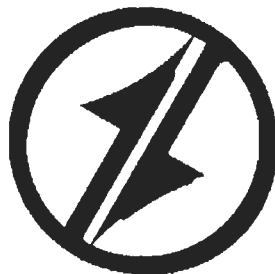


CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN DE MATERIALES

DIVISION DE ESTUDIOS DE POST-GRADO



**ANÁLISIS DE FALLA EN SOLDADURA POR ARCO SUMERGIDO (SAW) EN
FILTROS DE ACEITE PARA LOCOMOTORAS**

POR

ING. MARCOS GÓNGORA HERNÁNDEZ

MONOGRAFÍA

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

SALTILLO, COAHUILA, MÉXICO A 22 DE FEBRERO DEL 2008

CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES

DIVISION DE ESTUDIOS DE POST-GRADO



**ANÁLISIS DE FALLA EN SOLDADURA POR ARCO SUMERGIDO (SAW) EN
FILTROS DE ACEITE PARA LOCOMOTORAS**

POR

ING. MARCOS GÓNGORA HERNÁNDEZ

MONOGRAFÍA

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

SALTILLO, COAHUILA, MÉXICO A 22 DE FEBRERO DEL 2008

Corporación Mexicana de Investigación en Materiales, S.A. de CV.
Gerencia de Desarrollo del Factor Humano
División de Estudios de Postgrado

Los miembros del Comité Tutorial recomendamos que la monografía "Análisis de falla en soldadura por arco sumergido (SAW) en filtros de aceite para locomotoras", realizada por el alumno Marcos Góngora Hernández con número de matrícula 06-ES038 sea aceptada para su defensa como Especialista en Tecnología de la Soldadura Industrial.

El Comité Tutorial




Tutor Académico
M.C. Gabriel García Cerecero



Tutor en Planta
Ing. Trusman Castro Ramírez



Asesor
Dr. Jorge Leobardo Acevedo Dávila



Vc. Bo
M.C. Claudia A. González Rodríguez
Coordinador de Postgrado

ÍNDICE

1.- Síntesis.	1
2.- Objetivo.	3
3.- Justificación.	4
3.1 Justificación del trabajo.	4
3.2 Alcance del trabajo.	5
4.- Hipótesis.	6
5.- Proceso de soldadura por arco sumergido (SAW).	7
5.1 Principios de funcionamiento.	8
5.2 Métodos generales.	10
5.3 Características de operación.	12
5.4 Clasificación del metal base y aporte.	14
5.5 Tipos de fundentes y electrodos	15
5.6 Defectos en el proceso SAW	18
6.- Caso de estudio	31
6.1 Caracterización del metal base, aporte y fundente.	33
6.2 Evaluación de la zona de falla.	38
7.- Conclusiones y recomendaciones	42
7.1 Conclusiones	42
7.2 Recomendaciones	43
8.- Figuras	44
9.- Bibliografía	46

1.

SÍNTESIS

El proceso de soldadura de arco sumergido (SAW), es un proceso noble porque permite soldar a relativamente altas velocidades y simultáneamente permite la automatización tanto para pasos sencillos como múltiples, ya sea en paralelo o bien en tándem.

Es efectivo para espesores importantes (5 mm) o más, porque presenta buena penetración y además se protege del medio ambiente mediante la adición simultánea del fundente en forma granular que cubre por completo al arco eléctrico.

Sin embargo, es importante señalar que únicamente sirve para posiciones planas y horizontales (aun en circunferencias), para el resto es impráctico por razones obvias.

Además este proceso es único ⁽²⁾ porque se pueden emplear altas corrientes en la soldadura, sin experimentar un arco eléctrico violento. La corriente aplicada en este proceso es normalmente cuatro o cinco veces de la que se aplica en los procesos SMAW o GMAW debido a que el arco eléctrico sumergido en el fundente permite una fusión suave sin experimentar explosiones como en el caso de los procesos de protección gaseosa.

En el presente trabajo se pretende hacer un análisis detallado del proceso SAW en la fabricación de filtros de aceite para determinar las causas de la formación de porosidades, describir los mecanismos de

formación para poder sugerir soluciones prácticas y relativamente fáciles de implementar, para que de esta manera evitar los retrabajos y en un determinado momento los rechazos debidos a estos defectos.

2.

OBJETIVO

Determinar las causas de la generación de la porosidad en la soldadura aplicada por arco sumergido y efectos que se tiene sobre las propiedades mecánicas, además sugerir soluciones que eliminen o limiten en forma importante los defectos actuales.

Los objetivos específicos de la presente investigación son:

1. Eliminar la porosidad en la unión Back Dish (tapa) – Shell (cuerpo).
2. Establecer las condiciones de uso del fundente (flux).
3. Revisar las variables de operación.

3.

JUSTIFICACIÓN

3.1 Justificación del trabajo

A pesar de la nobleza del proceso, se presentan defectos que pueden alcanzar un porcentaje importante con su consecuente rechazo, que normalmente se pueden atribuir a errores humanos en la aplicación del proceso o bien en la aplicación de las variables de soldadura.

Los defectos principalmente consisten en poros, agrietamiento en frío, fusión incompleta, entre otros.

En el caso particular que nos ocupa, se han detectado áreas de oportunidad para optimizar el proceso, siempre que se haga un análisis minucioso de los defectos, seguido de un juicio acertado acerca de los mismos.

De entrada podemos mencionar varios aspectos en los que podemos trabajar, por ejemplo limpieza en el fundente, posición del electrodo, etc., esto lo veremos a detalle en capítulos posteriores.

Por último, podemos afirmar que los defectos en la soldadura, representan una baja en la productividad.

Sin embargo el costo más importante, está en la pérdida de imagen en el interior de la empresa y aun más, en el exterior con el cliente actual y sobretodo con los potenciales.

De tal manera que es importante explorar estas áreas de oportunidad que permitan la mejora continua de la calidad en soldaduras por arco sumergido y comprender la interacción de las diferentes variables esenciales involucradas en el propio proceso SAW.

3.2 Alcance del trabajo

Este trabajo se limita a efectuar el análisis de falla para determinar el origen y mecanismo de formación del defecto, para enseguida señalar las recomendaciones pertinentes para evitar la recurrencia del problema.

4.

HIPÓTESIS

Se pretende mediante la evaluación de los defectos en el cordón de soldadura eliminar las causas y evitar los retrabajos, lo cual repercute directamente en el abatimiento de costos y elevación de la productividad.

El análisis de falla, es una herramienta de diagnóstico muy confiable que permite no solo determinar la falla en sí misma, sino que también nos muestra el mecanismo de la falla, mediante la fractografía, la metalografía, etc., con muy pequeño margen de error.

En este caso es necesario revisar los parámetros de operación y las condiciones generales de trabajo para resolver la problemática actual, y sentar las bases para afrontar futuras situaciones similares.

5.

PROCESO DE SOLDADURA POR ARCO SUMERGIDO (SAW)

La soldadura por arco sumergido (Submerged Arc Welding, SAW) produce la coalescencia de metales calentándose con un arco entre un electrodo de metal desnudo y la pieza de trabajo. El arco y el metal fundido están “sumergidos” en un manto de fundente granular fusible sobre la pieza de trabajo. No se aplica presión y el metal de aporte se obtiene del electrodo y en ocasiones de un suministro complementario como una varilla para soldar o gránulos metálicos)^(6, 10).

En el proceso SAW, el arco está cubierto por fundente, el cual desempeña un papel preponderante porque la estabilidad del arco depende del fundente, las propiedades mecánicas y químicas del depósito de soldadura finalmente se pueden controlar con el fundente, y la calidad de la soldadura puede ser afectada por la forma como se maneje este.

La soldadura por arco sumergido es un proceso de soldadura de producción versátil capaz de soldar con corrientes de hasta 2000 amperes de C.A. o C.C., empleando uno o varios alambres o tiras de metal de aporte. Es posible usar fuentes de potencia tanto de C.A. como de C.C. en la misma soldadura simultáneamente.

5.1 Principios de funcionamiento.

En la soldadura por arco sumergido el extremo de un electrodo continuo de alambre desnudo se inserta en un montículo de fundente que cubre el área o la unión que se va a soldar, se enciende el arco. A continuación, un mecanismo alimentador de alambre comienza a introducir el electrodo en la unión a una velocidad controlada, y el alimentador se desplaza manual o automáticamente a lo largo de la soldadura, ver la figura 1. En la soldadura mecanizada o automática, el trabajo puede desplazarse debajo de un alimentador de alambre estacionario.

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

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

Al avanzar la zona de soldadura a lo largo de la unión, el metal de aporte funde primero y luego el fundente, posteriormente se enfrían y solidifican.

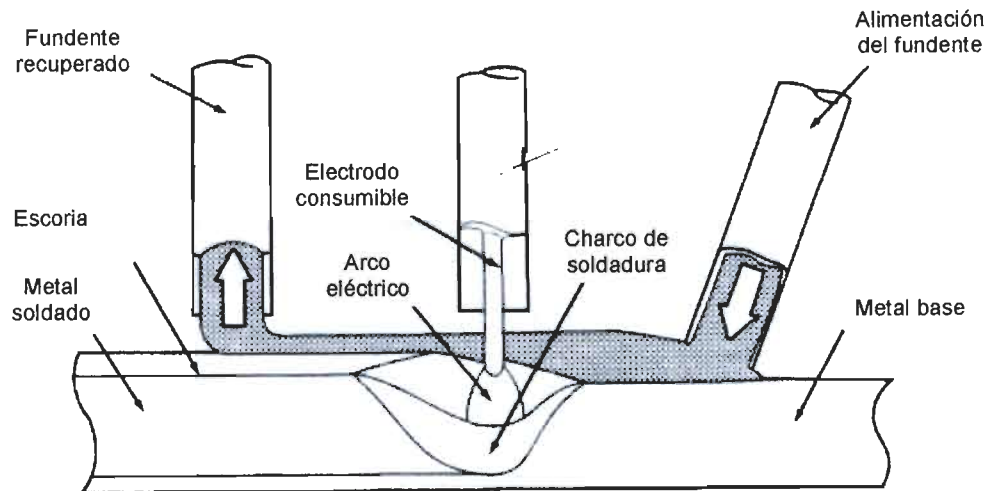


Figura 1. Proceso de soldadura por arco sumergido SAW⁽⁶⁾.

