



**UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTONOMA DE MEXICO**

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
CUAUTITLAN**



39
28

**"RECUPERACION DE PIEZAS DE
HIERRO COLADO POR MEDIO DE
SOLDADURA DE ARCO"**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA
P R E S E N T A N :
ULISES GILBERTO PINEDA CHAVEZ
ALFONSO BECERRIL LANDA

ASESOR: ING. JOSE ANTONIO LOPEZ GONZALEZ

CUAUTITLAN IZCALLI, EDO. MEXICO

1995

FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MEXICO

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

U. N. A. M.
FACULTAD DE ESTUDIOS
SUPERIORES-CUAUTITLAN



DEPARTAMENTO DE
EXAMENES PROFESIONALES

ASUNTO: VOTOS APROBATORIOS

DR. JAIME KELLER TORRES
DIRECTOR DE LA FES-CUAUTITLAN
P R E S E N T E .

AT'N: Ing. Rafael Rodríguez Ceballos
Jefe del Departamento de Exámenes
Profesionales de la F.E.S. - C.

Con base en el art. 28 del Reglamento General de Exámenes, nos permitimos comunicar a usted que revisamos la TESIS TITULADA:
"Recuperación de piezas de hierro colado por medio de soldadura de arco".

que presenta el pasante Ulises Gilberto Pineda Chávez
con número de cuenta: 8618395-2 para obtener el TITULO de:
Ingeniero Mecánico Electricista ; en colaboración con :
Alfonso Hecceuil Landa

Considerando que dicha tesis reúne los requisitos necesarios para ser discutida en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO.

A T E N T A M E N T E .
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Cuautitlán Izcalli, Edo. de Méx., a 24 de Agosto ' de 1995

PRESIDENTE Ing. Soledad Alvarado Martínez
VOCAL Ing. José Antonio López González
SECRETARIO Ing. Gerardo Rosa
PRIMER SUPLENTE Ing. Felipa Díaz del Castillo Rodríguez
SEGUNDO SUPLENTE Ing. Jesús García Lira



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MEXICO

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

U. N. A. M.
FACULTAD DE ESTUDIOS
SUPERIORES-CUAUTITLAN



DEPARTAMENTO DE
EXAMENES PROFESIONALES

ASUNTO: VOTOS APROBATORIOS

DR. JAIME KELLER TORRES
DIRECTOR DE LA FES-CUAUTITLAN
P R E S E N T E .

AT'N: Ing. Rafael Rodríguez Ceballos
Jefe del Departamento de Exámenes
Profesionales de la F.E.S. - C.

Con base en el art. 28 del Reglamento General de Exámenes, nos permitimos comunicar a usted que revisamos la TESIS TITULADA:
"Recuperación de piezas de hierro colado por medio de soldadura de arco".

que presenta el pasante: Alfonso Becerril Landa
con número de cuenta: 8615154-6 para obtener el TITULO de:
Ingeniero Mecánico Electricista ; en colaboración con :
Ulises Gilberto Pineda Chávez

Considerando que dicha tesis reúne los requisitos necesarios para ser discutida en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO.

A T E N T A M E N T E .
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Cuautitlan Izcalli, Edo. de Méx., a 24 de Agosto de 1995

PRESIDENTE	Ing. Soledad Alvarado Martínez	
VOCAL	Ing. José Antonio López González	
SECRETARIO	Ing. Gerardo Sosa	
PRIMER SUPLENTE	Ing. Felipe Díaz del Castillo Rodríguez	
SEGUNDO SUPLENTE	Ing. Jesús Garcá Lira	

QUIERO AGRADECER Y DEDICAR ESTA TESIS...

A DIOS..

Por habernos iluminado durante toda la carrera y así lograr una de las metas más grandes de nuestra vida.

Gracias por acompañarnos en todo el camino y ayudarnos a salir de esta difícil prueba.

Gracias por todo Señor!

A MIS PADRES..

Ma. de Lourdes Chávez Arcaráz y Oscar Pineda Reséndiz, por todos los sacrificios y esfuerzos que tuvieron para conmigo durante la carrera.

Gracias por haber depositado en mí toda su confianza ya que con su amor, cariño, regaños, consejos y apoyo recibí todo el impulso necesario para lograr esta meta en mi vida.

Gracias quiero dar a Dios por haberme dado unos padres tan comprensivos.

A MI HERMANA...

Erika Pineda Chávez, por haber compartido esos momentos de estudio, noches de desvelo, ella estudiando Química con el peligro de una explosión y yo quitando sus libros de la mesa.

A MI FAMILIA...

Gracias a mi Abuelita Isabel, a todos mis tíos de la familia Chávez, de la familia Pineda, a mis primos, primas y a todos en general quiero agradecerles por haber confiado en mí y por todo el apoyo que me brindaron.

A MIS PROFESORES..

Porque sin ellos, el logro de este objetivo no sería posible.

Por sus consejos y enseñanzas, que me ayudaron a formar una mejor vida en lo profesional y en lo personal.

A MIS AMIGOS..

Por haber compartido todos los buenos y malos momentos estudiando, jugando fútbol, dentro y fuera de la Facultad.

Por haber sido como nuestra segunda familia, acompañantes en el inicio y culminación de esta meta.

Gracias a nuestros profesores que participaron durante todo mi trayecto escolar, a nuestro asesor de tesis Ing. José Antonio López por su ayuda, motivación y conocimientos. Gracias, a la máxima casa de estudios Universidad Autónoma de México - Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, por la oportunidad que me brindó para realizar una licenciatura.

Gracias a todos aquellos que de alguna manera contribuyeron en la realización de este trabajo, porque sin su valiosa ayuda no hubiera sido posible lograrlo.

Ulises G. Pineda Chávez

DEDICATORIAS

A DIOS...

Por haberme iluminado durante toda la carrera y así lograr una de las metas más grandes de mi vida.

Gracias por acompañarnos en todo el camino y ayudarnos a salir de esta difícil prueba.

Gracias por todo Señor.

A MIS PADRES...

Con admiración y respeto, por todos los sacrificios y esfuerzos que tuvieron para mí durante toda mi carrera.

Gracias por haber depositado en mí toda su confianza, ya que con su amor, cariño y apoyo recibí todo el impulso necesario para lograr esta enorme meta en la vida.

Gracias quiero dar a Dios, principalmente, por haber puesto en mi camino unos padres como ustedes.

A MIS HERMANOS...

Por haber compartido conmigo cada momento de su vida, por su comprensión y apoyo sin límite: Gracias!

A MIS PROFESORES...

Porque sin ellos, el logro de este objetivo no sería posible.

Por sus consejos y enseñanzas que me ayudaron a formar una mejor vida en lo profesional y en lo personal.

A MIS AMIGOS...

Por haber compartido conmigo todos los momentos de alegría y tristeza durante nuestros estudios.

Por haber sido como mi segunda familia en la facultad y por haber sido mis acompañantes en el inicio y culminación de esta meta.

A NOSOTROS MISMOS...

Por haber tenido la oportunidad de crecer juntos y apoyarnos como verdaderos amigos durante toda la carrera.

Porque con este esfuerzo mutuo, esperamos desarrollarnos y ver la culminación de nuestro esfuerzo, obteniendo frutos en el presente y durante toda la vida.

Gracias por todo.

Gracias a todos aquellos que de alguna manera contribuyeron en la realización de este trabajo, porque sin su valiosa ayuda no hubiera sido posible lograrlo.

