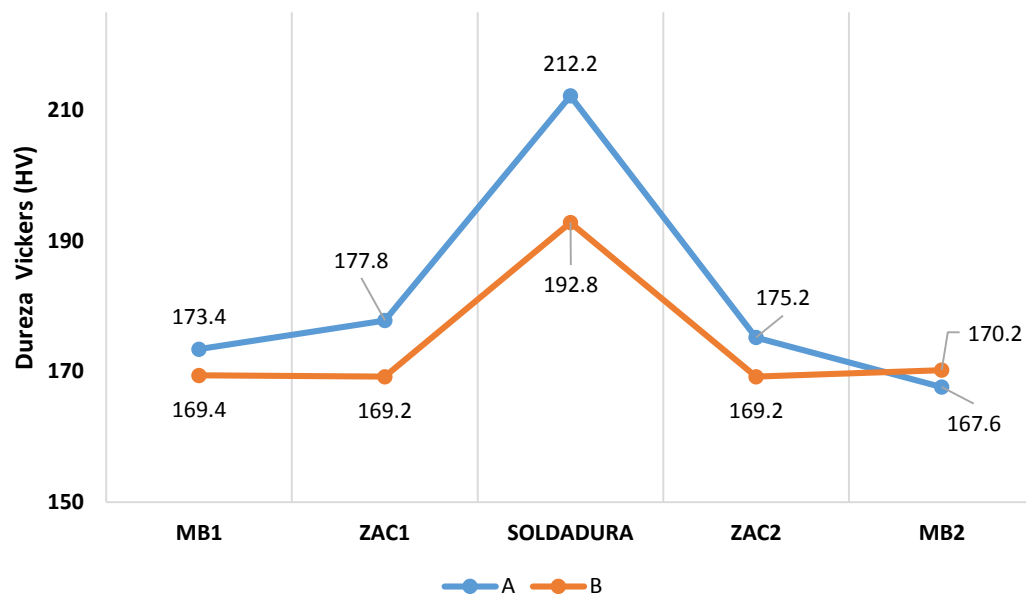


Figura 4.14 Perfil de dureza del ensayo de las condiciones de operación reales e ideales

Es evidente que el uso y la aplicación de líquido antisalpicadura y la limpieza de la junta juegan un papel significativo pero efectivo sobre la dureza de la unión soldada. Si bien su uso está limitado como una práctica recomendada, sería de gran utilidad realizar un estudio a fondo sobre el uso, consecuencias y posibles cambios en su implementación en el WPS.

Asimismo, la limpieza de la junta anterior a la soldadura, puede disminuir el efecto que se tiene al reducir la formación de escoria residual en el ciclo de soldadura. En las micrografías anteriormente expuestas, se observan una serie de huecos superficiales, lo cuales por causas ajenas al estudio no se pudo realizar un estudio puntual para saber su composición y así descartar la aparición de microporosidad.

4.2 Implementación de un plan de mejora

Con el fin de cumplir con los estándares de calidad y expectativas del cliente, se deben de evaluar cada una de las posibles causas raíz que ocasionan una disminución en el indicador para la prueba de fugas. En este sentido, el indicador tiene dos factores vitales que afectan su ponderación: el proceso de manufactura y el proceso detección.

4.2.1 Procesos de manufactura

En primer lugar, las causas que originan la aparición de defectos y/o discontinuidades en las operaciones que involucran procesos de soldadura, entre las cuales figuran la mano de obra, el medio ambiente, la materia prima, la maquinaria o equipo utilizado y la metodología empleada.

Los datos resultantes del período de prueba apuntan a que aproximadamente el 94% del indicador FPY corresponde a la mano de obra, es decir, que la calificación del procedimiento, certificación del soldador y la correcta ejecución del WPS garantizan resultados favorables sobre la calidad del producto. El objetivo planteado podría ser alcanzando si y solo si cada una de las anteriores variables pudieran ser controladas de una forma más minuciosa.