Entre los factores que determinan si conviene o no usar soldadura por arco sumergido están:

1. Composición química y propiedades mecánicas que debe tener el depósito final
2. Espesor del metal base que se va a soldar.
3. Accesibilidad de la unión.
4. Posición en que se va a soldar
5. Frecuencia o cantidad de soldaduras que se van a efectuar.

Ventajas del proceso

Entre las principales ventajas podemos citar:

- Alta velocidad y rendimiento: con electrodos de 5/32" y 3/16" a 800 y 1000 Amperes, se logra depositar hasta 15 Kg. de soldadura por hora. Con electrodos de 1/4" y 1300 Amperes, se depositan hasta 24 kg. por hora (tres a cuatro veces más rápido que en la soldadura manual), aproximadamente 1 a 1.5 kg. (2 a 3 lb.) de alambre de acero de bajo

- carbono se deposita por hora para cada 100 A de corriente directa de polaridad inversa, la figura 2, muestra la capacidad de SAW en cuanto a la velocidad de depositación y rendimiento.
- Este proceso permite obtener depósitos de propiedades comparables o superiores a las del metal base.
- Rendimiento: 100%.
- Soldaduras homogéneas.
- Soldaduras 100% radiográficas.
- Soldaduras de buen aspecto y penetración uniforme.
- No se requieren protecciones especiales.

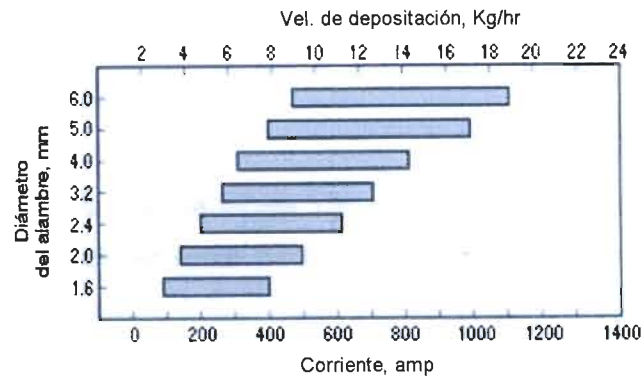


Figura 2. Velocidad de depósito de SAW⁽⁶⁾.

5.2 Métodos generales.

La soldadura por arco sumergido se puede aplicar en tres modos distintos: automáticos, semiautomático y mecanizado ó manual. En todos ellos es preciso colocar la pieza de trabajo de modo de que el fundente y el charco de soldadura permanezcan en su sitio hasta solidificarse.

El equipo.

El diagrama de la figura 3, muestra los componentes de un equipo de soldadura de arco sumergido.⁽⁶⁾

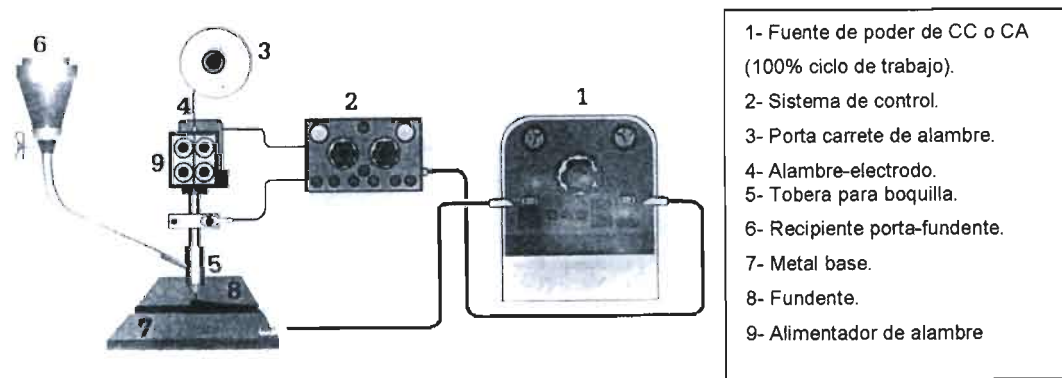


Figura 3. Esquema de los componentes del proceso SAW⁽⁶⁾.

Variables de operación.

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

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

El operador debe saber qué efecto tienen las variables sobre la acción de soldadura, y cómo deben ajustarse. La figura 4. muestra los diferentes

tipos de unión y de bisel con los que se puede aplicar el proceso de arco sumergido.

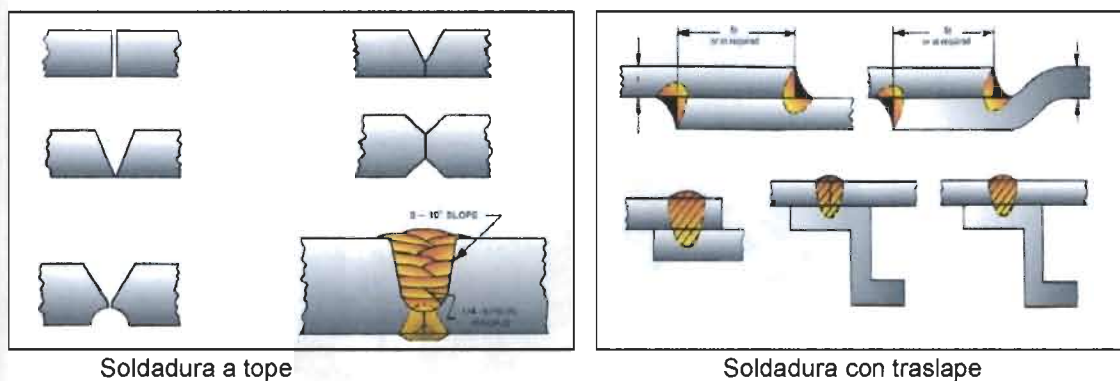


Figura 4. Formas de aplicación de arco sumergido⁽⁴⁾.

5.3 Características de operación.

La corriente de soldadura controla la velocidad con la que el electrodo se funde, profundidad de la fusión y cantidad de metal base que se funde. Si la corriente es muy alta para una velocidad dada, la profundidad de fusión o penetración serán muy grandes, la soldadura puede cruzar el espesor y la zona afectada por el calor será también muy grande. Los costos también se incrementan debido a la potencia excesiva y al consumo del electrodo. Por otro lado, corrientes muy bajas conducirán a penetración insuficiente.

La cantidad de metal de soldadura depositado por unidad de tiempo es prácticamente proporcional al amperaje. Esto se ilustra en la figura 2. La cual muestra el efecto del amperaje en la velocidad de depósito de una soldadura de acero al carbono.

El voltaje determina principalmente la forma de la zona de fusión. A medida que aumenta el voltaje, el cordón de soldadura se vuelve más plano y más ancho, mayor cantidad de fundente se expone al arco y el consumo

se incrementa. El arco puede romper la protección del fundente que lo cubre y el metal entra en contacto con el aire del medio ambiente dando como resultado una gran cantidad de poros cuando el voltaje es excesivamente alto⁽⁶⁾. El efecto de incrementar los niveles de voltaje en la forma de las soldaduras por arco sumergido se puede observar en la figura 5.

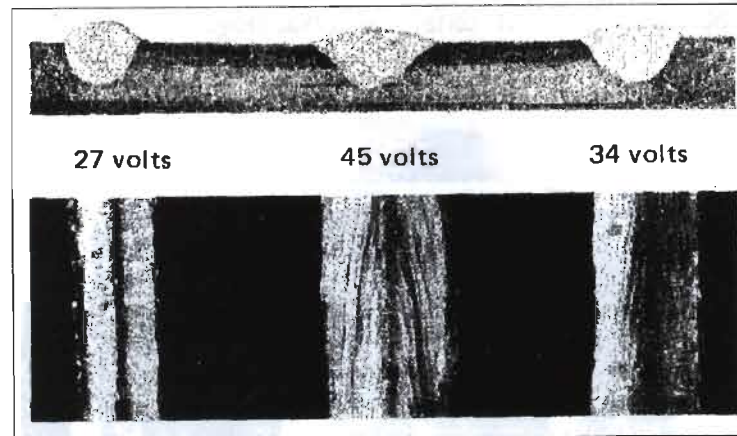


Figura 5. Efecto del voltaje sobre las características de soldadura. Proceso totalmente automático con electrodo de 7/32", 850 amps y 30 ipm ⁽⁴⁾.

Si la corriente del arco se mantiene constante y el voltaje es bajo comparado con la corriente, el metal base no fundirá lo suficiente para generar una buena soldadura. Las gotas del metal líquido que pasen del electrodo a la pieza de trabajo provocarán un continuo corto circuito, el cual resultará en un cordón de soldadura interrumpido y alto. A medida que el voltaje se vaya incrementando se podrá alcanzar un punto óptimo en el cual el arco no se interrumpe más y se mantiene constante. Bajo esta condición se obtendrá además una buena penetración. Si el voltaje se incrementa más allá de este punto óptimo la longitud del arco se incrementará y se volverá inestable lo que genera un cordón ancho y plano. El incremento en la separación del electrodo tendrá esencialmente el mismo efecto en la forma del cordón que el decremento de voltaje.

La velocidad de soldadura o velocidad de paso es una variable importante que controla la velocidad de producción y la calidad metalúrgica de la soldadura. Incrementos en la velocidad disminuyen el tiempo de

producción por soldadura realizada. La velocidad también afecta el calor absorbido en la unión. De aquí se establece que incrementos en la velocidad de soldadura y decrementos en la corriente son dos maneras prácticas de disminuir la cantidad de calor que se suministra en la unión. La velocidad de paso ayuda a determinar el ancho y la profundidad de la soldadura, como se muestra en la figura 6 se observa que la penetración y el ancho del cordón disminuyen con el aumento de la velocidad de paso.