Alfonso Becerril Landa

INDICE

INTRODUCCION.....	1
-------------------	---

CAPITULO I

1.- Hierros Colados.....	4
1.1.- Método de Obtención del Hierro Colado.....	6
1.2.- Microconstituyentes.....	10
1.3.- Clasificación.....	14
1.3.1.- Hierro Blanco.....	15
1.3.2.- Hierro Gris.....	17
1.3.3.- Hierro Esferoidal.....	21
1.3.4.- Hierro Maleable.....	25
1.3.5.- Hierro Aleado.....	27

CAPITULO II

2.- Procesos de Soldadura por Arco.....	29
2.1.- Proceso SMAW (Proceso de Soldadura de Arco con Electrodo Revestido)..	29
2.1.1.- Definición y Descripción General.....	29
2.1.2.- Principios de Operación.....	30
2.1.3.- Electroodos.....	32
2.1.4.- Equipos para Proceso SMAW.....	33
2.1.5.- Ventajas y Desventajas del SMAW.....	34
2.2.- Proceso FCAW (Proceso de Soldadura de Arco con Núcleo de Fundente)..	36
2.2.1.- Definición y Descripción.....	36
2.2.2.- Principales Características de Operación.....	37
2.2.3.- Ventajas y Desventajas del Proceso FCAW.....	41
2.3.- Proceso GTAW (Proceso de Soldadura de Arco con Electrodo de Tungsteno y Gas).....	43
2.3.1.- Definición y Descripción del Proceso.....	43
2.3.2.- Principios de Operación.....	44
2.3.3.- Ventajas y Desventajas del Proceso.....	47

CAPITULO III

3.- Soldadura.....	50
3.1.- Metalurgia de la Soldadura.....	50
3.1.1.- Absorción de Gases.....	53
3.1.2.- Zona Afectada por el Calor.....	54
3.1.3.- Precipitación de Carburos.....	55
3.2.- Soldadura de Hierros Colados.....	58
3.2.1.- Soldadura de las Fundiciones Grises.....	58
3.2.2.- Soldadura de las Fundiciones Nodulares.....	62
3.2.3.- Soldadura de las Fundiciones Maleables.....	64
3.3.- Metodos de Soldadura del Hierro Colado.....	69
3.3.1.- Soldadura en Frío.....	69
3.3.2.- Soldadura Semicaliente.....	73
3.3.3.- Soldadura en Caliente.....	74

CAPITULO IV

4.- Principales Aplicaciones de la Soldadura de Arco en los Hierros Colados.....	76
---	-----------

CAPITULO V

5.- Reducción de Costos.....	81
-------------------------------------	-----------

CONCLUSIONES.....	95
--------------------------	-----------

BIBLIOGRAFIA.....	98
--------------------------	-----------

INTRODUCCION

La idea de realizar esta tesis, está fundamentada por un lado, en el gran interés que existe en la industria por encontrar métodos de reducción de costos de producción o de mantenimiento. Y por otro lado, en nuestros propios intereses por desarrollar un tema que satisfaga nuestras inquietudes.

Parte de esta tesis se apoya en materias que durante la carrera fueron de gran interés para nosotros y de alguna manera, esto influyó en la decisión de investigar y desarrollar un trabajo que nos permitiera tener un conocimiento más seguro de dichas materias y sobre todo encontrar una aplicación útil.

Dentro de nuestra investigación se encuentran temas teóricos que finalmente nos llevaron a comprometernos con una aplicación útil de dichas teorías. En este sentido, las teorías relacionadas con la ciencia metal-mecánica de los materiales son la base que fundamenta nuestra tesis: recuperar piezas de hierro colado por medio de soldadura de arco.

En el capítulo 1 se analizarán los hierros colados de una manera muy amplia, analizando las propiedades metalúrgicas de cada una de las fundiciones que existen y también se hará una revisión de la microestructura que es uno de los factores más importantes a controlar dentro de los hierros colados.

En el segundo capítulo, se detallarán algunos de los procesos de soldadura por arco eléctrico con los que se pueden soldar los hierros colados. Para ello, se describirán los principios fundamentales de operación de cada uno de los procesos, sus ventajas y limitaciones, y para nuestro caso, la opción que ofrezca mejores resultados pensando en los tiempos de aplicación, costos, facilidad de aplicación, para así proponer una recomendación real. La ciencia de la soldadura por arco ha avanzado considerablemente los últimos años. La información recabada, fue obtenida de varias empresas productoras de soldadura, que tienen investigaciones muy completas acerca de los procesos.

Posteriormente, se estudiará la metalurgia de la soldadura de una manera muy concreta, para después, aplicar dicha teoría de la soldadura en cada uno de los hierros colados, considerando los posibles cambios físicos, químicos y metalúrgicos que son propios de los procesos de soldadura por arco eléctrico.

El capítulo 4, nos presenta algunas recomendaciones de aplicación para soldar piezas de hierro colado por medio de soldadura de arco eléctrico. En éste, se detalla la recuperación y posteriormente se dan algunas recomendaciones de cómo aplicar la soldadura para obtener los resultados más deseables. Ahí mismo se dará una secuencia de los pasos a seguir para evitar fallas en la aplicación en un ejemplo real.

Finalmente, el capítulo 5 nos presenta un estudio completo de la reducción de costos y para su mayor utilidad, hemos agregado un programa de computación que nos auxilie en la decisión de determinar cuándo, efectivamente estamos obteniendo una reducción de costos en el caso de la recuperación de piezas de hierro colado por medio de soldadura de arco.

CAPITULO I

A lo largo de la evolución del hombre, los avances obtenidos por la utilización del carburo de hierro son considerados de gran importancia ya que esta aleación se encuentra en la naturaleza y podemos obtener de ella lo que actualmente conocemos como acero y hierro.

El acero es una aleación de hierro y carbono, que va desde 0.025% hasta 2% de carbono en hierro y pequeñas cantidades de otros elementos como azufre, fósforo, manganeso, etc. y, si no tienen agregado ningún aleante especial, se le conoce como acero al carbono.

En la figura 1.1 se muestra el diagrama de fases hierro-carburo de hierro ($Fe-Fe_3C$), en el, se observa que la clasificación de los aceros se puede hacer en hipoeutectoide (que contiene menos de 0.8% C) y en hipereutectoide (que contiene más de 0.8% C).

Otra clasificación de los aceros al carbono es:

- Aceros bajo carbono de 0.008 a 0.15% máx. de carbono.
Acero dulce de 0.16 a 0.30% de carbono.
- Acero medio carbono de 0.31 a 0.50% de carbono.
- Aceros alto carbono 0.51 a 1.7 o 2% máx. de carbono.

El hierro colado será tema de un análisis más detallado, ya que forma parte integral de nuestro estudio y fundamentalmente el objetivo de la propuesta de esta tesis.

1.- HIERROS COLADOS

El hierro colado es una aleación de Hierro-Carbono con un contenido de éste elemento de 2 a 6.7% y cantidades apreciables de otros elementos como silicio, fósforo, azufre, magnesio, etc.

En la práctica el contenido de carbono se encuentra en el rango de 2 a 4.5%.

El hierro fundido posee propiedades muy distintas del hierro dulce y del acero, no sólo por su elevado contenido de carbono, sino también por su resistencia a la compresión de 2 a 5 veces más alta, excelente resistente al desgaste y buena capacidad de absorber vibraciones.

En efecto, mientras que los aceros pueden laminarse, trefilarse, forjarse en frío y en caliente, etc., el hierro sólo puede aplicarse a la fabricación de piezas mecánicas y objetos utilizables por moldeo y fusión, colando el metal en moldes, con excepción del hierro maleable.

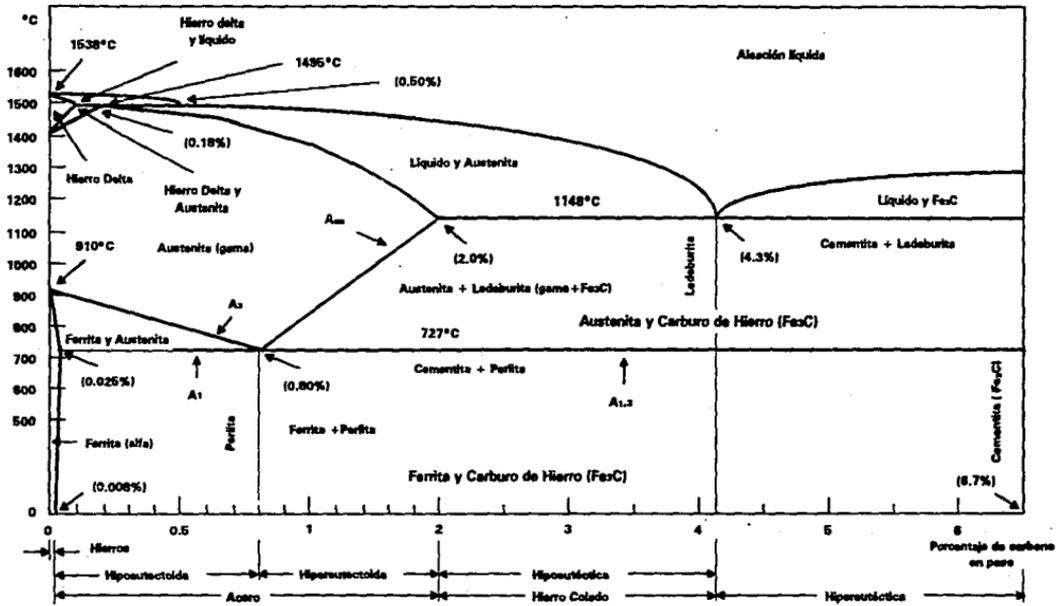


Figura 1.1.- Diagrama de equilibrio de fases Fe-Fe₃C

1.1.- METODO DE OBTENCION DEL HIERRO COLADO

Dependiendo de la forma en la que se encuentra el carbono en su microestructura, se clasifican las fundiciones en gris, blanca y nodular o dúctil, que se conocen como hierros colados primarios. Los hierros colados secundarios se producen por tratamiento térmico y aleación, a partir de los primarios y se conocen como hierros colados maleables.