Dentro de las recomendaciones en los procesos de calidad en el área de manufactura se pueden implementar algunas recomendaciones como:

- Capacitaciones periódicas para la llegada de un nuevo número de parte, así como la capacitación de soldadores a cargo de personal calificado de diferentes áreas que cubran los requisitos de seguimiento del producto, calidad, procesos y procedimientos de soldadura
- Ejecutar al 100% el WPS para cada operación de soldadura
- Evaluación de los procedimientos de soldadura y secuencias de soldadura en todos los turnos activos
- Mantener la rotación del personal al mínimo, excepto cuando la producción aumente y los tiempos de línea sean más cortos
- Realizar juntas de mejora sobre problemas con maquinaria, por ejemplo: calibración, variación de voltaje, problemas con el alimentador de alambre, flujo de gas variable, etc.
- Recordar al personal la importancia de su trabajo hacia él, la empresa y el cliente

Estas recomendaciones son algunas de las más importantes con las que el porcentaje del indicador se mantendría en un 94%. Por otro lado, algunas de las prácticas de manufactura recomendadas para la aplicación de soldadura que no se encuentran en el WPS son:

- Realizar la limpieza de los componentes para las operaciones de punteo, la cual incluye la limpieza del recubrimiento anticorrosivo que cubre las placas del metal base **Figura 4.15** .
- En caso de existir humedad en el metal base, removerla hasta que esté completamente seco. El líquido antisalpicadura es un surfactante humectante lipófilo que cuando se disuelve en agua hace disminuir el ángulo de contacto, mojando o humectando mayor proporción de superficie. Se utiliza para evitar que el chisporroteo del material fundido se adhiera al metal base causando un defecto en este.



Figura 4.15 Antioxidante de placas (base aceite) (30)

- Dentro de los usos incorrectos del líquido destacan: la aplicación directa en la junta, utilizar después de realizar el cordón de soldadura (choque térmico), el uso del líquido sobre superficies sucias dan como resultado la creación de lodos que son más difíciles de remover con el gas de protección y/o agentes desoxidantes, es por ello que la limpieza es un paso esencial del proceso (ver **Figura 4.16** y **Figura 4.17**).



Figura 4.16 Líquido antisalpicadura (30)

- El éxito de la aplicación de líquido no garantiza que no existan remanentes de la salpicadura sobre el metal base; sin embargo, seguir algunas de las indicaciones anteriores garantizan una disminución de estas incidencias.



Figura 4.17 Líquido antisalpicadura sobre metal base (30)

Los resultados obtenidos en la segunda etapa del periodo de prueba que considero solo un numero de parte arrojó resultados positivos, por lo que, es recomendable realizar las mismas prácticas con el resto de las líneas de producción.

Los requerimientos de producción y manufactura para cada uno de los diseños de línea tienen que considerar diferentes procesos los cuales incluyen: manejo y disposición de equipo, control de la calidad, proceso de manufactura, etc. Estas prácticas recomendadas garantizan una ejecución adecuada y un aseguramiento de la calidad en todo el proceso, disminuyendo retrabajos en el proceso de manufactura y robusteciendo los indicadores de calidad como es el FPY.

4.2.2 Proceso de detección de fugas.

Los métodos y técnicas de detección de fugas son una de las partes más importantes en los procesos de soldadura de este tipo de productos. Sin embargo, estos métodos no pueden ser utilizados como un sistema de contención, más bien como un método integral de control de calidad o un método de apoyo para la verificación del procedimiento de auditoria. En este sentido, en la actualidad existen una gran diversidad de métodos que cumplen diversas funciones o están enfocados a diferentes sistemas de producción, ya sea para la verificación de hermeticidad en tanques de aire o en sistemas hidráulicos para tanques de almacenamiento de aceite como es el caso de la empresa.

La aplicación y la sensibilidad son los dos factores más importantes que influyen en la selección del método que se va a utilizar. Si bien dependiendo es cierto que el grado de sensibilidad tiene gran impacto en el proceso de control de calidad, también lo tiene en el costo de producción total.

El empleo de sistemas de detección más sensibles que implican la combinación de más de un método convencional de detección, así como instrumentación más sofisticada lo que aumenta el costo total de producción. Tal es el caso del sistema térmico-sensorial, el cual emplea una cámara infrarroja utilizando como principio: que el calor es uniforme en todo el cordón de soldadura y los lugares donde existe una probable fuga tendrán diferente temperatura al resto del metal de soldadura.

Si bien es cierto que el principio aplica a sistemas de gran tamaño, su aplicación queda limitada para sistemas donde los cordones de soldadura son menores a 3mm de espesor. La sensibilidad de los sensores infrarrojos es mínima como se puede observar en la **Figura 4.18**, ya que dificulta una lectura concluyente. Por lo que sería necesario implementar otro sistema de detección para complementar la prueba.