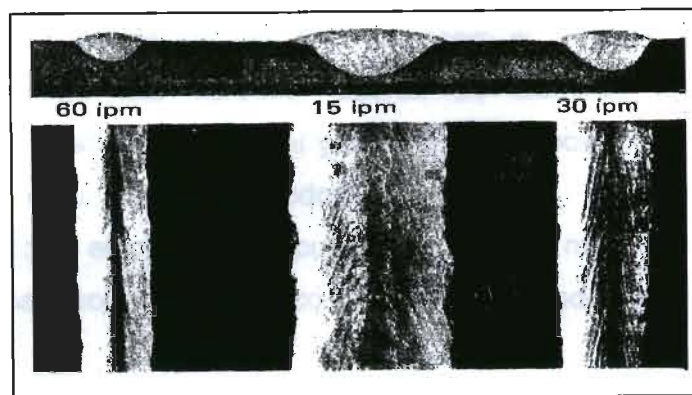


Figura 6. Efecto de la velocidad sobre las características de soldadura⁽⁴⁾.

5.4 Clasificación del metal base y aporte.

La soldadura por arco sumergido se emplea para fabricar ensambles de casi todos los materiales empleados en la actualidad, desde aceros al carbono "ordinarios" hasta superaleaciones con base níquel. La mayor parte de los aceros convencionales y aleaciones se pueden soldar fácilmente con alambres y fundentes comerciales, aunque algunos metales requieren alambres de electrodo especiales de composición química precisa y fundentes especiales diseñados para conferir a la unión soldada propiedades específicas.

Metal base

Las que siguen son clases generales de metales base que se pueden soldar:

1. Aceros al carbono con contenido de carbono hasta 0.29%
2. Aceros de baja aleación con resistencia de hasta 100 Ksi (690MPa)
3. Aceros al cromo-molibdeno (0.5 a 9% Cr y 0.05 a 1% Mo).
4. Aceros inoxidable
5. Aleaciones con base níquel.

Electrodos

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

Los electrodos de acero suelen estar recubiertos de cobre, excepto los destinados a materiales resistentes a la corrosión o ciertas aplicaciones nucleares. El recubrimiento de cobre prolonga la vida en almacenamiento, reduce el desgaste por rozamiento con el tubo de contacto y mejora la conductividad eléctrica. El diámetro de los electrodos para soldadura por arco sumergido varía de 1.6 a 6.4 mm (1/16" a 1/4").

5.5 Tipos de fundentes y electrodos

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

Electrodos y fundentes de acero al carbono⁽⁶⁾

La especificación AWS A.5.17 describe los requisitos que deben cumplir los electrodos y fundentes para soldadura por arco sumergido de aceros al carbono. Los electrodos sólidos se clasifican según la composición química del depósito. Los fundentes se clasifican con base en las propiedades del metal de soldadura que se obtienen cuando se usan con electrodos específicos. En la figura 7 se muestra el sistema de clasificación para las combinaciones fundente-electrodo.

Los fundentes se clasifican con base en la composición química y en las propiedades mecánicas del metal de soldadura depositado con un electrodo de una clasificación específica. La selección de los consumibles de SAW dependerá de las propiedades químicas y mecánicas que deba tener el componente que se fabrica, de la posición de soldadura (1G, 5G), y de la preparación que deba recibir la superficie del acero para soldar.

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

1) Conveniencia de escoger un fundente "neutral" o "activo". Un fundente neutral añade pocos elementos de aleación o ninguno, al depósito de soldadura, en tanto que un fundente activo agrega elementos de aleación al metal de soldadura depositado.

2) Si los fundentes que se están considerando tienen una composición química debidamente equilibrada para usarse con una clasificación de electrodo dada.

3) Los requisitos de propiedades mecánicas exigidos. Esto incluye las propiedades de impacto CVN, así como la resistencia mecánica y la ductilidad del depósito resultante.

4) Aplicabilidad de una combinación electrodo-fundente dada, lo que incluye la capacidad para mojar las paredes de la unión sin socavados ni traslapes en frío, capacidad para soldar sobre hollín, incrustaciones y la facilidad de eliminación de la escoria.

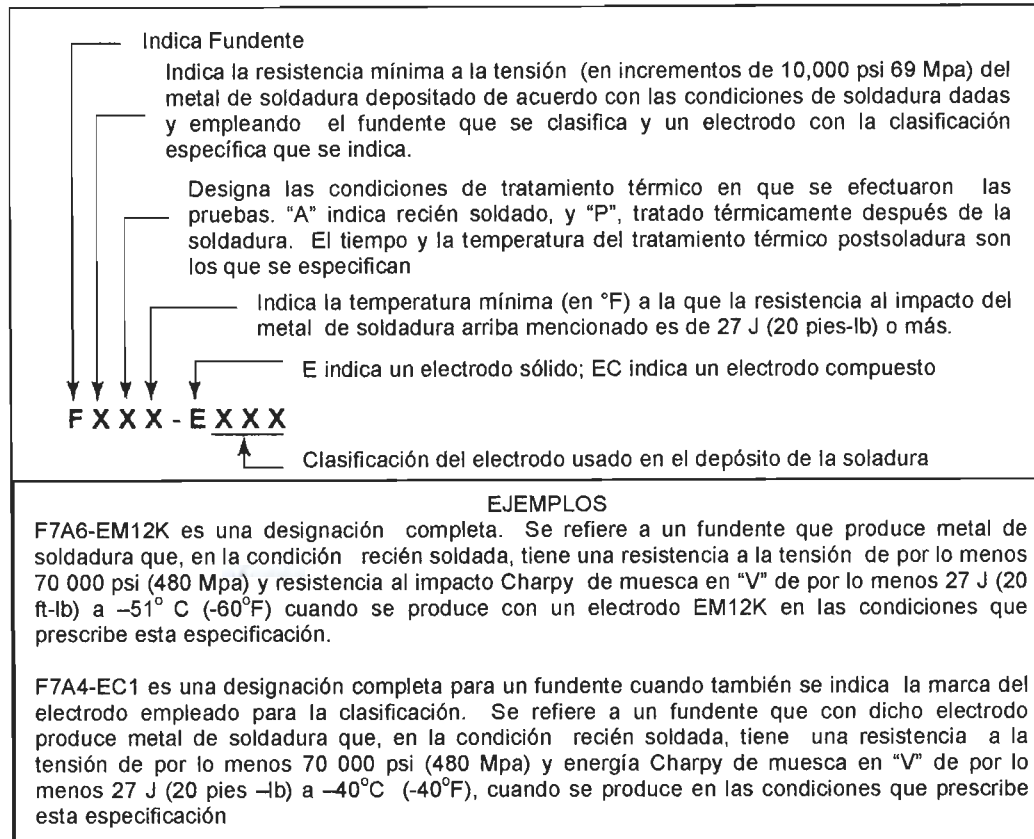


Figura 7. Sistema de clasificación para combinaciones fundente-Electrodo⁽⁶⁾.

Electrodos y fundentes para aceros de baja aleación.

El metal de soldadura de acero de baja aleación puede depositarse con electrodos sólidos de acero de aleación, fundentes que contienen los elementos de aleación y los electrodos compuestos cuyo núcleo contiene los elementos de aleación. Los electrodos de acero de aleación y electrodos compuestos normalmente se sueldan bajo un fundente neutral. Los fundentes con elementos de aleación generalmente se usan con electrodos de acero al carbono para depositar metal de soldadura aleado.

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

Electrodos y fundentes de acero inoxidable.

La especificación ANSI/AWS A.5.9 cubre los metales de aporte para soldar aceros al cromo y al cromo-níquel, resistentes a la corrosión o a la temperatura. Esta especificación incluye aceros en los que el cromo excede el 4% y el níquel no excede el 50% de la composición. Los electrodos de alambre sólido se clasifican con base en su composición química de fábrica, y los electrodos compuestos, con base en el análisis químico de una muestra fusionada.

5.6 Defectos en el proceso SAW

En virtud de que los defectos principales en el caso que nos ocupa son poros, consultamos la literatura técnica especializada sobre este tópico en donde se define⁽⁷⁾ a los poros como cavidades ya sea esféricas, planas o elongadas y, se relacionan con presión de gas (incluyendo aire atrapado) que excede la presión del metal en un punto durante la solidificación.

En problemas de defectos de gas atrapado existen varias fuentes posibles como:

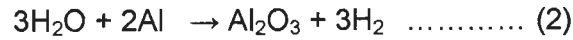
- A).- Composición del metal base.
- B).- Composición del fundente.
- C).- Limpieza en el metal base.
- D).- Variables de operación.

A).- Composición del metal base.

Cuando el metal base tiene relativamente alto carbono^(6,7), o bien el fundente, aunado a la presencia de humedad en uno u otro produce gas en forma de CO de acuerdo con la siguiente reacción 1:



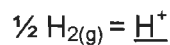
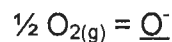
Esto también ocurre con otros elementos de aleación, como el Aluminio y/o el Silicio, según la reacción 2: ⁽⁷⁾



B).- Composición del fundente.

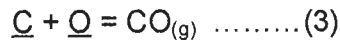
El nivel de Oxígeno en el proceso SAW puede variar significativamente⁽¹⁾, dependiendo de la composición del fundente, los altos niveles de Oxígeno asociados con fundentes ácidos que contienen grandes porcentajes de SiO₂, es como resultado de la descomposición de este, esto es consistente con el incremento del contenido de Silicio en el cordón cuando se usan fundentes ácidos.

Si la contaminación atmosférica fuera la razón del contenido de Oxígeno se espera que el Nitrógeno también esté alto. Similarmente, por la disolución de moléculas de Oxígeno e Hidrógeno en forma de iones O_{2(g)} y H_{2(g)}:

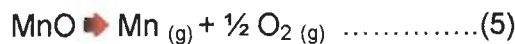
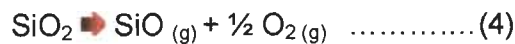


Sin embargo, así como en el caso del Nitrógeno, una porción de las moléculas de O₂ y H₂ pueden disociarse o aún ionizarse bajo la temperatura de plasma del arco eléctrico, en forma atómica.