El cubilote es la instalación más empleada para la fabricación de la mayoría de la piezas de fundición. Un porcentaje de piezas, mucho más pequeño, se obtiene utilizando hornos de cubilote y hornos eléctricos, siendo estas últimas instalaciones las más utilizadas para la fabricación de fundiciones de calidad, fundiciones aleadas y de alta resistencia. En algunos casos excepcionales se fabrican piezas de gran tamaño, colando directamente la fundición desde el alto horno.

El horno cubilote, consiste de un tubo vertical de acero revestido con ladrillo refractario, todo ello montado en una base soportada por cuatro columnas de acero. Muchos usuarios agregaron al horno una puerta abisagrada en la placa base, que se puede abrir para permitir la remoción del residuo del horno al final de la fundición. La figura 1.2 describe los componentes de un horno de cubilote.

Antes de cargar el cubilote, se construye una cama de arena de unos 15 cm de grueso en el fondo removible, dándole una pendiente hacia la salida del metal. Además se deja un orificio (escoriadero) a unos 15 cm abajo de las toberas, para la remoción de escoria, misma que se realiza a intervalos adecuados durante la fusión.

Para producir el hierro colado; se introduce el coque de relleno en trozos bastante voluminosos, repartidos con uniformidad y a continuación se alimentan trozos pequeños de chatarra de hierro colado para impedir un brusco descenso del coque, si los trozos de hierro fueran excesivamente voluminosos. El coque es usado como combustible para el proceso de refinado. Sobre esta chatarra se cargan lingotes y piezas de mayor peso; el lingote se quebranta en una machacadora de mandíbulas para no introducirlos enteros y causen algún disturbio en la fusión.

Es importante recordar que las fundiciones de hierro colado son producidas, generalmente, por segunda fusión del arrabio con cantidades controladas y seleccionadas de chatarra, por lo que, en muchos de los casos (por lo menos con la mayoría de los fundidores pequeños que existen en México), la calidad del hierro colado depende de la buena o mala selección de chatarra que se ocupa en la fundición.

En cuanto al fúndente, piedra caliza (CaCO_3), su calidad ejerce una influencia considerable en el proceso, recomendándose la piedra caliza pura con un elevado contenido de óxido de calcio (CaO), pues funde tan pronto como se alcanza la zona de fusión; para ello, se acondiciona en una proporción del 25 al 45% del peso del coque, para que la escoria resultante sea de fusión fácil.

La sangría puede ser continua o intermitente: la primera reúne sensibles ventajas que justifican la adopción de un anticrisol, pues con este, el hierro fundido y la escoria van saliendo continuamente evitando retrasos en la fusión.

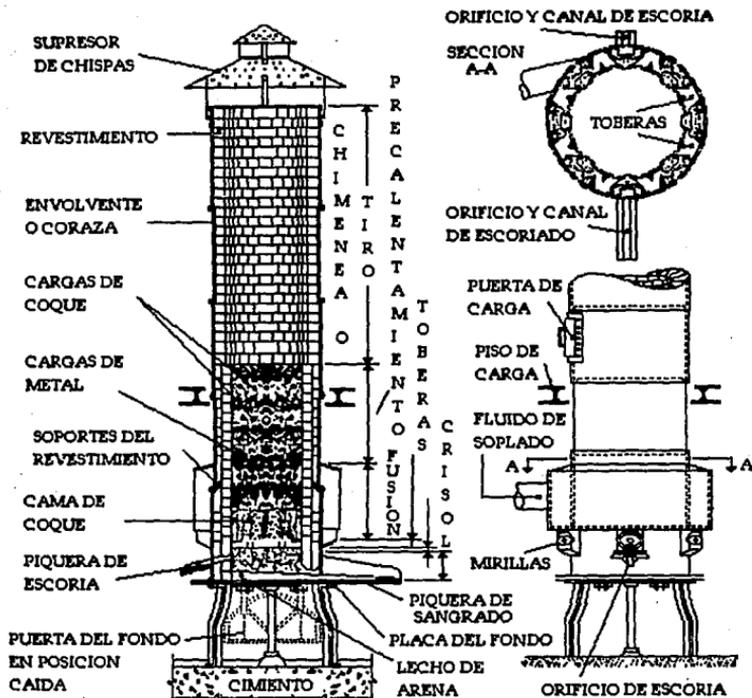


Figura 1.2.- Vistas del cubilote mostrando diversos detalles, secciones y zonas.

Para lograr que la fusión sea uniforme, segura y eficiente es indispensable una buena combustión y disponer de aire abundante, para ello, se pueden adaptar al proceso ventiladores rotativos o turboventiladores que colaboren proporcionando el volumen y la velocidad del aire que se introduce en la zona de fusión.

El contenido de carbono en las fundiciones, prácticamente, varía entre 1.7 y 4.5%. Aunque las fundiciones normales no son particularmente resistentes sino, por el contrario, frágiles, se usan mucho en la industria a causa de su bajo costo y su facilidad de fundición y colada.

Al llevar a cabo la producción de hierros colados, la estructura de las fundiciones se ve afectada por los siguientes factores:

A) EL TIEMPO DE SOLIDIFICACION. Las solidificaciones lentas permiten la formación de grafito, tendiendo a solidificar en la forma gris. Una solidificación más rápida tendrá tendencia a formar estructuras blancas. Las inserciones de metal en el molde tienen la finalidad de producir superficies endurecidas en determinadas zonas de la pieza.

B) CONTENIDO DE CARBONO. Cuanto menor es el contenido de carbono mayor es la tendencia a la formación de hierro colado gris.

C) PRESENCIA DE OTROS ELEMENTOS. Algunos elementos ayudan a la formación de grafito en la pieza colada. El silicio y el níquel tienen gran tendencia grafitizante.

D) EFECTO DEL TRATAMIENTO TERMICO. Un calentamiento prolongado en la fundición blanca será causa de que tenga lugar la grafitización. Este fenómeno es usado para producir hierro colado maleable. El grafito es menos denso que la cementita y si ésta se descompone en ferrita y grafito durante el tratamiento térmico, a este cambio acompañará un aumento de volumen debido a que el grafito descompuesto tiene menor densidad que el hierro. Este fenómeno es llamado crecimiento en las fundiciones, y deben ser grafitizadas totalmente a alta temperatura antes de su aplicación.

1.2.- MICROCONSTITUYENTES

Pueden distinguirse diferentes microconstituyentes del hierro fundido. Analicemos a continuación las características y propiedades de los microconstituyentes que generalmente están presentes en el hierro fundido.

GRAFITO. La proporción del grafito en la pieza fundida depende del procedimiento adoptado para la colada, de la velocidad de enfriamiento, por supuesto, de la composición química del metal, factores que introducen las variaciones en las propiedades mecánicas de la pieza obtenida, como por ejemplo, la influencia del grafito puede afectar en: la dureza y resistencia son menores, la ductilidad se aproxima a cero, el módulo de elasticidad se reduce, la tenacidad y medida al impacto se reducen seriamente. Por otra parte, el grafito imparte algunas características únicas y valiosas que hacen a los hierros fundidos superiores a los aceros y otros materiales para ciertos objetos; estos son: la resistencia a la deformación bajo calentamiento y enfriamiento aumenta, resistencia al desgaste mejora, la resistencia a la corrosión y a la oxidación es buena, tiene mejor colabilidad y menor contracción en la solidificación. En el hierro gris las laminillas de grafito, interpuestas en el hierro, disminuyen las propiedades mecánicas en la pieza fundida. Por otra parte, el valor de la resistencia de la pieza depende del tamaño y la distribución de las laminillas de grafito: cuanto más pequeña y más uniforme sea la distribución, tanto mayor será la resistencia de la pieza fundida.