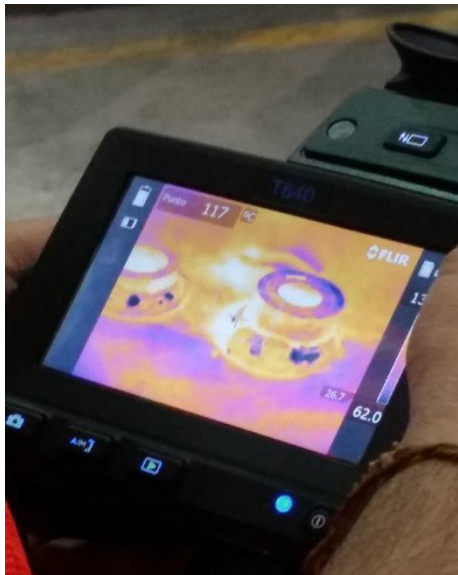


Figura 4.18 Imagen infrarroja del metal de soldadura de un componente del tanque A1 (30)

En la actualidad, en la planta se utiliza el método de inmersión en solución detergente con líquido antioxidante, el cual es una variante del método tradicional de burbuja. Este método tiene una sensibilidad de $1 \cdot 10^{-5}$ (mbar·l)/s lo que lo hace adecuado para sistemas muy grandes como lo son los tanques hidráulicos.

El método tiene un 85 a 90 % de efectividad en la detección de la fuga, además de ser un sistema capaz, económico y de fácil acceso. Sin embargo, como todo proceso de detección necesita mantenimiento en el que se incluyen el cambio de agua, lavado e inspección del tanque de pruebas.

Con el fin de mejorar la efectividad del método empleado en la planta se pueden emplear las siguientes recomendaciones:

- Capacitación sobre la importancia de la detección de fugas
- Robustecer el sistema de detección empleando más de una línea de detección
- Aumentar la capacidad del tanque de pruebas
- Implementar un sistema de llenado y vaciado para del agua empleada
- Utilizar un antioxidante libre de color
- Emplear un tanque con paredes cristalinas con la finalidad de tener una mejor visibilidad de la fuga
- Las condiciones medioambientales como la iluminación pueden ser mejoradas con el empleo de lámparas o reflectores de mayor potencia
- La temperatura del tanque debe rondar los 25°C, debido a que, si ésta disminuye, a presión del gas también lo que dificultaría percibir la fuga
- Utilizar aire comprimido seco, la molécula de aire húmedo tiene un radio atómico mayor lo que dificultaría el libre paso por una fuga.
- La calibración de los manómetros debe ser periódica

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES

El proyecto presentado para el proceso de detección de fugas, en la empresa representa un ejemplo de la efectividad de realizar un análisis a fondo para identificar una solución sencilla y rentable en términos económicos para obtener una mejora significativa al sistema como conjunto.

Al definir las características que regían el funcionamiento anterior de la estación de trabajo y al analizar las causas que originaban la aparición de discontinuidades en las operaciones de manufactura, la solución propuesta se hizo evidente. Sin embargo, la propuesta, no es sino preliminar en el proceso de mejora. La propuesta presentada constituyó únicamente en la creación de una práctica de manufactura recomendada que, al cumplirse, asegurarían el beneficio proyectado.

Los procesos de fusión al igual que otros procesos de soldadura, están ligados a la aparición de defectos anteriormente descritos. Estos defectos pueden ser perjudiciales en aplicaciones como la presentada en el proyecto de fugas.

Las faltas de fusión y la porosidad fueron las discontinuidades que más tuvieron significancia en todos los meses del periodo de prueba lo cual significaba una tendencia lineal del indicador FPY de un 85%.

El seguimiento de los tanques de prueba, así como la verificación de la secuencia para la aplicación de la soldadura fue definida por el WPS de la especificación de la empresa.

Los datos generados en el periodo de prueba para el número de parte 1A muestran que la correcta secuencia de soldadura y aplicación del WPS por parte del personal calificado, bastan para aumentar el indicador FPY 5 puntos porcentuales en promedio.

El control de calidad preciso juega un papel vital en la producción general de la planta, ya que su empleo y manejo adecuado aseguran las relaciones y prestigio de la planta.

Con el fin de robustecer y mejorar el método de detección de fugas, se compararon diferentes métodos los cuales dependen de dos factores primordiales: el costo y la sensibilidad.