Otra fuente de Oxígeno puede ser la descomposición de óxidos, especialmente de SiO₂, MnO y FeO en el fundente, en la reacción metal-escoria en el charco durante el proceso de soldadura y puede oxidar el Carbono y otros elementos de aleación en el metal líquido en la reacción 3:



En el caso del Hidrógeno presente en la soldadura otras fuentes pueden ser humedad o grasa, sin embargo, en el caso de la soldadura SAW, los óxidos presentes en el fundente son susceptibles a descomponerse debido a las altas temperaturas de plasma del arco eléctrico liberando Oxígeno, debido a que la estabilidad de los óxidos metálicos ^(4,6) durante la soldadura decrecen en el siguiente orden: CaO, K₂O, Na₂O, TiO₂, Al₂O₃, MgO, SiO₂, y MnO. Por ejemplo:



Esto se concluyó en fluxes con bajo contenido menor al 10% de FeO, el SiO₂ y el MnO ^(1,4,6) son la fuente primaria de contaminación por Oxígeno debido a la presencia de CaF₂ que actúa como diluyente de óxidos reactivos, por lo que pueden ocurrir pérdidas importantes de Mn por evaporación del charco de soldadura debido a la alta presión de vapor del Mn.

Tipos de fundentes:

Los fundentes⁽²⁾ que se emplean para proteger el arco eléctrico en el proceso SAW, son de naturaleza ácida, neutral o básica. La composición química está en función de los efectos que se pretendan obtener, éstos son complejos debido a que tienen que ser permeables a la salida de los gases, a la vez formar un escudo que proteja al arco eléctrico de la atmósfera, permita adicionar pequeñas cantidades de aleantes, remover con facilidad la escoria, etc., todo esto mientras se está soldando.

En forma similar a la escoria empleada en la fabricación de acero, así es como actúa el fundente, aún el tamaño de los granos del fundente así como la altura del fundente sin fundir que está sobre el cordón de soldadura

deben permitir que los gases producto de la soldadura fluyan hacia el exterior.

Es importante señalar una regla muy importante en el proceso SAW, el peso de fundente fundido sobre el cordón debe ser igual al peso del electrodo depositado. Sin embargo, esta relación depende de la composición química del fundente y de las condiciones de soldadura. Por ejemplo, el voltaje afecta la cantidad de fundente fundido; grandes longitudes de arco, significan altos voltajes agregan mayor cantidad de calor que un arco corto.

De ahí que si se emplea un fundente con la intención de agregar un aleante al cordón éstas condiciones de longitudes de arco deben ser monitoreadas cuidadosamente para mantener una relación de fusión fundente -metal de aporte, que nos asegure una composición química constante a lo largo del cordón de soldadura.

La soldadura obtenida por el proceso SAW es limpia debido a la excelente protección brindada por la cubierta formada por el fundente fundido, mientras que la desoxidación puede ser efectivamente efectuada vía electrodo o bien por la composición del fundente, así como la relativamente alta temperatura y fluidez de la escoria fundida permiten que los gases e impurezas fluyan hacia el exterior.

El proceso SAW, funciona como un proceso de bajo Hidrógeno, siempre que no se contamine el fundente o el metal de aporte de humedad ó de componentes hidrogenados.

1).- Fundente Neutro.

Los fundentes que no contienen adiciones metálicas, aleantes o componentes que incrementen de algún modo los niveles de Silicio, Manganeso, u otro elemento de aleación, en el cordón de soldadura se consideran neutros.

Cuando se emplea un fundente neutro, la desoxidación y cualquier requerimiento de aleantes, deben ser cubiertos por el metal de aporte a través de su composición química. Así mismo, si se requiere cierto elemento metálico en el cordón de soldadura, la fuente debe ser el metal base.

Los fundente neutros, ofrecen la ventaja de mantener más o menos estable la composición química, aún en condiciones por encima de operación del proceso SAW. Desde que el fundente neutro no contiene desoxidantes, o en muy pocas cantidades, la capacidad de desoxidación debe ser obtenida de otra fuente, de ahí que se debe tener en cuenta un potencial problema de porosidad o de fractura. Por ejemplo, en un proceso SAW de paso sencillo que se lleva a cabo en una placa que tiene la superficie oxidada, el cordón tendrá porosidad superficial o bien interna.

Otra ventaja del fundente neutro, es que la composición del metal de aporte que se está depositando no está sujeta a variaciones en la cantidad de fundente por unidad de volumen de cantidad de metal depositado.

2).- Fundente Ácido (Activo)

Estos fundentes a diferencia de los anteriores, sí contienen significantes cantidades de Silicio, Manganeso, usualmente como desoxidantes. El propósito de estas adiciones es reducir los problemas de porosidad en la soldadura, asegurando una adecuada desoxidación del metal en la zona de soldadura. La adición de Manganeso es importante para evitar las fracturas en caliente especialmente si se tiene un elevado contenido de Azufre residual.

Los fundentes de esta clase son bastante satisfactorios en vista de que son capaces de cumplir con la función de proteger aun en condiciones de alta corriente en la soldadura. Esta capacidad facilita la buena penetración en espesores importantes, y permite una alta relación de depositación de metal de aporte.

La escoria solidificada del tipo ácido, es fácilmente removida de la superficie de la soldadura, dejando una fina y coloreado película de óxido.

3).- Fundente Básico.

En este caso el fundente mantiene estable el análisis químico en el cordón de soldadura debido a que contiene muy poco Oxígeno, menos que los fundentes del tipo ácido.

La composición química de este tipo es de Silicato de Calcio, bajo en Silicio; tiene la ventaja de servir en procesos de alta velocidad de depositación, pero no tolera el óxido, no se emplea en procesos de pasos múltiples.

Índice de Basicidad.

La manera de asegurarnos de que tipo de fundente estamos empleando, es mediante el uso del Índice de Basicidad (B.I.)⁽¹⁾ este concepto se adoptó en la fabricación de acero para explicar la habilidad de la escoria para remover el Azufre del acero líquido, y a su tiempo se aprovechó para indicar la capacidad de oxidación del fundente.

El B.I. de un fundente especialmente de uno de tipo óxido, puede ser definido en forma general mediante la siguiente fórmula:

$$B.I. = \frac{\sum(\%oxidos_basicos)}{\sum(\%oxidos_no_basicos)}$$

El concepto fue aplicado para soldadura en la ecuación 6:

$$B.I. = \frac{CaF_2 + CaO + MgO + BaO + SrO + NaO + K_2O + Li_2O + 1/2(MnO + FeO)}{SiO_2 + 1/2(Al_2O_3 + TiO_2 + ZrO_2)}$$

.....(6)

Donde los componentes están en porciento en peso. Usando el expresión anterior, el fundente será ácido cuando el valor del BI es menor que 1, es neutro cuando el BI está entre 1 y 1.2 y básico cuando el valor es mayor a 1.2.

La fórmula se relaciona muy bien con el contenido de Oxígeno en los procesos de soldadura de arco sumergido.

Fisicoquímica del fundente en el proceso SAW. ⁽²⁾

Los tipos de fundentes mencionados reaccionan con el metal base en donde se involucran: tiempos de reacción, interfase metal de aporte-metal base, altos picos de temperatura durante el contacto del fundente, el metal de aporte y el arco eléctrico y el grado de agitación magnética en el charco de soldadura. El mecanismo de depositación durante el proceso SAW involucra gotas de metal de aporte pasando a través del plasma formado por el arco eléctrico.

Los elementos y componentes del fundente que pasan por el plasma se ionizan altamente, y las reacciones entre estos iones y gotas de metal de aporte ocurren a velocidades extremadamente rápidas, de tal manera que nunca tienen el suficiente tiempo y se completan fuera del equilibrio, esto se debe a la alta densidad del flujo de corriente eléctrica, también la polaridad influye cuando se esta llevando a cabo con corriente directa. Este período inicial de reacciones extremadamente rápidas y complejas es seguido de un periodo de varios segundos donde durante el cual la escoria líquida y el metal base están en contacto, por lo que a partir de aquí otro factor hace presencia, es decir, la gravedad que hace una separación y coalescencia gravitacional de dos líquidos inmiscibles dentro de una separación de una capa de escoria encima del cordón de soldadura, en este breve periodo de tiempo, la temperatura cae drásticamente dentro del cordón.

De tal manera que se considera que en el proceso SAW tiene un rango efectivo de temperatura de reacción aproximadamente entre 1700° y 2000°C, el cual se toma como efectivo para la transferencia de masa. Esto es importante porque representa un factor elemental para la transferencia neta de Oxígeno ganado o perdido en el metal soldado, además de otros elementos, de tal manera que como referencia altos niveles de Oxígeno se encontraron en soldaduras efectuadas con fundentes ácidos.

Enseguida se menciona en forma general la transferencia de ciertos elementos entre el fundente y el metal base en un proceso SAW en el caso de acero de bajo Carbono.

Carbono.

El contenido de Carbono en el cordón depende de si fue aportado por el flux, metal base, electrodo o bien si es la suma de todos ellos. La eficiencia de transferencia del Carbono dependerá de la forma de agregarse en la soldadura, en este caso la transferencia de Carbono a través del fundente es más predecible cuando está como ferroaleación y esto si las partículas no están demasiado finas.

Un fundente con alto contenido de Oxígeno como es el caso de los fundentes ácidos, se sabe que están relacionados con la disociación de los óxidos.

Manganeso.

Este elemento está como aleación en el acero y es generalmente beneficioso, sin embargo es necesario restringir el contenido dentro de ciertos rangos, como consecuencia una pequeña cantidad de Manganeso en el fundente no es de consecuencias. También es cierto que cerca de un 25% del total del manganeso disponible se perderá por oxidación, debido a las reacciones con los óxidos del fundente, y por evaporación. Por lo que se debe agregar en el fundente y contrarrestar este efecto de pérdida de este elemento en el cordón de soldadura.

Silicio.

En este caso el Silicio se emplea comúnmente en la aceración como desoxidante, así como en la soldadura. Una adecuada desoxidación debe asegurarse con un contenido relativamente bajo de Silicio, ayudándose con otros elementos desoxidantes como el Titanio y Aluminio.

Las partículas muy pequeñas de inclusiones no metálicas formadas a partir del Titanio y Aluminio pueden ser de beneficio en ciertos casos, porque sirven de nucleación de una microestructura fina, como la ferrita acicular que tiene buenas propiedades mecánicas. La inclusión de un volumen importante de partículas de óxido de Aluminio debe restringirse porque afecta en forma adversa las propiedades mecánicas.