FERRITA. La ferrita es hierro puro; la estructura se presenta bajo el microscopio en forma de granos cristalinos irregulares, los cuales están separados entre sí por líneas delgadas, como se observa en la figura 1.3. Se trata de un constituyente blanco, dúctil y magnético.



Figura 1.3.- Las zonas blancas muestran la microestructura correspondiente a la ferrita y las zonas oscuras a la perlita (ferrita + cementita).

CEMENTITA. La cementita es un carburo de hierro (Fe_3C) es muy dura probablemente por arriba de 750 Brinell, resistente a la abrasión y frágil. La cementita y la ferrita se encuentran en forma de capas o laminillas alternadas en la perlita.

PERLITA. La matriz de la mayoría de los hierros comerciales está compuesta en parte por perlita. Esta se forma a la temperatura eutectoide y consiste en ferrita y un cierto porcentaje de cementita, como se indica en la figura 1.3. Tiene una dureza Brinell de 200 aproximadamente.

AUSTENITA. Se llama austenita a una solución de carbono en hierro gama. El hierro gama es la forma no magnética de hierro a alta temperatura.

ESTEADITA. La steadita es un compuesto de naturaleza eutéctica, duro y frágil y de bajo punto de fusión que aparece en las fundiciones de alto contenido en fósforo. (En general, se presenta cuando el $P > 0,15\%$). La steadita tiene un 10% de fósforo y su peso específico es próximo al del hierro. Como casi todo el fósforo que contienen las fundiciones se halla formando parte de la steadita, tendremos que una fundición con un 1% de fósforo, por ejemplo, tiene aproximadamente en su microestructura 10% de steadita.

En la fundición gris la steadita está compuesta de un eutéctico celular binario de ferrita y fosforo de hierro (figura. 1.4). En las fundiciones atruchadas y blancas la steadita está constituida por un eutéctico ternario de ferrita, fosforo de hierro y cementita. El fosforo de hierro que forma parte de la steadita tiene una dureza muy elevada, 600 a 700 Vickers, y la steadita suele tener de 300 a 350 Vickers. En las fundiciones grises se observa que casi siempre en las proximidades de la steadita la dureza suele ser un poco más elevada que en las demás zonas.

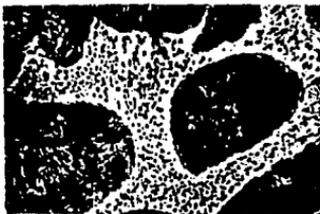


Figura 1.4.- Eutéctico de Steadita(X1000) formado por agrupaciones de fosforo de hierro sobre un fondo blanco de ferrita. Se observan también grandes cristales negros de perlita.

LEDEBURITA. Es el constituyente eutéctico que se forma en el enfriamiento de las fundiciones a 1145°F aproximadamente, en el momento en que termina la solidificación. Está formada por 52% de cementita y 48% de austenita saturada. La ledeburita no existe a la temperatura ambiente en las fundiciones ordinarias, debido a que en el enfriamiento se transforman en cementita y perlita. Sin embargo, en las fundiciones se pueden conocer las zonas donde existió la ledeburita, por el aspecto eutéctico con que quedan esas agrupaciones de perlita y cementita.

1.3- CLASIFICACION

El hierro en estado líquido no contiene grafito, pues todo el carbono se encuentra combinado con el, y recién al proceder al enfriamiento de la solución, se efectúa la precipitación correspondiente. Como regla general debe entenderse que, el enfriamiento lento favorece a formación del grafito, la cual también se aumenta en la medida que se eleva el contenido total de carbono en hierro. De esta regla se desprende que, piezas de hierro colado, enfriadas en forma rápida, poseen una dureza más elevada que las enfriadas en forma lenta. Igualmente se comprende que el espesor de la piezas tienen una influencia importante sobre las propiedades mecánicas, las cuales pueden ser distintas por el mismo hierro, según se trate de objetos con espesores finos o gruesos. En efecto, una pieza que tiene secciones gruesas y finas, las secciones gruesas tardan más tiempo en enfriarse, lo que trae como consecuencia que las secciones gruesas tienen una resistencia menor que las partes finas.

Para eliminar éste inconveniente se prepara las mezclas de acuerdo con los espesores de las piezas que se propone fundir, variando el contenido de los elementos, los que tienen una influencia sobre la precipitación del grafito.

Las fundiciones se clasifican en:

Hierro Blanco: carburo masivo	} Matriz:	
Hierro Gris: grafito laminar		Perlítica,
Hierro esferoidal: grafito esferoidal		Ferrítica o
Hierro Maleable: grafito en forma de terrones (carbono revenido)		Semiperlítica.
Hierro Aleado		

1.31.- HIERRO BLANCO

La fundición blanca solidifica con todo su carbono en el estado combinado, principalmente como carburo de hierro (figura 1.5) Fe_3C (cementita). La fundición blanca no contiene grafito libre, como la fundición gris, la fundición maleable y la fundición nodular. El nombre de fundición blanca deriva del hecho de que, sobre la superficie de una rotura reciente, se observa una fractura blanca brillante.

La fundición blanca es muy dura y resistente al desgaste, tiene una elevada resistencia a la compresión, pero tiene baja resistencia al impacto y es muy difícil de mecanizar.

En la gráfica de fases de hierro blanco (figura 1.6) observamos que el carbono se precipita durante los tres períodos importantes (hierro con 3% de carbono).

1. Por debajo de $2098^{\circ}F$ ($1148^{\circ}C$): la reacción eutéctica, Ledeburita \rightarrow austenita + carburo.
2. De 2098 a $1341^{\circ}F$ (1148 a $727^{\circ}C$): del eutéctico al eutectoide, Austenita \rightarrow austenita + carburo.
3. A $1341^{\circ}F$ ($727^{\circ}C$): la reacción eutectoide, Austenita \rightarrow ferrita + carburo (como perlita).



Figura 1.5.- Microestructura de una fundición blanca X200. Se observan los agrupamientos de pequeñas partículas de perlita (negro) sobre fondo de cementita (blanco), las grandes masas negras son de perlita.

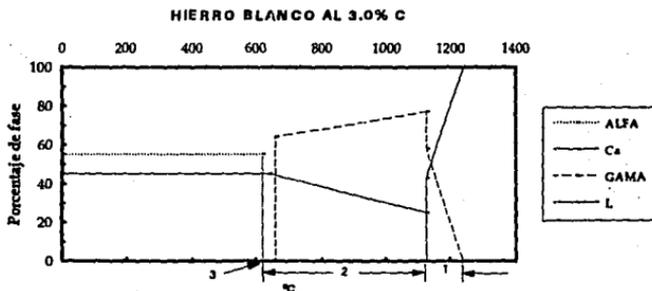


Figura 1.6.- Gráfica de fracción para hierro fundido blanco.

Se debe observar que en la reacción 1 se forman carburos de líquido. En la reacción 2 el carburo se cristaliza sobre el carburo existente, y en la reacción 3 se forma la perlita. El producto final, por lo tanto, contiene un alto contenido de carburo y es duro y frágil.

Las diversas variedades de fundición blanca son:

Fundición blanca normal.- con 2.5 a 3% de carbono y 0.5 a 0.8% de silicio. La fractura se presenta completamente blanca a causa del carburo en forma de carburo, caracterizándose por su dureza y fragilidad. De hallarse libre de azufre se aplica a la obtención de la fundición maleable.

Fundición blanca atruchada.- modificando la dosificación y ajustando la velocidad de enfriamiento, se puede conseguir que la pieza solidifique con una capa de fundición blanca en la superficie, soportada por un núcleo de fundición gris. Con 3.5 a 4.5% de carbono, 0.5 a 1.5% de silicio y menos del 1% de manganeso, aplicándose normalmente al afino.