Bibliografía

1. Czekaj, Daniel. *Aplicaciones de la ingeniería: Maquinaria hidráulica en embarcaciones pesqueras pequeñas*. s.l. : Food & Agriculture Org., 1988. pág. 187. 9253026987, 9789253026982.
2. Alvarez Vilchis, Dionisio. Manual de Hidráulica y Neumática: Automatización, actuadores y válvulas. *Google Books*. [En línea] 12 de Junio de 2014. [Citado el: 15 de Marzo de 2015.] https://books.google.com.mx/books?id=bsfHAAQBAJ&dq=tanque+HIDRAULICO&source=gs_navlinks_s.
3. De las Heras Jiménez, Salvador. *Fluidos, bombas e instalaciones hidráulicas*. Catalunya : Universitat Politècnica de Catalunya. Iniciativa Digital Politècnica, 2011. pág. 411. Technology & Engineering. 8476538936, 9788476538937.
4. Mott, Robert L., y otros. *Diseño de elementos de máquinas*. s.l. : Pearson Educación, 2006. pág. 872. Technology & Engineering. 9702608120, 9789702608127.
5. ASM International. Introduction to Steels and Cast Irons. *Metallographer's Guide: Irons and Steels*. 2002, 1, págs. 8-12.
6. American Society for Metals International. High-Strength Low-Alloy Steels. *Alloying: Understanding the basics*. s.l. : ASM International, 2001, págs. 1-2.
7. Somers, Bruce R. Introduction to the Selection of Carbon and Low-Alloy Steels. *ASM Handbook Welding, Brazing, and Soldering* . s.l. : ASM International, 1993, Vol. 6, págs. 405-407.
8. ASM International. Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys. *ASM Handbook*. 1993, Vol. 1, págs. 1011-1039.
9. ASM International Handbook Committee, the material information Society. *ASM Handbook. HSLA Steels*. 10. 1990, Vol. I, págs. 398-423.
10. SAE. SAE J1392 Steel, High Strength, Hot Rolled Sheet And Strip, Cold Rolled Sheet, And Coated Sheet. *SAE Handbook: Recommended Practice*. 1990, Vol. I, págs. 1145-1148.
11. Fletcher, E. E. *High-Strength Low-Alloy Steels: Status Selection and Physical*. s.l. : Battele Press, 1979.
12. Bain, E. C. y Paxton, H. W. *Alloying Elements in Steel*. 2nd. s.l. : American Society for Metals, 1961.
13. Davis, Joseph R. *Alloying: Understanding the Basics*. s.l. : ASM International, 2001. pág. 647. Technology & Engineering. 1615030638, 9781615030637.
14. *Proceedings of Symposium on Low Alloy High Strength Steels*. Korchynsky , M. y Stuart, H. Nuremberg : s.n., 1970, pág. 17.

15. Sage, A. M. *HSLA Steels: Processing properties and applications*. Beijing : The Minerals, Metals and Materials Society, 1990. págs. 53-60.
16. *Microalloying'75*. Mayer, L., Heisterkamp, F. y Mueschenbon, W. New York : Union Caribe, 1976. págs. 153-167.
17. American Welding Society. *ANSI/AWS Filler Metal Specifications*. 1979-1992.
18. AWS. *Welding Handbook*. s.l. : American Welding Society, 2009. págs. 50-62. Vol. 2.
19. Sandberg Thomsen, Jasper. *Advanced control methods for optimization of arc welding, Thesis*. Department of control engineering, Aalborg University : s.n., 2004.
20. Rao. *Manufacturing Technology : Foundry, Forming & Welding*. s.l. : Tata McGraw-Hill Education, 2001. 0074631802/9780074631805.
21. Lucas, W, Iordachescu, D y Ponomarev, Viktor. *Review the classification of metal transfer*. 2005. Vols. IIW Doc. No. XII-1888-06.
22. *Steps toward a new classification of metal transfer in gas metal arc welding*. 22 de 10 de 2007, Journal of materials processing technology, In press, corrected proof.
23. American Welding Society. *Manual de Soldadura*. [ed.] R. L. O'Brien. [trad.] Roberto Escalona Garcia. Octava. Naulcalpan : Prentice-Hall Hispanoamerica, S.A., 1996. págs. 1-49. Vol. I. 968-880-767-2, 968-880-766-4.
24. C5.10/C5.10M. *Recommended practices for shelding gases for welding*. 2003.
25. *Experimental research of the effect of hydrogen in argon as a shielding gas in arc welding of high-alloy stainless steel*. Tusek, J y Suban, M. 2000, International Journal of Hydrogen Energy, págs. 369-376.
26. American Welding Society. *ANSI-AWS QC1-96 : Standard for AWS Certification of Welding Inspectors: Supersedes QC1-88*. 15. Miami : American Welding Society, 1996, pág. 11.
27. AWS. *QC 2-93: Recommended Practices for the Training Qualification*. Miami : American Welding Society, 1993, pág. 8.
28. CEPA SCC working Group. *Stress Corrosion Cracking – Recommended Practices*. 1997.
29. Molera Solá, Pere. *Soldadura industrial: Clases y aplicaciones*. Barcelona : Barcelona Macombo, 1992.
30. La Empresa. La Empresa México S.A. de CV. *La Empresa Corporation*. [En línea] 15 de 12 de 2014. [Citado el: 15 de 01 de 2015.] www.laempresa.com/es_MX.html.
31. *Efecto del procedimiento de soldadura sobre las propiedades de uniones soldadas de aceros microaleados para cañería*. Zalazar Raíz, Monica; Rissone; Rissione, Mabel; Estela, S.; Bruna, Roberto, & Baralla, Esteban. 1, 2009, Soldagem & Inspeção, Vol. 14, págs. 36-46.
32. Hoffman, David, Dahle, Kevin y Fisher, David. *Welding*. 1. s.l. : Prentice Hall, 2011. págs. 74-130.
33. Jeffus, Larry. *Soldadura principios y aplicaciones*. 5. España : Paraninfo S.A., 2009. pág. 944.