En el caso del Silicio es sencillo obtener un contenido adecuado sabiendo que la eficiencia en la transferencia del Silicio en el proceso SAW es de aproximadamente de 50%, y esto es suficiente para hacerlo. Por otro lado, si el Silicio es un limitante debemos emplear un fundente básico en lugar de un fundente ácido, en virtud de que este último contiene una proporción importante de Sílica (SiO_2) que contribuye a elevar el contenido de Silicio en el cordón de soldadura.

Oxígeno.

El Oxígeno agregado al cordón durante el proceso SAW empieza en la cavidad formada por el arco eléctrico cuando el Oxígeno libre aniónico se forma a partir de los óxidos del fundente, debido a que son disociados en el plasma formado por el arco eléctrico. La sílica juega un rol importante en esta disociación térmica que provee de aniones de Oxígeno. El aire atrapado entre los granos de fundente también contribuye a esta situación en una menor proporción.

La disociación de los otros óxidos en el plasma son la principal fuente de Oxígeno. Como el arco de plasma viaja del electrodo hacia el metal base, es en esta forma en que la temperatura decrece, de tal manera que el

Oxígeno libre se vuelve a combinar con los elementos desoxidantes presentes en el fundente, electrodo o metal base.

En el proceso SAW podemos encontrar incluso hasta 0.2 % de Oxígeno, por lo tanto puede ocurrir una reacción con el Carbono presente para formar CO, CO₂, y posteriormente forma porosidad en el cordón de soldadura, incluso un contenido de Oxígeno mayor a 0.05 % es suficiente para reducir las propiedades mecánicas en la soldadura.

Dos hechos importantes deben tomarse en cuenta para lidiar con el Oxígeno y el papel de los desoxidantes.

1.- Los fundentes ácidos potencian la depositación del Oxígeno (más del 0.05 %).

2.- A pesar del esfuerzo de los elementos desoxidantes para eliminar el Oxígeno, este afectará en mayor o en menor medida las propiedades mecánicas de la soldadura, esta degradación se debe a:

a).- Alto Oxígeno residual.

b).- Cantidad importante de productos de desoxidación no metálicos de tamaño grueso.

c).- Un exceso de elementos desoxidantes como el aluminio, que no se combinen con el Oxígeno y permanecen como elementos de aleación con desfavorable influencia en las propiedades mecánicas.

Con cuidadosas adiciones de desoxidantes que produzcan partículas muy finas de óxidos, especialmente de Óxido de Titanio, que sirven de nucleantes para formar microestructura de granos finos, como la ferrita acicular, nos dice que cierto nivel de Oxígeno es deseable.

Hidrógeno.

El Hidrógeno no debe ser un problema en el proceso SAW porque no hay cantidades importantes en la humedad presente o de otros 'hidrogenantes' en el fundente que se incorporen al cordón de soldadura durante el proceso SAW, al menos en condiciones de secado. Otro es el

escenario si el soldador permite la contaminación de humedad o con grasa tanto al fundente como al metal base.

Titanio.

Este elemento en particular se adiciona al fundente, con dos objetivos, primero como desoxidante para formar TiO_2 , y mantener niveles óptimos de nitrógeno, y segundo, para obtener una microestructura de granos finos.

C).- Limpieza del metal base.

Este factor se refiere propiamente a la limpieza superficial del metal base, es decir libre de cualquier contaminante de cualquier tipo. Los principales contaminantes suelen ser los óxidos, grasas, humedad, etc. Los primeros son nocivos debido a que no permiten perfectamente la unión del metal de aporte con el metal base y además son fuente primaria de Oxígeno el cual es formador o promotor de porosidades.

Por otro lado, las grasas, aceites o cualquier contaminación a base de hidrocarburos, son dañinos en virtud de que también son promotores de porosidades porque al combinarse con el Oxígeno forman monóxido y/o bióxido de Carbono.

Lo mismo ocurre con la humedad cuando no se elimina en forma eficiente, y debido a las condiciones fisicoquímicas del proceso, se alcanza a disociar la molécula de agua, quedando tanto Oxígeno como Hidrógeno moleculares y atómicos libres.

El Oxígeno ya lo habíamos mencionado, forma obviamente óxidos metálicos o bien óxidos o monóxidos de Carbono, mientras que el Hidrógeno atómico puede provocar fracturas en caliente y en frío.

D).- Variables del proceso.^(4,6)

Nos referimos a las condiciones de operación del proceso SAW, es decir, técnicas específicas de aplicar el proceso de soldadura,

concretamente en el caso de superficies de una circunferencia, la posición del electrodo es importante para prevenir el descascaramiento de la escoria antes de tiempo, y perder la cubierta de escoria que protege al cordón de soldadura y evitar los problemas de oxidación.

También es importante el voltaje y la velocidad de avance, en el caso de la posición del electrodo con respecto a la vertical se explica mejor con la figura siguiente:

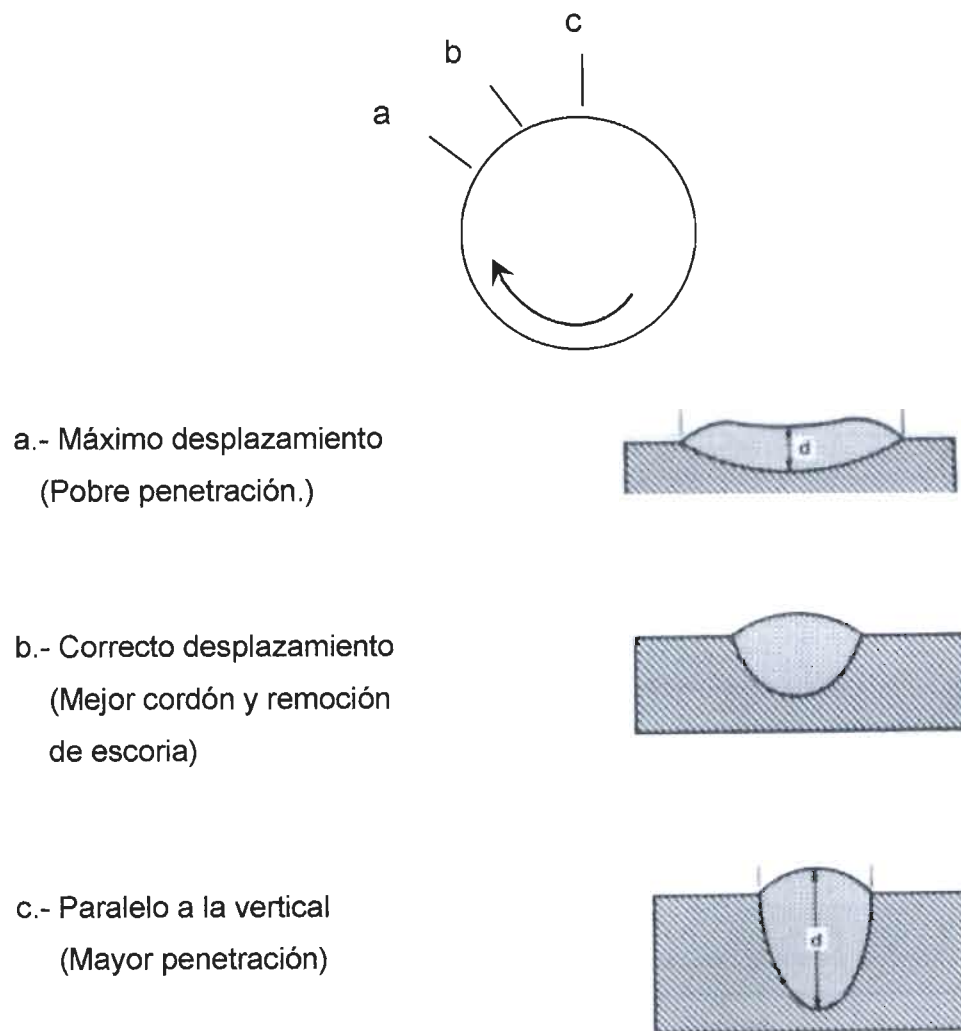


Figura 8. Efecto del desplazamiento del electrodo en el cordón de soldadura en caso de superficies curvas⁽¹¹⁾.

La tabla 1 recomienda el desplazamiento relativo a la línea vertical del electrodo de acuerdo con el diámetro del recipiente.

Para una aplicación en particular del desplazamiento del electrodo dependerá del espesor de pared, del amperaje y de la velocidad, sin embargo sí es posible tomar estos valores como guía.

Tabla 1. Desplazamiento del electrodo para soldaduras en circunferencias⁽⁴⁾.

Diámetro externo de la pieza o placa (mm)	Desplazamiento del electrodo con respecto a la vertical (mm)
25 - 75	12
75 - 450	22
450 - 900	34
900 - 1050	40
1050 - 1200	50
1200 - 1800	55
Mayor de 1800	75

6.

CASO DE ESTUDIO

Derivado del objetivo del presente estudio en "Determinar las causas de la generación de la porosidad en la soldadura aplicada por arco sumergido en recipientes a presión (filtros de aceite para locomotora)", se procedió a visitar el lugar de la fabricación de las piezas, para conocer el proceso y monitorear las variables involucradas, así como seleccionar las muestras representativas de los defectos, para lo cual se tuvo la asesoría del departamento de control de calidad.

Para determinar la causa raíz de las discontinuidades se aplicó la metodología de análisis de fallas descrita en el capítulo "*Introduction to Failure Analysis and Prevention*" del libro "Failure Analysis and Prevention. ASM International, Vol. 11. 2002"⁽¹²⁾.