1.3.2.- HIERRO GRIS

La fundición gris se caracteriza por esta coloración, una densidad media de 7 a 7.2, fundiendo a unos 1220°C, adquiriendo a esta temperatura excelente fluidez, moldeándose perfectamente y labrándose bien en las máquinas herramientas modernas.

En cuanto a la velocidad de enfriamiento ha de observarse que cuando el hierro fundido se encuentra en estado líquido, contiene el carbono disuelto y combinado y si al proceder a la colada se hace enfriar rápidamente, vertiéndolo en un molde metálico el carburo no dispone del tiempo suficiente para descomponerse en sus dos componentes, subsistiendo en la forma de carburo de hierro, que caracteriza la fundición blanca.

Al contrario, si el enfriamiento es lento, el carburo se descompone saliendo libre el carbono, que queda presionado en forma de minúsculas laminillas de grafito en la masa de hierro presentando la coloración gris característica de esta clase de fundición.

La mayor dimensión de las laminillas puede variar alrededor de 0.05 a 1 mm. Debido a su baja densidad, las laminillas de grafito ocupan aproximadamente el 10% del volumen de la aleación.

La figura 1.7 corresponde a una microestructura de una fundición gris ordinaria donde queda perfectamente evidenciado el grafito laminar.

En la fundición gris pueden considerarse las variedades siguiente, dependiendo de su microestructura:

Fundición gris perlítica, cuya estructura está compuesta de perlita y grafito laminar. En esta fundición el 0.7-0.8% de C se encuentra en forma de cementita (Fe_3C), que entra en la composición de la perlita.



Figura 1.7.- Fundición gris ferríticaX200. Laminas de grafito sobre un fondo blanco de cristales de ferrita.

Fundición gris ferrito-perlítica, su estructura está formada por perlita, ferrita y grafito laminar.

Fundición gris ferrítica, su estructura está formada por ferrita y grafito laminar. En este caso todo el carbono se encuentra en forma de grafito.

Para determinar aproximadamente la microestructura en función del contenido de carbono y silicio y de la velocidad de enfriamiento (del espesor de las paredes de la pieza de fundición) se pueden emplear los diagramas estructurales (figura 1.8). Estos muestran que para el contenido dado de carbono, el proceso de grafitización transcurre más completo, cuanto más silicio contiene el hierro colado.

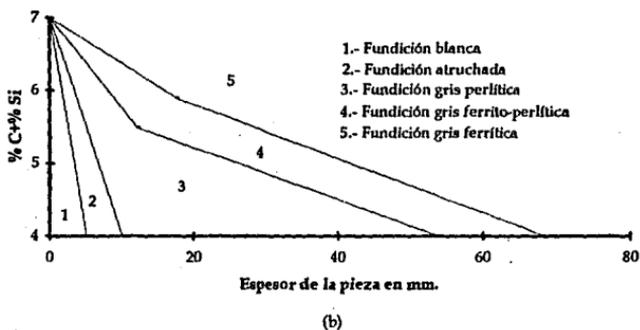
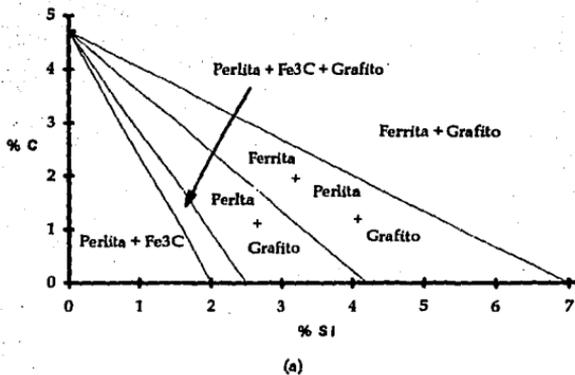


Figura 1.8.- Diagramas estructurales de las piezas de hierro colado con un espesor de las paredes de 50 mm aprox. con diferentes contenidos de carbono y silicio (a) y con diferentes espesores de las paredes de la pieza de fundición y distintos contenidos totales de carbono y silicio (b).

El alto contenido en carbono y las laminillas de grafito proporcionan a la fundición gris las siguientes propiedades típicas:

1. El más bajo punto de fusión de las aleaciones férreas, por lo que pueden utilizarse para los moldes materiales refractarios baratos.
2. Alta fluidez (colabilidad) en estado de fusión, por lo que pueden obtenerse piezas fundidas con diseño complicado o paredes delgadas.
3. Excelente maquinabilidad, mejor que la del acero.
4. Alta capacidad de amortiguamiento y posibilidad de absorción de vibraciones.
5. Elevada resistencia al desgaste, incluso por deslizamiento.
6. Baja ductilidad y baja resistencia al impacto comparadas con las del acero.

Debido a su excelente estructura metalúrgica, poseen una extensa gama de propiedades industriales muy estimadas, incluyendo resistencia mecánica y resistencia a la corrosión.

1.3.3.- HIERRO ESFEROIDAL

Recibe el nombre de fundición esferoidal dada la forma que adopta el grafito que contiene (figura 1.9). Igualmente se le puede definir como fundición dúctil o nodular.

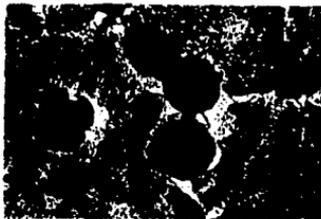


Figura 1.9.- Grafito esférico (negro) sobre un fondo de perlita y ferrita fabricada con adición de manganeso.

El contenido en carbono oscila generalmente entre el 3,5 y el 4% y el contenido en silicio, entre el 1 y el 2,5%, pero en las composiciones preparadas para fines especiales, el intervalo de ambas puede ser mayor.

El contenido en manganeso está comprendido por lo general en el intervalo de 0.10 a 0.60%, y el del fósforo en el 0.020 a 0.050%; el contenido normal en azufre es inferior al 0.020%.

Los elementos de aleación intensifican normalmente el efecto del carbono, y su efecto sobre la templabilidad de la fundición dúctil es grande, puesto que se trata de una aleación con un contenido en carbono elevado.

El contenido en magnesio oscila entre el 0.020% y el 0.10%, siendo el intervalo de composición normal el de 0.045 a 0.060%. Existen algunos elementos que son nocivos para la formación de grafito de buena calidad; el arsénico, antimonio, plomo y titanio.

Mientras que el hierro gris es excelente para piezas tales como bloques de motor, debido a que las láminas de grafito lo hacen fácilmente maquinable, es mejor una forma de grafito esferoidal para obtener una mayor resistencia. Además, el grafito que se precipita de 2098 a 1341°F (1148 a 727°C) y en el eutectoide continúa cristalizándose en forma esferoidal. La estructura final del hierro dúctil ferrítico es, por lo tanto, grafito esferoidal más ferrita. Las cantidades de las fases y las composiciones son las mismas que en el hierro gris ferrítico, pero la forma diferente del grafito proporciona el doble de resistencia a la tensión y una ductilidad 20 veces mayor.

La fundición esferoidal es uno de los materiales modernos que se distingue por su alta resistencia, tenacidad y ductilidad, todo ello unido a excelentes características de colabilidad y mecanabilidad. Igualmente posee un elevado módulo de elasticidad y buena resistencia al desgaste y a la corrosión.

Tipos de fundiciones nodulares más generalizados:

Las fundiciones nodulares pueden producirse en una amplia gama de estructuras y propiedades mecánicas, resultado de los procesos de aleación y tratamiento térmico.

Fundición esferoidal ferrítica.- Al someterse la fundición esferoidal perlítica a un recocido la estructura de la matriz se vuelve ferrítica; el carbono combinado se libera, agrupándose en

forma de grafito nodular en la matriz ferrítica. Cuando este tiempo de fundición se encuentra en tal estado posee la máxima ductilidad y tenacidad y no puede ser endurecido por el temple.

Fundición esferoidal perlítica.- Estructuralmente es la que corresponde a las composiciones ordinarias en estado bruto de colado y con secciones máx. de 50 mm. Una gran parte del carbono está presente en forma combinada, estando compuesta su estructura por ferrita y cementita mezclada íntimamente (perlita), más nódulos de grafito.

Este tipo de fundición esferoidal se caracteriza por su tenacidad y dureza, siendo su resistencia a la tracción el doble que la que corresponde a una fundición gris ordinaria.

Las propiedades mecánicas de la fundición esferoidal en estado bruto de colada pueden ser mejoradas sometiendo el material a un tratamiento de normalización.