34. American Welding Society. Committee on Methods of Inspection, American Welding Society. Technical Activities Committee, American National Standards Institute. Guide for the nondestructive inspection of welds: ANSI/AWS B1.10-86R. 2. s.l. : American Welding Society, 1985, pág. 34.
35. ASM. ASM Handbook. *Welding, Brazing, and Soldering*. s.l. : ASM International, 1993, Vol. 6, 1, págs. 15-247.
36. *Analysis of the gas-shielded consumable metal arc*. Amson, J. C. y Salter, G. R. s.l. : BR. WELD. J., 1963, Vol. X, págs. 472-483.
37. *Heat and mass transfer in gas metal arc II: the metal*. Hu, J. y Tsai, H. L. 50, s.l. : Elsevier, 2006, International Journal of Heat and Mass Transfer, págs. 808-820.
38. *Heat and mass transfer in metal arc welding Part I: The arc*. Hu, J. y Tsai, H. L. 50, s.l. : Elsevier, 2006, International Journal of Heat and Mass Transfer, págs. 833-846.
39. ASM International. *ASM Handbook: Nondestructive Evaluation and Quality Control*. s.l. : ASM Handbook Committee, 1992. Vol. 17. 0871700077 (v. 1).
40. *Leak Detection Methods and Defining the Sizes of Leaks*. Pregelj, Andrej, Andrej, Marjan y Mozetic, Miran . Ljubljana, Slovenia : s.n., 1997. The 4th International Conference of Slovenian Society for Nondestructive Testing "Application of Contemporary Nondestructive Testing in Engineering". Vol. 4.
41. Ryan, J. L. y Roper, D. L. *Process vacuum system, design and operation*. New York : McGraw-Hill Book Company, 1986. págs. 156-210. 978-0070543553/0070543550.
42. Harris, Nigel. *Modem vacuum practice*. Berkshire, England : McGraw-Hill Book Company Europe, 1989. págs. 111-134. 0077070992/978-0077070991.
43. *Real leaks and real leak detection, Vacuum*. Beavis, L. C. 6, London, England : s.n., 1970, Pergamon Press, Vol. 20, pág. 233.
44. American Society of Mechanic Engineers. Nondestructive Examination. *Boiler & Pressure Vessel Code Section V, Leak Testing* . New York : s.n., 2010.
45. Varian Associates. Lexington Vacuum Division. *Introduction to Helium Mass Spectrometer Leak Detection*. s.l. : Varian Associates, 1980. Original from the University of California.
46. Lafferty, J. M. *Foundations of Vacuum Science and Technology*. New York : John Wiley & Sons, 1998.
47. Davis, Joseph R., [ed.]. *Corrosion of Weldments*. s.l. : ASM International, 2006. págs. 34-40. 1615030514, 9781615030514.
48. *Humping Formation in High Current GTA Welding*. Mendez, Patricio F., Niece, Krista L. y Eager, Thomas W. Cincinnati, OH : MIT, Cambridge, MA, 1999. In proceedings of the International Conference on Joining of Advanced and Speciality Materials II. pág. 8.