Modelo de resolución de problemas. Existen muchos métodos y modelos de resolución de problemas fundamentados en métodos científicos, tales como:

1. Definir el problema
2. Propósito e hipótesis
3. Reunir datos
4. Ensayos de hipótesis
5. Desarrollo y conclusiones

Un modelo de solución de problemas conciso, adaptado por diversos autores y considerado en este trabajo, es descrito en la figura 9. La forma circular

continúa en la gráfica, es significativa, indicando que los procesos reinician con la identificación del nuevo problema traído a la luz, como parte inicial del ciclo que se describe a continuación:

- 1) *Identificación*: Describe la situación actual, define la deficiencia en términos de los síntomas. Determina el impacto de la deficiencia sobre el componente, producto, sistema, y cliente. Fija una meta. Colecta datos para proveer una mediada de la deficiencia.
- 2) *Determinación de la causa raíz*. Analiza el problema e identifica la(s) causa(s).
- 3) *Desarrollo de acciones correctivas*. Lista posibles soluciones para mitigar y prevenir recurrencia del problema. Genera alternativas. Desarrollo e implementación del plan.
- 4) *Validación y verificación de acciones correctivas*. Pruebas de acciones correctivas en estudio piloto. Medición efectiva del cambio. Validación y perfeccionamiento. Verificar que el problema es corregido y aumenta la satisfacción del cliente.
- 5) *Estandarización*. Incorporar la acción correctiva dentro del sistema de documentación y estandarización de la compañía, organización o industria para prevenir recurrencia en productos o sistemas similares. Monitoreo de los cambios para asegurar la efectividad



Figura 9. Modelo de solución de problemas.

[Scutti J., McBrine W., ASM, Vol. 11. 2002]⁽¹²⁾

Análisis causa raíz. Los principios del análisis causa-raíz (root-cause analysis, RCA) pueden ser aplicados para asegurar que la causa raíz es comprendida y puede ser identificada con la acción correctiva apropiada para prevenir su recurrencia. Existe mucha información de los métodos de RCA, el cual se aplica en el estudio de un evento o condición no deseada, el esquema de la figura 10 muestra lo que se observa durante la inspección visual en un caso de falla, las evidencias, pero la causa raíz no es posible, sino aplicando el método científico.

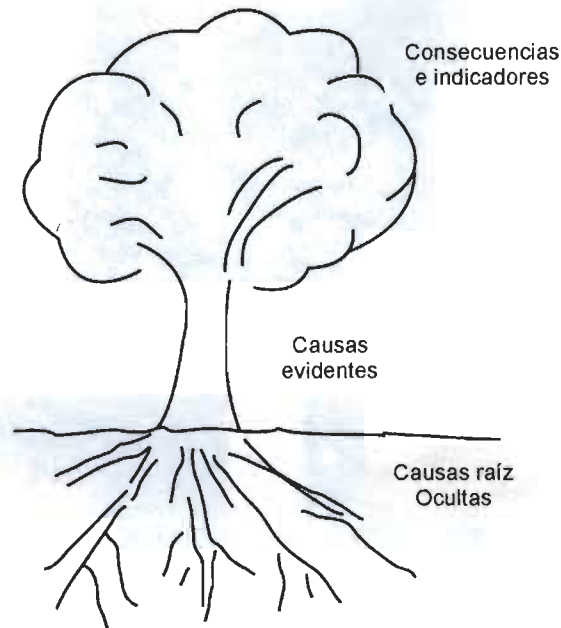


Figura 10. Analogía causa-raíz.
[Scutti J., McBrine W., ASM, Vol. 11. 2002]⁽¹²⁾

Metodología aplicada al caso de estudio.

1. Caracterización del metal base, aporte y fundente (flux).
2. Evaluación de la zona de falla.
3. Conclusiones.

6.1 Caracterización del metal base, aporte y fundente.

- a) Inspección Visual. Durante la visita al proceso de fabricación de los filtros, se realizó una inspección visual a detalle, antes, durante y después de la aplicación del cordón circunferencial para unir los dos

componentes básicos, llamados cuerpo (Shell) y tapa (Back Dish) ver figura 11, en dicho cordón, es donde se presentan los poros. Se obtuvieron registros fotográficos de las partes componentes del filtro de aceite tapa y cuerpo respectivamente, figuras 12 y 13. la unión se realiza con el electrodo en posición vertical, figura 14.



Figura 11. Aspecto general del filtro de aceite en proceso de soldadura. (Cortesía de Camfilfar)



Figuras 12 y 13. Tapa y cuerpo del filtro, antes del ensamble. (Cortesía de Camfilfar)



Figura 14. Posición vertical del electrodo durante el ensamble de la tapa y el cuerpo.

(Cortesía de Camfilfar)

Se obtuvieron dos muestras de la unión circunferencial entre el cuerpo y la tapa, de las cuales se prepararon las probetas para la caracterización del material de cada parte, ver figura 15.

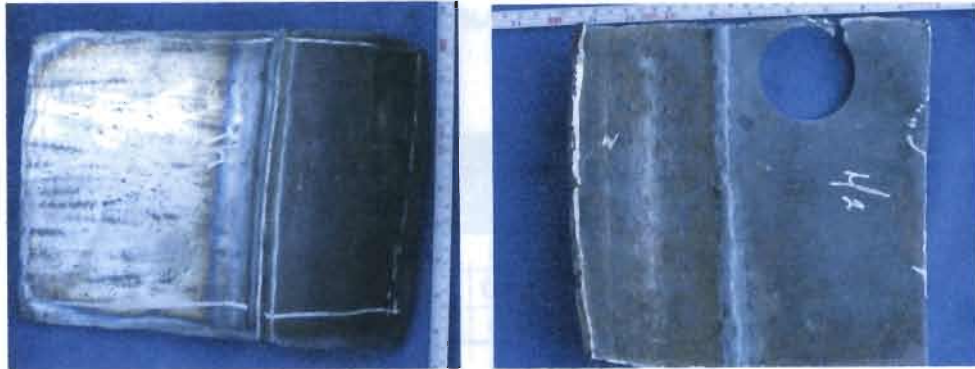


Figura 15. Muestras representativas de la tapa y el cuerpo, para su análisis.

Respecto al fundente, el cual se suministra a través de una tolva abierta a la atmósfera, ver figura 16a además de que se recicla varias veces sin considerar limpieza alguna como se observa en la figura 16b. El tratamiento del fundente reciclado en un proceso de soldadura por arco sumergido es muy importante, dado que tiene influencia directa en las propiedades microestructurales y mecánicas de la unión. La muestra obtenida de esta tolva para su examinación se muestra en la figura 16c en la cual se pueden apreciar partículas de escoria y fundente quemado.



Figura 16. a) Tolva de fundente abierta a la atmósfera, b) tolva de recicle de fundente granulado y cascarilla sinterizada y c) muestra del fundente reciclado, nótese las partículas quemadas de color oscuro. (Cortesía de Camfilfar)

b) Análisis químico. Se realizaron los análisis químicos del metal base (acero) material de aporte (electrodo) y del fundente (flux).

Metal base. Vía de análisis: Espectrometría de Rayos-X de acuerdo a la norma ASTM E1085-2004. El %C y %S, por combustión y detección infrarroja, ASTM E1019-2003.

ELEMENTO	Cuerpo (Shell) (% e.p.)	ASTM 1018 Gr 36 (% e.p.)	Tapa (B. Dish) (% e.p.)	ASTM A516-70 (% e.p.)
C	0,06	0,08 max	0,22	0,27 max
S	0,003	0,035 max	0,008	0,035 max
Mn	0,72	0,45 max	1,11	0,79 – 1,3
P	0,18	0,30 max	0,13	0,35 max
Si	0,130	0,35 max	0,210	0,13 – 0,45
Cr	0,020	0,15 max	0,040	0,020
Ni	0,040	0,20 max	0,070	0,020
Mo	<0,020	0,06 max	0,020	<0,020
Cu	0,206	0,20 max	0,205	0,206
V	<0,004	<0,008	<0,004	<0,004
Nb	<0,028	---	<0,002	<0,028
Ti	<0,040	0,025	<0,002	<0,040
W	<0,002	---	<0,002	<0,002

Análisis químico del *metal de aporte* (electrodo)

CLASIFICACION	COMPOSICIÓN (% e.p.)					
AWS	C	Mn	Si	S	P	Cu
EM12K	0,05-0,15	0,80-1,25	0,10-0,35	0,030	0,030	0,035

Análisis químico del *fundente* (Flux)

INGREDIENTES	(% e.p.)
Al ₂ O ₃	35
MgO	20
SiO ₂	10
Mn	10
SiO ₂ /Na ₂ O	5
CaF ₂	5
SiO ₂ /K ₂ O	<5
Si	<5
Fe	1
TiO ₂	0,5

c) Análisis metalográfico: ASTM E45 y E3.

▪ *Inclusiones no metálicas ASTM E45.*

El tipo y severidad de las inclusiones no metálicas presentes en las muestras de cuerpo y tapa son del tipo óxidos D 1½d y sulfuros A 1½d. Ver figuras 17a y 17b.

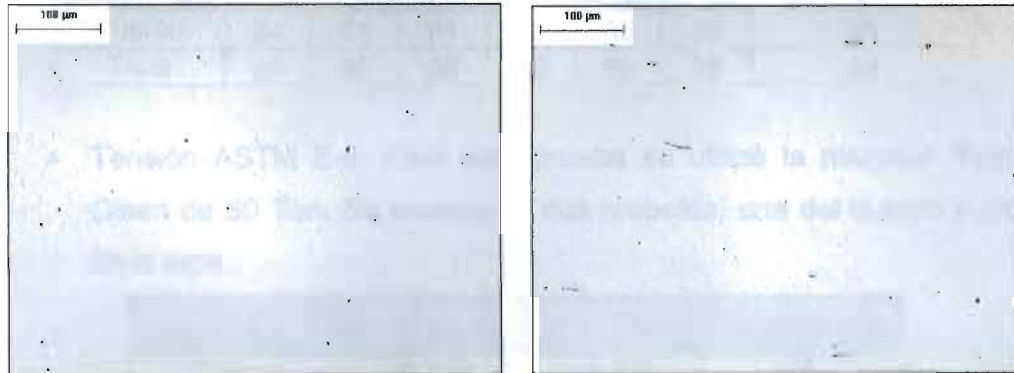


Figura 17a y 17b. Inclusiones no metálicas de muestras cuerpo y tapa, respectivamente. 100X.