Fundición esferoidal austenítica.- La fundición esferoidal austenítica esta aleada con níquel, níquel-manganeso, níquel-silicio-cromo y se utilizan según sea su composición para que resistan a la corrosión por sus excelentes propiedades mecánicas y resistencia al calor, etc.

Fundiciones esferoidales aleadas.- Con la adición de porcentajes adecuados de níquel, molibdeno, cromo, o bien otros elementos, es posible conseguir estructuras que se caractericen por ciertas propiedades mecánicas, pudiéndose obtener piezas moldeadas con estructuras martensíticas, austeníticas o aciculares.

Fundición dúctil muy aleada.- A esta clase pertenecen las aleaciones de níquel con un contenido en Ni del 18 al 36%, que se fabrican porque tienen características de corrosión y

resistencia al calor muy buenas y otras propiedades especiales, tales como una dilatación controlada; las relaciones entre estas fundiciones y los materiales que contienen grafito con bajos contenidos de elementos de aleación son las mismas que las que existen entre los aceros austeníticos y los aceros poco aleados.

1.3.4.- HIERRO MALEABLE

La diferencia entre el hierro maleable y el hierro gris o el hierro dúctil está en la estructura, siendo la del hierro maleable, tal como sale de fundición, es la misma que la de fundición de hierro blanco y que no contiene grafito. En otras palabras, la velocidad de enfriamiento y las composiciones producen hierro colado blanco dentro de la pieza fundida original. La pieza fundida fría se calienta en un horno de maleabilización a 1750°F (954°C) para dar al carburo de hierro la oportunidad de cambiar a la estructura de equilibrio del hierro más grafito.

El hierro maleable es más fuerte y más dúctil que la fundición de hierro gris, porque durante el tratamiento térmico el grafito se forma en nódulos irregulares (algo parecido al grafito esférico); este grafito se denomina carbono de revenido. Desde el descubrimiento del hierro dúctil muchos productores de hierro maleable han cambiado al nuevo material, aunque el hierro maleable se emplea todavía en muchas piezas fundidas que tienen secciones delgadas.

Es interesante observar los cambios estructurales en el ciclo del tratamiento térmico del hierro maleable; que a continuación se describirá:

Etapa 1. Grafitización. Calentamiento a 1750°F (954°C) durante 12 horas. La estructura de la austenita más carburo se transforma en austenita más carbono revenido.

Etapa 2. Enfriese de 1750 a 1400°F (954 a 760°C). Enfriese lentamente a la velocidad de 10 °F/hora (5.5 °C/hora) hasta 1200°F (649°C).

Mientras que la austenita se habría transformado normalmente en ferrita + carburo, la anterior velocidad de enfriamiento lento da ferrita + grafito en el intervalo de temperatura eutectoide. El grafito se cristaliza sobre el carbono de revenido existente que se formó a temperaturas más elevadas. La estructura final es ferrita más carbono de revenido. La microestructura del hierro maleable se muestra en la figura 1.10.



Figura 1.10.- Nódulos de grafitoX100 (negro) sobre un fondo de cristales de ferrita (blanca).

En la fundición maleable podemos encontrar la siguiente tipos:

Fundición maleable blanca.- No suele colarse en moldes mas que cuando los espesores de pared no pasan de 30 mm y el peso de la pieza alcanza generalmente hasta 40 kg. Mediante el proceso de recocido durante el temple, se descompone en la fundición maleable blanca el carbono del carburo, que desaparece total o parcialmente y da lugar a la formación de ferrita y carbono elemental (carbono de recocido). A causa de la descarburación progresiva en la capa exterior de la fundición, esta resulta ferrítica y hacia el centro del núcleo se presenta perlita y carbono de recocido en cantidad creciente. Piezas fundidas de paredes muy gruesas contienen en el núcleo carburo de hierro (cementita), al paso que las paredes delgadas constan casi únicamente de ferrita. Esto significa que la fundición maleable blanca es, según las distintas zonas de descarburación, un material heterogéneo, y que solo la fundición maleable blanca de paredes delgadas puede ser considerada como homogénea.

Fundición maleable negra y de núcleo negro.- En cuanto al comportamiento de sus componentes de aleación para la fundición maleable negra existen las mismas condiciones que para la blanca. Estas clases de fundición homogéneas constan de ferrita y carbono de recocido o de una faja perlítica.

1.3.5.- HIERRO ALEADO

Los hierros aleados son aquellos que contienen Ni, Cr, Mo, Cu en porcentajes suficientes para mejorar las propiedades físicas o mecánicas de las fundiciones ordinarias o para proporcionarles alguna otra propiedad en especial como la alta resistencia al desgaste, al calor, a la corrosión, etc.

El estudio de la influencia de los elementos de aleación de las fundiciones es bastante más complicado que en los aceros. Puede decirse que los elementos de aleación modifican grandemente la microestructura de las fundiciones y con ello su dureza y resistencia, estando en ocasiones estos cambios influenciados por una variación de la templabilidad. Los elementos de aleación modifican también, como en los aceros, la situación de los puntos críticos y además ejercen una acción muy importante y compleja sobre la grafitización.

Los elementos de aleación más importantes son:

El níquel actúa como grafitizante, disminuyendo los carburos y afinando el grano de hierro. Por medio de esta adición se obtiene un aumento de la resistencia mecánica y de la homogeneidad de la pieza fundida. El níquel es el elemento aleador más importante para mejorar la calidad de la fundición.

El cromo aumenta el porcentaje de carbono combinado; pequeños porcentajes mejoran las propiedades mecánicas y la resistencia a la corrosión. Sin embargo, a veces, proporciona cierta fragilidad a la pieza fundida.

El cobre se agrega solo raras veces, ya que la cantidad máxima admitida no debe pasar del 7%, siendo el efecto de este elemento aleador la resistencia a la corrosión, que no es tan buena como el del cromo.

El molibdeno agregado en una proporción de 0.25 a 1.25% disminuye la formación de laminillas de grafito, aumentando la resistencia a la tracción, al impacto y a la flexión.

CAPITULO II

2.- PROCESOS DE SOLDADURA POR ARCO

Las piezas de hierro colado pueden ser recuperadas por algunos procesos de soldadura como oxi-acetileno, polvos y arco eléctrico. Para el análisis de ésta investigación, nos enfocaremos a los procesos de arco eléctrico más utilizados en la industria.

A continuación se describen los procesos SMAW, FCAW y GTAW que consideramos más adecuados para la recuperación de piezas de hierro colado por medio de soldadura de arco.

2.1.- PROCESO SMAW (SHIELDED METAL ARC WELDING)

SOLDADURA DE ARCO CON ELECTRODO REVESTIDO

2.1.1.- DEFINICION Y DESCRIPCION GENERAL.

Se describe como un proceso de soldadura de arco en el cual la unión de un metal es producido por el calor del arco eléctrico que se mantiene entre la punta de un electrodo revestido y la superficie del metal base.

El núcleo del electrodo revestido es una varilla de metal sólido que conduce la corriente eléctrica para producir el arco y es la que provee de material de relleno para la junta. Las funciones del recubrimiento son las siguientes:

- 1) Proteger el metal líquido (charco de soldadura) por medio de la producción de gases como el CO_2 .
- 2) Proteger el depósito por medio de la escoria que se produce en el proceso, evitando un enfriamiento brusco del metal fundido e impidiendo la entrada de aire.
- 3) Estabilizar el arco, produciendo gases conductores como las sales de potasio y sales de sodio.
- 4) Proporciona elementos refinadores (Mn y Si) que tienden a combinarse con las impurezas del metal base (S y P), los cuales ya mezclados pasan a formar parte de la escoria.
- 5) Para no afectar las propiedades mecánicas del metal base, agrega elementos aleantes.

2.1.2.- PRINCIPIOS DE OPERACION

El electrodo y la pieza de trabajo son parte del circuito eléctrico ilustrado en la figura 2.1. El circuito empieza con una fuente eléctrica de poder, unos cables de soldar, un porta electrodo y un electrodo de soldadura de arco. Uno de los cables de la fuente de poder es conectado a la pieza de trabajo y el otro es conectado al porta electrodo.