Índice de tablas

	Página
Tabla 2.1 Composición química nominal de los aceros HSLA [% e. p.] (7)	20
Tabla 2.2 Aplicaciones de los aceros HSLA descritos en las especificaciones ASTM (9)	22
Tabla 2.3 Selección de consumibles para soldar aceros estructurales HSLA (9)	27
Tabla 2.4 Composición química nominal [%e. p.] y rangos de dureza para aceros estructurales HSLA (9)	28
Tabla 2.5 Propiedades de los elementos microaleantes (13)	35
Tabla 2.6 Efecto de los elementos de aleación (15)	37
Tabla 2.7 Temperaturas mínimas de precalentamiento e interpasos para la soldadura de aceros estructurales usando procesos de soldadura de bajo hidrógeno (9)	43
Tabla 2.8 Composición química nominal de un acero A 572 (9).....	44
Tabla 2.9 Propiedades mecánicas de un acero A 572 (9)	44
Tabla 2.10 Corrientes de transición de globular a aspersion para diversos electrodos (18)	53
Tabla 2.11 Especificación para diversos electrodos para GMAW (23).....	55
Tabla 2.12 Electrodos recomendados para GMAW (23)	56
Tabla 2.13 Contenido de pureza y humedad de gases de protección (18)	58
Tabla 2.14 Propiedades de los gases de protección utilizados en soldadura (18)	58
Tabla 2.15 Gases protectores para transferencia en cortocircuito en GMAW (18)	64
Tabla 2.16 Gases protectores para transferencia por aspersion en GMAW (18)	64
Tabla 2.17 Voltajes de arco típicos del proceso GMAW de diversos metales ^a (18)	66
Tabla 2.18 Discontinuidades en soldaduras depositadas con diferentes procesos (34)	104
Tabla 2.19 Principales discontinuidades en el proceso GMAW (23)	107
Tabla 2.20 Continuación (23)	108
Tabla 2.21 Localización de problemas de proceso que pueden presentarse en GMAW (23)..	109
Tabla 2.22 Localización de problemas mecánicos que pueden presentarse en GMAW (23) ..	110
Tabla 2.23 Localización de problemas eléctricos presentes en el proceso GMAW (23)	111
Tabla 2.24 Condiciones de soldadura (38).....	116
Tabla 3.1 Cuantificación de defectos en rechazos para prueba de fugas (30)	149
Tabla 3.2 Número total de piezas producidas por número de parte (30).....	150
Tabla 3.3 Análisis estadístico del número de tanques aceptados/producidos (30)	151
Tabla 3.4 Análisis del número de tanques aceptados/producidos por soldador (30)	153
Tabla 3.5 Generaciones del 80-20% para prueba de fugas (30)	156

Tabla 3.6 Datos para fuga en tanques FPY del mes de Julio (30).....	157
Tabla 3.7 Localización detallada de los defectos más frecuentes en prueba de fugas (30)	158
Tabla 3.8 Matriz de operaciones para el equipo amarillo (30)	161
Tabla 3.9 Relación de soldadores con en el número de parte 1A (30)	163
Tabla 3.10 Parámetros generales de operación (30)	164
Tabla 3.11 Formato utilizado para la verificación de las operaciones del WPS	165
Tabla 3.12 Relación de operaciones de soldadura y punteo (30).....	167
Tabla 3.13 Resultados combinados de la segunda etapa (30)	167
Tabla 3.14 Localización detallada de fugas en soldadura (30)	167
Tabla 4.1 Resultados del análisis de espectrometría de emisión óptica	173
Tabla 4.2 Composición química nominal [% e. p.] del electrodo ER70S-3.....	175

Índice de figuras

	Página
Figura 2.1 Representación gráfica del principio de Pascal en (a) Tubería de sección regular y (b) Tubería de sección irregular (1)	8
Figura 2.2 Sistema hidráulico básico (2)	8
Figura 2.3 Tanque hidráulico no presurizado (2)	12
Figura 2.4 Tanque presurizado (4).....	14
Figura 2.5 Tanque no presurizado (4).....	15
Figura 2.6 Simbología de los tanques hidráulicos según ISO para (a) Tanque no presurizado y (b) Tanque presurizado (4).....	15
Figura 2.7 Bomba hidráulica (4)	16
Figura 2.8 Ejemplo de sistema hidráulico en excavadora (2)	18
Figura 2.9 Resultados del ensayo Charpy V en acero de medio carbono (ASTM A283 grado D), acero HSLA y un acero estructural con tratamiento térmico (8)	21
Figura 2.10 Clasificación de los aceros HSLA (8).....	24
Figura 2.11 Endurecimiento por solución sólida de ferrita (9)	31
Figura 2.12 Efecto de la adición de manganeso sobre la fase austenita (12).....	32
Figura 2.13 Efecto del contenido de cromo en el tamaño de campo de la fase austenita (8)....	33
Figura 2.14 Efecto del vanadio en la transformación y estructura de los aceros HSLA (15)	35
Figura 2.15 Efecto del niobio en la transformación y estructura de los aceros HSLA (15)	36
Figura 2.16 Efecto del titanio en la transformación y estructura de los aceros HSLA (15)	37
Figura 2.17 Proceso de Soldadura GMAW (18)	45
Figura 2.18 Configuración estándar del equipo para el proceso GMAW (18)	48
Figura 2.19 Perfil de depósito de metal para la transferencia por cortocircuito (18)	49
Figura 2.20 Mecanismo de transferencia típica por corto circuito asociada con la corriente de salida de la soldadura (18)	50
Figura 2.21 Perfil de depósito de metal por transferencia globular (18).....	51
Figura 2.22 Perfil de depósito de metal para la transferencia por rociado (18).....	52
Figura 2.23 Perfil de penetración para diferentes gases de protección (18)	59
Figura 2.24 Efecto de la adición de oxígeno vs CO ₂ al argón de protección (18)	60
Figura 2.25 Extensión del electrodo (18)	69
Figura 2.26 Efecto de la posición del electrodo y de la técnica de soldadura: (a) Técnica de derecha, (b) Soplete perpendicular y (c) Técnica de revés (23)	70
Figura 2.27 Ángulo de trabajo normal para soldaduras de filete (23).....	71