▪ *Análisis microestructural ASTM E3.*

La microestructura que presenta el cuerpo consiste de una matriz de granos equiaxiales de ferrita con trazas de perlita, con un tamaño de grano ferrítico 10 ASTM, mientras que la tapa consiste de una microestructura de ferrita perlita en bandas en la dirección de rolado, con un tamaño de gran ferrítico 8-9 ASTM. Ver las figuras 18a y 18b, respectivamente.

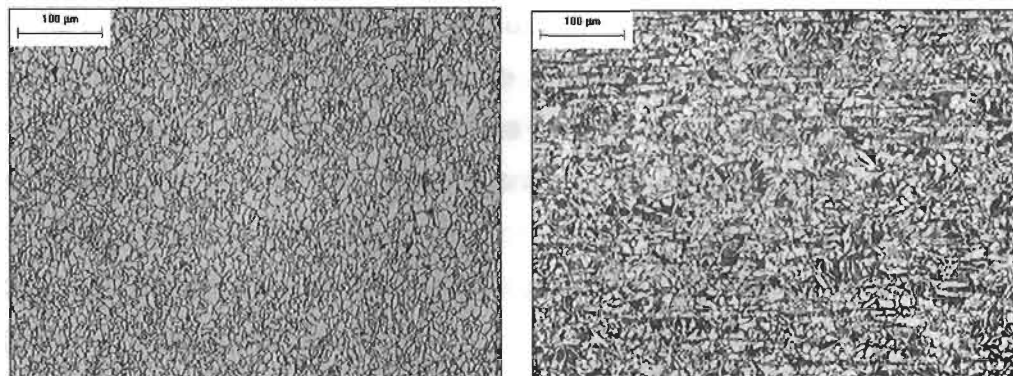


Figura 18a. Microestructura ferrítica con trazas de perlita en la muestra del cuerpo. 100X. (Nital 5%).

Figura 18b. Microestructura compuesta por ferrita y perlita en bandas en la

muestra de la tapa. 100X. (Nital 5%).

d) Pruebas mecánicas.

- Dureza ASTM E-18. Se realizaron las indentaciones de acuerdo a la norma utilizando el durómetro Wilson.

MUESTRA	LECTURAS (HRB)						PROMEDIO (HRC)
	1	2	3	4	5	6	
Cuerpo	84	84	81	83	85	82	83
Tapa	90	88	90	89	88	90	89

- Tensión ASTM E-8. Para esta prueba se utilizó la máquina Tinius Olsen de 60 Ton. Se ensayaron dos probetas, una del cuerpo y otra de la tapa.

MUESTRAS	ESFUERZO MAX (psi)	ESFUERZO CED (psi)	ELONGACIÓN (%)
Cuerpo	60,200	44,400	36
Tapa	82,700	54,300	30

Se realiza además un ensayo en una probeta plana en sentido longitudinal con el cordón de soldadura al centro, los resultados se indican a continuación:

MUESTRA	ESFUERZO MAX Mpa (psi)
Probeta de soldadura	529 (76,753)

6.2 Evaluación de la zona de falla.

a) Se prepararon muestras con el defecto en la soldadura para analizarlas mediante microscopía electrónica de barrido (MEB). El poro está abierto hacia la superficie y presenta en forma general, una superficie lisa y tersa en su interior con incrustaciones de material constituido básicamente por óxidos de silicio, calcio manganeso sodio, según los microanálisis químicos cualitativos realizados por espectroscopia de energía dispersiva de Rayos-X (EDS). Ver las figuras 19-21.

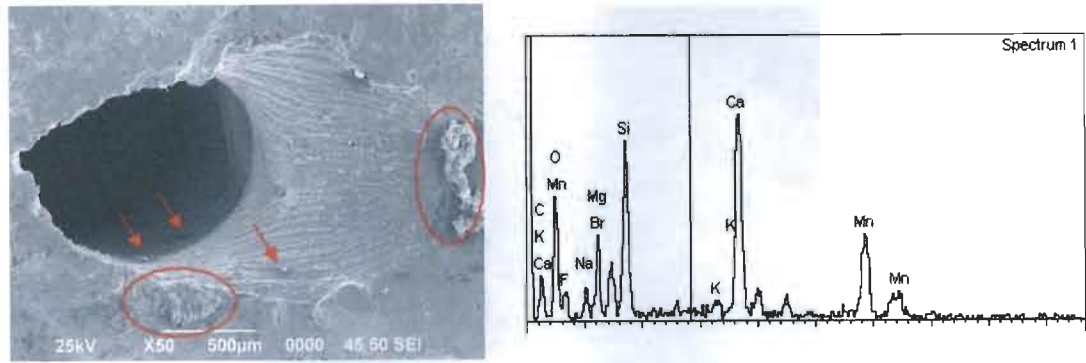


Figura 19. Aspecto del poro abierto hacia la superficie. El espectro corresponde a los grupos de lado derecho de la fotografía. (MEB).

De igual manera se analizaron los grupos inferiores y las partículas incrustadas en las paredes indicadas por las flechas.

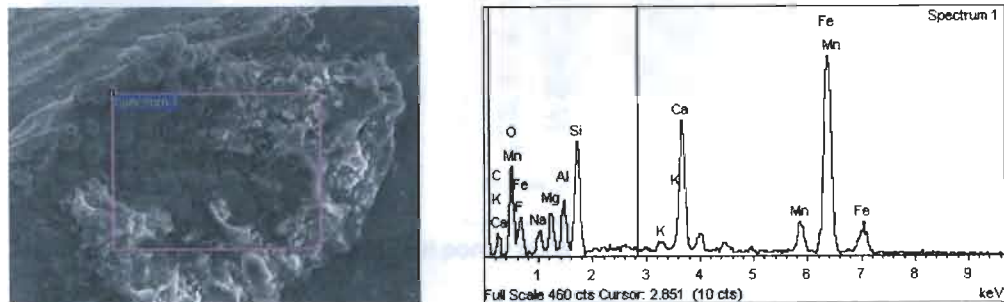


Figura 20. Grupo visto en la parte inferior con su microanálisis correspondiente. (MEB).

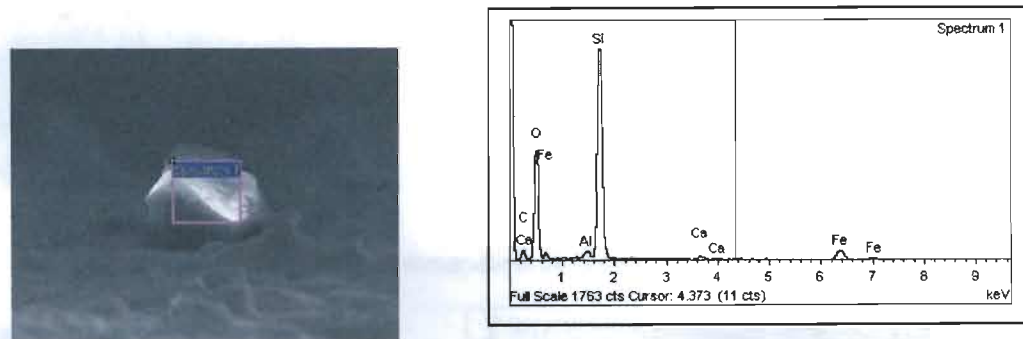


Figura 21. Cristal de sílice localizado a la entrada de la boca del poro. (MEB)

Posteriormente se seccionó el poro en forma longitudinal para analizar las paredes y el fondo del mismo, ver las figuras 22 a la 25.

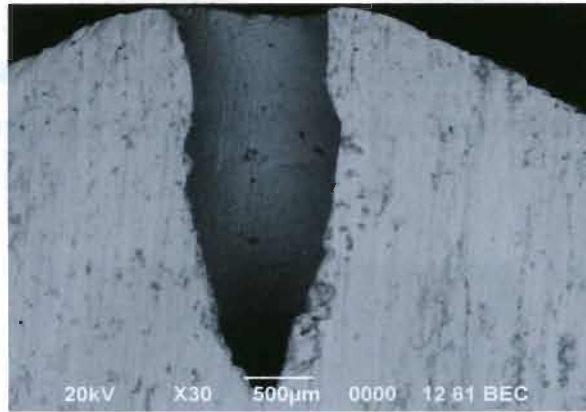


Figura 22. Corte longitudinal del poro. (MEB)

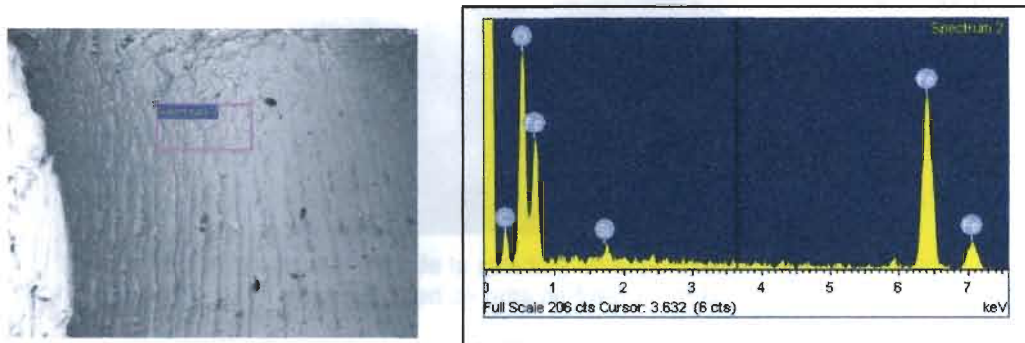


Figura 23. Aspecto de la pared del poro y el microanálisis correspondiente. (MEB).

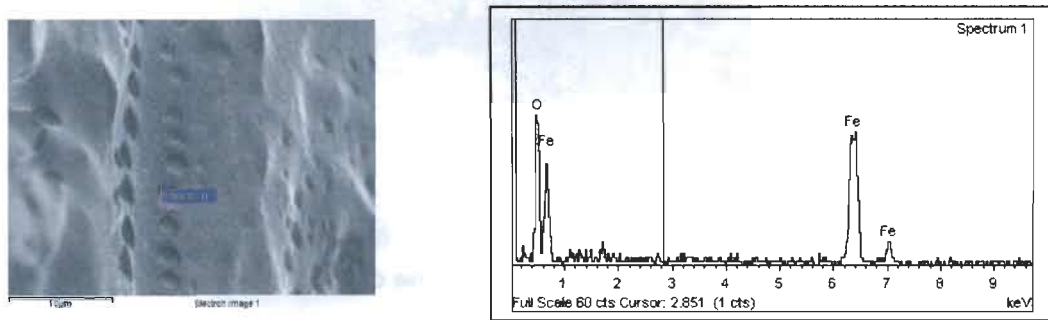


Figura 24. Otro aspecto y microanálisis de la pared interna del poro. (MEB).