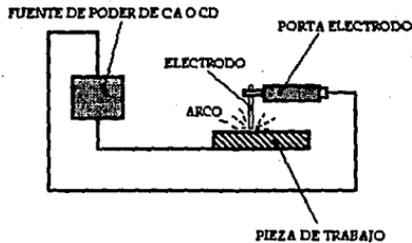


Figura 2.1.- Elementos típicos del proceso SMAW.

EL relleno del metal base se lleva a cabo según se consume progresivamente el electrodo. El arco se mueve en la pieza de trabajo a una velocidad de avance apropiada y relacionada a la longitud de arco, depositando y fusionando una porción así del metal base y agregando material de relleno. El proceso requiere corriente eléctrica suficiente para depositar el electrodo, dependiendo de la de la junta y tipo de éste. El tamaño y tipo de electrodo revestido define el voltaje y corriente requerida. La corriente puede ser directa o alterna dependiendo para que se va a usar el electrodo, para ello la fuente de poder debe contar con un nivel de corriente que responda directamente a las variables del proceso.

Cuando conectamos el electrodo al polo positivo (polaridad inversa), la penetración es mayor y el rango de deposición disminuye. Caso contrario cuando conectamos el electrodo al polo negativo (polaridad directa), el rango de deposición es mayor y la penetración disminuye.

En el proceso de electrodo revestido es necesario cuidar los diferentes parámetros de aplicación dependiendo de el espesor de la placa, tipo de material, tipo de junta y condiciones de servicio de la pieza; estos parámetros nos define como aplicar un buen procedimiento de soldadura:

- 1) Tipo de electrodo.
- 2) Tipo de corriente.
- 3) Amperaje.
- 4) Voltaje o longitud de arco.
- 5) Velocidad de avance.
- 6) Angulo de avance y trabajo.
- 7) Estabilidad de arco.
- 8) Técnica de aplicación.

2.1.3.- ELECTRODOS

En el proceso SMAW se puede aplicar a una gran variedad de metales base. Dependiendo de la especificación del metal y del núcleo del electrodo se puede utilizar electrodos que cumplen con la composición y propiedades del metal a soldar, aprovechandose los siguientes metales base que pueden ser soldables con este proceso:

- 1) Aceros al carbono.
- 2) Aceros baja aleación.
- 3) Aceros resistentes a la corrosión (aceros inoxidable).
- 4) Hierros colados.
- 5) Aluminio y aleaciones de aluminio.
- 6) Cobre y aleaciones de cobre.
- 7) Níquel y aleaciones de níquel.

Para una clasificación más detallada de los electrodos usados en los anteriores materiales la AWS (American Welding Society) y fabricantes de soldadura han realizado normas y especificaciones que cumplan con los requerimientos de soldadura.

2.1.4.- EQUIPO PARA PROCESO SMAW

Las máquinas de soldar nos proporcionan idea de la corriente nominal, en base a las necesidades de nuestro material de trabajo y el tipo de electrodos que se van a utilizar en nuestro proceso.

Se pueden clasificar en dos grandes grupos según, por el tipo de alimentación y corriente de entrada y salida:

- a) Tipo transformador.- monofásica con salida de corriente alterna.
- b) Tipo rectificador.- monofásica y trifásica las dos con salida de corriente alterna o corriente directa

Las fuentes de poder al operarse nos pueden proporcionar una siguiente clasificación; según sus características:

- 1) Fuente de poder de corriente constante (V.V. o C.C.)
- 2) Fuente de poder de voltaje constante (V.C. o C.V.)

Para este proceso es ideal utilizar fuentes de corriente constante como se puede observar en la figura 2.2. Ello facilitará la actividad del soldador que tenga poca habilidad en la estabilidad de la longitud de arco (voltaje de arco).

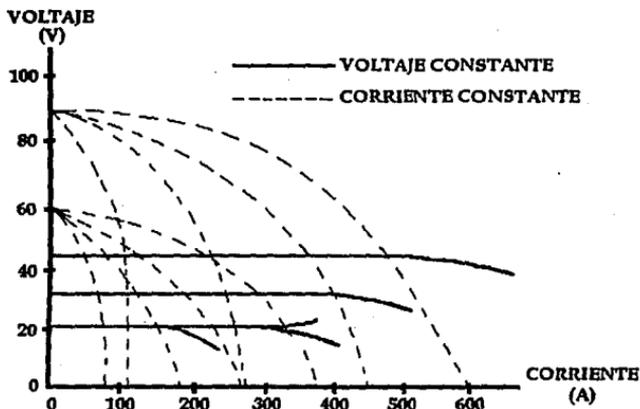


Figura 2.2.- Curvas típicas de voltaje y amperaje para fuentes de poder de corriente constante y voltaje constante.

2.1.5.- VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL SMAW

Este proceso es uno de los más utilizados, particularmente por soldadores de baja producción, mantenimiento y reparación del equipo y por la construcción del mismo.

Las ventajas de este proceso son:

- 1) El equipo es relativamente simple, barato, portátil y manejable.
- 2) El metal de relleno y los gases protectores provienen del mismo electrodo revestido.
- 3) El proceso es menos sensible a las corrientes de aire y a la transferencia, comparado con los procesos que requieren gas protector externo.
- 4) Puede ser usado en áreas de acceso limitado.
- 5) El proceso es utilizado en los metales y aleaciones más comúnmente usados.
- 6) Existen máquinas de soldar del tipo generador, con motor Diesel o gasolina que pueden llevarse al campo de aplicación y no requieren corriente eléctrica de alimentación.

Algunas desventajas del proceso pueden ser:

- 1) La eficiencia del electrodo revestido es de un 60%.
- 2) El proceso maneja bajos rangos de velocidad de avance y deposición.
- 3) El proceso es para bajos niveles de producción.

2.2.- PROCESO FCAW (FLUX CORED ARC WELDING)

SOLDADURA DE ARCO ELECTRICO CON NUCLEO DE FUNDENTE

2.2.1.- DEFINICION Y DESCRIPCION

Es un proceso de soldadura de arco que se usa en arco abierto en un continuo llenado de metal por medio de un electrodo de soldadura tubular. El proceso utiliza una protección de fundente que está contenido dentro del electrodo tubular, adicionalmente puede o no tener protección gaseosa externa.

El electrodo tubular consiste en un tubo metálico lleno de fundente que contiene varios materiales en forma de polvo. Durante la soldadura se produce una escoria protectora en la superficie del depósito.

Las características que distinguen el proceso FCAW de otros procesos es la inclusión de ingredientes que contiene el fundente en el electrodo. Las características de operación más sobresalientes son las propiedades y atributos mecánicos del resultado de la aplicación de la soldadura y el desarrollo tecnológico de estos electrodos.

El proceso ofrece dos variantes para la protección del depósito de soldadura y de la estabilidad de arco; estos métodos dependen de la protección que se tenga para evitar la contaminación (oxígeno y Nitrógeno). Un tipo, es el autoprotegido (FCAW-Self Shielded), con protección del depósito del metal debido a la descomposición y vaporización del núcleo de fundente por el calentamiento del arco, como muestra la figura 2.3. El otro tipo, el de protección gaseosa externa (FCAW-Gas Shielded) donde la protección se hace por un flujo

gaseoso adicional a la acción del núcleo de fundente. Con ambos métodos, el electrodo provee materiales substanciales productores de escoria para proteger la solidificación del metal soldado, como se muestra en la figura 2.4.

FCAW es normalmente un proceso semiautomático, también puede utilizarse con una máquina automática para soldar.

2.2.2.- PRINCIPALES CARACTERISTICAS DE OPERACION

Los beneficios de este proceso son una combinación de tres características generales:

- 1) La productividad que da una alimentación continua.
- 2) Los beneficios metalúrgicos que puede proporcionar el fundente.
- 3) Una escoria que protege el depósito de soldadura.

En este proceso se utilizan fuentes de poder de voltaje constante en las cuales existen las terminales o bornes que se conectaran a un alimentador y a la pieza de trabajo como se indica en la figura 2.5a. El alimentador es un dispositivo que consta de un motor de velocidad ajustable, y en el cual se conectan las mangueras del gas protector (en el caso de los tubulares con protección gaseosa) y el carrete que contiene la soldadura tubular. El alimentador tiene una salida para un accesorio conocido como antorcha o pistola la cual cuenta con un gatillo que acciona la apertura de arco e inicia la alimentación de alambre y gas protector. Para observar el funcionamiento de la antorcha la figura 2.5b nos da idea de ello.