Figura 2.28 Efecto de la inclinación del área de trabajo sobre la forma de la franja de soldadura: (a) Cuesta abajo y (b) Cuesta arriba (23).....	72
Figura 2.29 Ejemplo de laminación (28)	80
Figura 2.30 Discontinuidad por servicio (28).....	81
Figura 2.31 Representación gráfica de fracturas longitudinales (29)	82
Figura 2.32 Fractura longitudinal en el centro de la soldadura (28)	83
Figura 2.33 Representación gráfica de fracturas transversales (29)	83
Figura 2.34 Fracturas transversales en el metal de soldadura (28)	84
Figura 2.35 Representación gráfica de fracturas en el pie de la soldadura (29)	84
Figura 2.36 Fractura en el pie de la soldadura de la soldadura (28)	84
Figura 2.37 Representación gráfica de fracturas en el cráter (29)	85
Figura 2.38 Fracturas en el cráter de los reinicios de la soldadura (30).....	85
Figura 2.39 Representación gráfica de fracturas en la raíz de la soldadura (29).....	86
Figura 2.40 Fractura de raíz. (A) Probeta sin fractura y (B) Probeta fracturada (resultados de ensayo Tekken, vista transversal de ZAC) (28)	86
Figura 2.41 Fractura de borde en la unión de tubería industrial (28)	87
Figura 2.42 Fractura de garganta en soldadura de filete (28)	87
Figura 2.43 Representación gráfica de porosidad distribuida uniformemente (29)	88
Figura 2.44 Porosidad distribuida uniformemente a lo largo del cordón de soldadura (28)	89
Figura 2.45 Representación gráfica de porosidad agrupada (29)	89
Figura 2.46 Porosidad agrupada al final del cordón de soldadura (28).....	89
Figura 2.47 Representación gráfica de porosidad en túnel o cilíndrica (29)	90
Figura 2.48 Porosidad en túnel sub-superficial a lo largo del metal soldado (28).....	90
Figura 2.49 Representación gráfica de porosidad lineal cerca de la raíz de la soldadura (29)..	90
Figura 2.50 Porosidad lineal en soldaduras de filete (28)	91
Figura 2.51 Representación gráfica de penetración incompleta (29)	91
Figura 2.52 Penetración incompleta en una junta a tope (31)	92
Figura 2.53 Representación gráfica de inclusiones de escoria (28).....	93
Figura 2.54 Representación gráfica de inclusiones de tungsteno (28).....	93
Figura 2.55 Representación gráfica de fusión incompleta (29)	94
Figura 2.56 Falta de fusión en la raíz del cordón de soldadura (28)	94
Figura 2.57 Representación gráfica teórica de socavado (29)	95
Figura 2.58 Representación gráfica de llenado incompleto (29)	95
Figura 2.59 Representación gráfica de un cordón traslapado (29)	96
Figura 2.60 Representación gráfica de un desgarre laminar (29)	96
Figura 2.61 Golpe de arco: (a) Dirección errada del arco, (b) Reinicio incorrecto (32)	98
Figura 2.62 Salpicaduras sobre metal base (30)	98
Figura 2.63 Macrografía de laminación en un recipiente a presión (28)	100