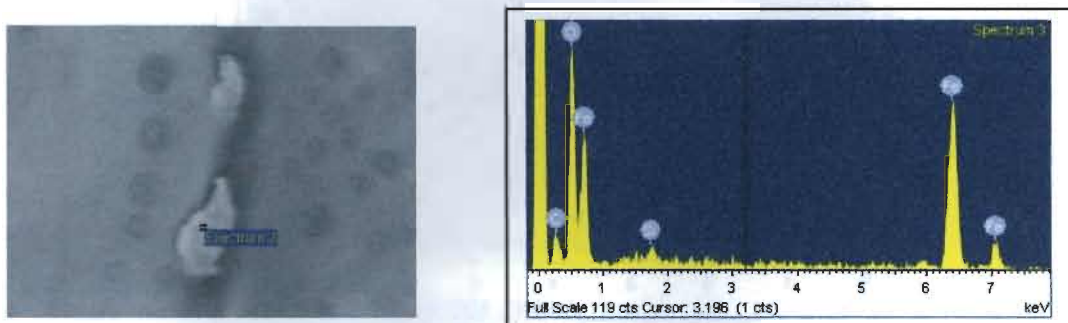


Figura 25. Inclusión en la pared del poro con su microanálisis correspondiente. (MEB).

En la sección transversal del de soldadura donde se localiza el poro, se evidencia una discontinuidad interna por falta de fusión y se observa capa de óxido, donde se realizaron microanálisis químicos cualitativos. Ver las figuras 26 a la 28.

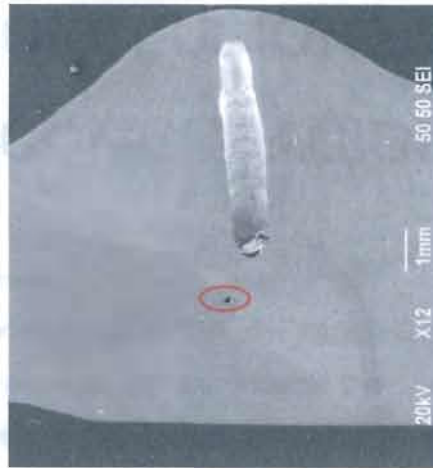


Figura 26. Sección transversal de la soldadura en el poro, donde se observa una discontinuidad de falta de fusión. (MEB).

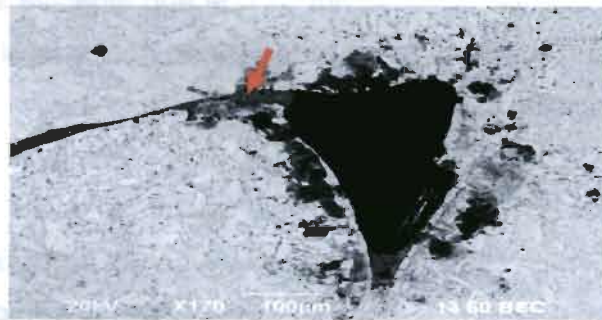


Figura 27. Poro secundario mostrando inclusiones. (MEB)

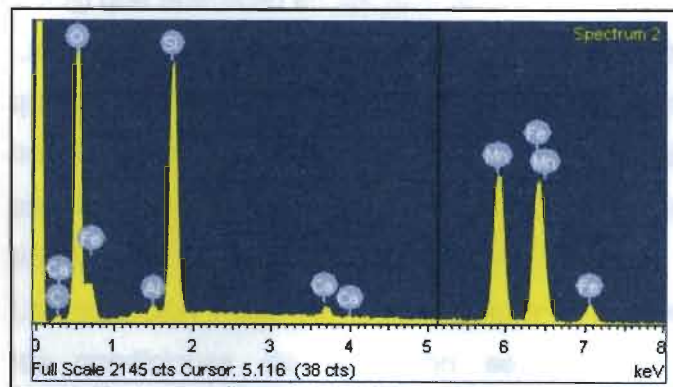


Figura 28. Microanálisis de la capa de óxido indicada por la flecha. (MEB)

7.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 Conclusiones

En base los análisis de la revisión bibliográfica y de los resultados obtenidos de la caracterización del material y evaluación del defecto de la porosidad encontrada en el cordón de unión de la tapa y el cuerpo del filtro de aceite para locomotora, se concluye lo siguiente:

- 1) Es evidente que el poro fue causado por gas atrapado, debido a la **reacción de disociación** de los elementos que componen el fundente, como se muestra en los microanálisis químicos cualitativos.
- 2) La falta de fusión del fundente en la discontinuidad interna causó un desequilibrio a las reacciones químicas por lo que **se liberaron gases** ionizados
- 3) Estos gases fueron **nucleados por los cristales de sílice** (SiO_2) que aparecen en las paredes.
- 4) La caracterización del material base del cuerpo y de la tapa que conforman el filtro, cumplen satisfactoriamente con la norma correspondiente, en cuanto al análisis químico y propiedades mecánicas (ASTM 1018 Gr. 36, para el cuerpo y ASTM A516 Gr. 70 para la tapa).
- 5) La inspección visual realizada in-situ, mostró a su vez que en las condiciones de operación se incurren en prácticas inadecuadas que afectan el proceso:

- La tolva de alimentación del fundente está abierta a la atmósfera exponiéndolo a la contaminación tanto por partículas en suspensión como a la humedad en el ambiente.
- El carrito que alberga al electrodo de aporte, también está expuesto a la atmósfera.
- El fundente usado que no participó en el proceso se recircula n veces, llevando restos fundidos que posteriormente afectarán las propiedades del mismo.
- Además que la posición del electrodo al momento de soldar no es la adecuada.
-

7.2 Recomendaciones

Con el objeto de evitar fallas de porosidad y faltas de fusión se recomienda lo siguiente:

- En primera instancia, ajustar las variables del proceso, como son la posición del electrodo y la velocidad de avance.
- En segunda instancia, proteger los consumibles del proceso del medio ambiente.
- Evitar el uso de fundente reciclado.

8.

FIGURAS

Figura 1. Proceso de soldadura por arco sumergido SAW	10
Figura 2. Velocidad de depósito de SAW	11
Figura 3. Esquema de los componentes del proceso (SAW)	12
Figura 4. Formas de aplicación de arco sumergido	13
Figura 5. Efecto del voltaje sobre las características de soldadura. Proceso totalmente automático con electrodo de 7/32", 850 amps y 30 ipm	14
Figura 6. Efecto de la velocidad sobre las características de soldadura.....	15
Figura 7. Sistema de clasificación para combinaciones fundente-electrodo.	18
Figura 8. Efecto del desplazamiento del electrodo en el cordón de soldadura en caso de superficies curvas	30
Figura 9. Modelo de solución de problemas	33
Figura 10. Analogía causa-raíz	34
Figura 11. Aspecto general del filtro de aceite en proceso de soldadura	35
Figuras 12 y 13. Tapa y cuerpo del filtro, antes del ensamble	35
Figura 14. Posición vertical del electrodo durante el ensamble de la tapa y el cuerpo	35
Figura 15. Muestras representativas de la tapa y el cuerpo, para su análisis.	36
Figura 16. a) Tolva de fundente abierta b) tolva de reciclado de fundente granulado y cascarilla sinterizada y c) muestra del fundente reciclado	36
Figura 17a y 17b. Inclusiones no metálicas de muestras cuerpo y tapa, respectivamente. 100X	38
Figura 18a. Microestructura ferrítica con trazas de perlita en la muestra del cuerpo. 100X. (Nital 5%)	38
	44

Figura 18b. Microestructura compuesta por ferrita y perlita en bandas en la muestra de la tapa. 100X. (Nital 5%)	38
Figura 19. Aspecto del poro abierto hacia la superficie. El espectro corresponde a los grumos de lado derecho de la fotografía. (MEB)	40
Figura 20. Grumo visto en la parte inferior con su microanálisis correspondiente. (MEB)	40
Figura 21. Cristal de sílice localizado a la entrada de la boca del poro. (MEB)	40
Figura 22. Corte longitudinal del poro. (MEB)	41
Figura 23. Aspecto de la pared del poro y el microanálisis correspondiente. (MEB)	41
Figura 24. Otro aspecto y microanálisis de la pared interna del poro. (MEB).	41
Figura 25. Inclusión en la pared del poro con su microanálisis correspondiente. (MEB)	41
Figura 26. Sección transversal de la soldadura en el poro, donde se observa una discontinuidad de falta de fusión. (MEB)	42
Figura 27. Poro secundario mostrando inclusiones. (MEB)	42
Figura 28. Microanálisis de la capa de óxido indicada por la flecha. (MEB)	42

9.

BIBLIOGRAFÍA

1. WELDING METALLURGY Sindo Kou 2nd Ed.
2. WELDING METALLURGY Linnert Vol 1 AWS.
3. ENGINEERING PROPERTIES Harvey ASM
4. SUBMERGED – ARC WELDING The Welding Institute
5. WELD POOL CHEMISTRY & METALLURGY The Welding Institute.
6. WELDING HANDBOOK Vol 4th, 7th Ed. AWS.
7. ASM handbook, Vol. 15. Casting.
8. MANUAL DE DEFECTOS DE FUNDICIÓN. American Foundry Society 2000
9. ASM HANDBOOK, VOL 6, ASM International, Materials Park OH 1993
10. APUNTES de la materia de Procesos de Soldadura, de la Especialidad en Tecnología de la Soldadura Industrial que se ofrece en COMIMSA
11. Pagina Web : www.weldingeneer.com/Discontinuities.htm
12. METALS HANDBOOK, ASM VOL. 11. *Failure analysis and prevention.* (2003)