Figura 2.64 Ejemplo de delaminación (28)	100
Figura 2.65 Distorsión en placas soldadas (GMAW) (28).....	102
Figura 2.66 Representación gráfica de los perfiles de penetración/momento (35)	114
Figura 2.67 La temperatura, la velocidad del plasma de arco y las distribuciones de potenciales eléctricos en t = 100 ms. (a) distribución de la temperatura; (b) distribución de la velocidad; (c) la distribución de potencial eléctrico (38).....	116
Figura 2.68 Representación gráfica de la prueba de burbuja (39)	125
Figura 2.69 Gradiente de caída de presión en función del tiempo (39).....	129
Figura 2.70 Curva de presión del componente con vacío (39)	133
Figura 2.71 Representación gráfica del aumento lineal de presión (39)	133
Figura 2.72 Prueba con diferencia de presiones (39).....	134
Figura 2.73 Esquema del proceso con sonda detectora (39)	137
Figura 2.74 Esquema del sistema de prueba desde el exterior hacia el interior (39).....	140
Figura 2.75 Esquema del sistema de prueba desde el interior hacia el exterior (39).....	141
Figura 2.76 Sensibilidad de los diferentes métodos de detección de fugas (39)	144
Figura 3.1 Tendencia mensual del indicador FPY en prueba de fugas (30)	147
Figura 3.2 Datos generados de defectos en fugas de enero a julio del 2014 (30)	149
Figura 3.3 Representación de los números de parte con mayor porcentaje de rechazo (30)..	152
Figura 3.4 Relación del porcentaje de piezas rechazadas y el total de tanques soldados por operador (30)	154
Figura 3.5 Porcentaje de rechazos en fugas por defectos (30)	157
Figura 3.6 Soldadura alrededor de componente tubular (30)	158
Figura 3.7 Apertura entre las placas del componente 1A-1 y el cuerpo del tanque (30).....	159
Figura 3.8 Porosidad en el cordón de soldadura (30).....	160
Figura 3.9 Defecto por falta de fusión hacia el final del cordón de soldadura (30).....	160
Figura 3.10 Diagrama causa-efecto para las operaciones de soldadura	162
Figura 3.11 Ejemplo de mapa de localización para prueba de fugas y soldadura (30).....	166
Figura 4.1 Defecto en componente revelado con líquidos penetrantes (30)	169
Figura 4.2 Subensamble con distorsión en uno de sus vértices (30)	169
Figura 4.3 Cara frontal del vértice que presenta distorsión (30).....	170
Figura 4.4 Cara anterior del vértice con distorsión (30).....	170
Figura 4.5 Control de la distorsión por fijación rígida y disipación de calor (30)	171
Figura 4.6 Fijación rígida del subensamble para la secuencia de soldadura (30).....	171
Figura 4.7 Vista lateral del subensamble (30).....	172
Figura 4.8 Diagrama de Graville sobre el grado de soldabilidad y su relación con el contenido de carbono y el carbón equivalente (35)	174
Figura 4.9 Corte de la sección transversal de la muestra A	176
Figura 4.10 Corte de la sección transversal de la muestra B	176

Figura 4.11 Imagen de electrones secundarios que muestra la microestructura del metal de soldadura de la muestra A.....	177
Figura 4.12 Imagen de electrones secundarios que muestra la microestructura del metal de soldadura de la muestra B.....	177
Figura 4.13 Zonas indentadas en la unión soldada. MS, MB, ZAC1 y ZAC2.....	178
Figura 4.14 Perfil de dureza del ensayo de las condiciones de operación reales e ideales	178
Figura 4.15 Antioxidante de placas (base aceite) (30)	181
Figura 4.16 Líquido antisalpicadura (30).....	181
Figura 4.17 Líquido antisalpicadura sobre metal base (30).....	182
Figura 4.18 Imagen infrarroja del metal de soldadura de un componente del tanque A1 (30)	183

Apéndices

Apéndice I. Lista de siglas y acrónimos

WPS	Welding Procedure Specification
ISO	International Organization for Standardization
QT	Quenched and Tempered (type of steel)
HSLA	High-Strength Low-Alloy Steel
ASTM	American Society for Testing and Materials
GMA	Gas Metal Arc
GMAW	Gas Metal Arc Welding
GTAW	Gas Tungsten Arc Welding
SS	Solución Sólida
MS	Metal de Soldadura
MB	Metal Base
ZAC	Zona Afectada por el Calor
MS	Metal de Soldadura
ED	Ensayos Destructivos
END	Ensayos no Destructivos
PWHT	Post Weld Heat Treatment
MEB	Microscopía Electrónica de Barrido