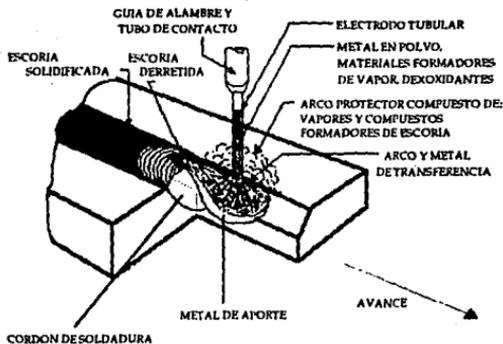


Figura 2.3.- Proceso de soldadura de arco con núcleo de fundente (autoprotegido).

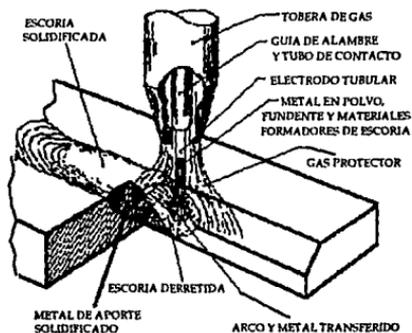


Figura 2.4.- Proceso de soldadura de arco con núcleo de fundente (protección con gas).

En la aplicación de FCAW los parámetros para controlar el proceso son la corriente de soldadura, el voltaje de arco, la extensión del electrodo, la velocidad de avance, el flujo de gas protector y el ángulo del electrodo.

CORRIENTE DE SOLDADURA.- La corriente de soldadura es proporcional al diámetro del electrodo, composición y extensión del electrodo. La relación que existe entre la corriente para un electrodo con protección gaseosa y un autoprotegido tienen diferencias respectivas que se pueden observar en la figura 2.6.

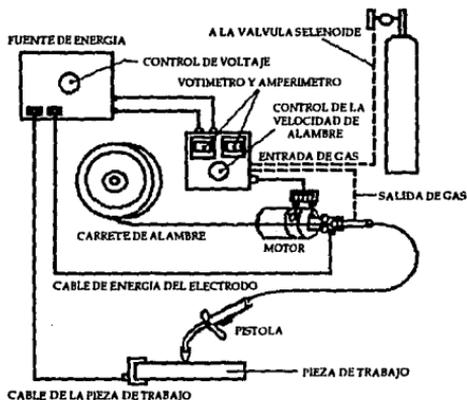


Figura 2.5a.- Equipo semiautomático para un FCAW.

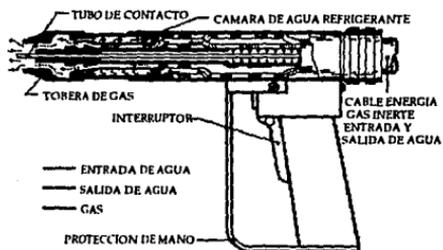


Figura 2.5b.- Antorcha típica utilizada en FCAW.

Al cambiar los rangos de corriente se tendrán los siguientes efectos:

- 1) Incrementando la corriente incrementamos la velocidad de deposición.
- 2) Incrementando la corriente incrementamos la penetración.
- 3) Excesiva corriente produce una corona de soldadura convexa y de no muy buena apariencia.
- 4) Corriente insuficiente produce una transferencia con salpicado.
- 5) Corriente insuficiente permite la entrada de nitrógeno para a su vez producir porosidad.

La corriente que se ocupa en este proceso es siempre corriente directa debido a que el motor del alimentador es de velocidad constante. La polaridad que se maneja con los electrodos tubulares depende de las especificaciones que da el fabricante de soldadura.

VOLTAJE DE ARCO.- El voltaje y la longitud de arco son dos términos muy relacionados. De este dependen la extensión del electrodo, el arco, el espesor de la pieza de trabajo y los cables de trabajo.

Un voltaje de arco demasiado largo puede producir un excesivo salpicado y una forma irregular del cordón. Con electrodos autoprotegidos, un alto voltaje de arco permite la entrada de nitrógeno.

EXTENSION DEL ELECTRODO.- En el proceso con electrodo tubular se recomienda conservar una extensión de $3/4$ a $1\ 1/2$ in, para electrodos con protección gaseosa y de aproximadamente $3/4$ a $3\ 3/4$ in para electrodos autoprotegidos, dependiendo de la aplicación.

VELOCIDAD DE AVANCE.- Este parámetro nos da la forma del cordón, la penetración en el metal base y la apariencia del depósito. A una baja velocidad de avance obtenemos una penetración mucho mayor que la que se obtiene a una alta velocidad. Una baja velocidad de avance y una corriente alta puede producir un sobrecalentamiento en el metal base. Esto puede causar una apariencia defectuosa de la soldadura y el atrapado de la escoria.

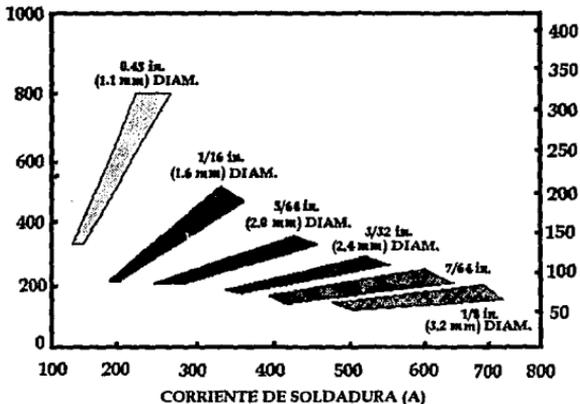


Figura 2.6a.- Rangos de velocidad contra corriente para electrodos protegidos con CO₂.

2.2.3.- VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL PROCESO FCAW

Algunas ventajas de este proceso son:

- 1) Altas velocidades de depósito.
- 2) Debido a los elementos que contiene el núcleo de fundente se refina y se mejoran las propiedades mecánicas del depósito.
- 3) Se obtiene una buena apariencia del cordón.

- 4) Fácil manejo de aplicación de soldadura con electrodo tubular.
- 5) Alto factor de operación de este proceso.
- 6) Utilizando electrodos autoprottegidos se elimina el gasto de equipo de gas protector.
- 7) Se obtiene una soldadura muy resistente al agrietamiento o fractura.

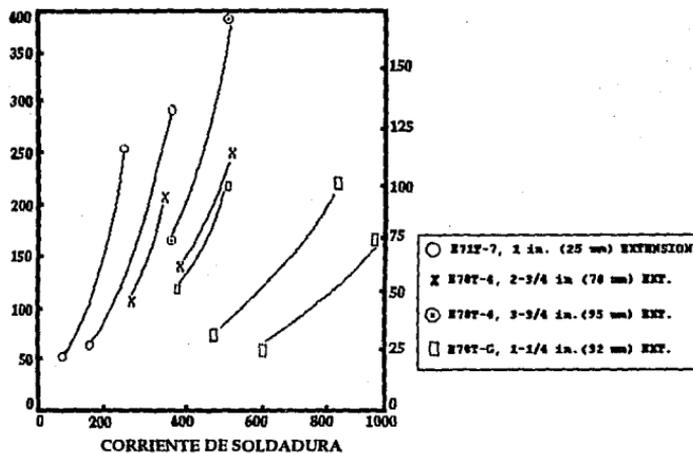


Figura 2.6b.- Rango de velocidad contra corriente para electrodos autoprottegidos.

Algunas desventajas del proceso pueden ser:

- 1) Solo se puede utilizar con metales ferrosos y aleaciones base níquel.
- 2) El proceso requiere de un equipo más complejo y costoso que el proceso con varilla revestida (SMAW).
- 3) Con electrodo de protección gaseosa se requiere la inexistencia de corrientes de aire.
- 4) En el proceso se produce una gran cantidad de humos que pueden dañar la salud del operario.

2.3.- PROCESO GTAW (GAS TUNGSTEN ARC WELDING)

SOLDADURA DE ARCO CON ELECTRODO DE TUNGSTENO Y GAS

2.3.1.- DEFINICION Y DESCRIPCION DEL PROCESO

Este es un proceso en el cual se usa un electrodo de tungsteno (no consumible) y una antorcha. El proceso es usado con protección gaseosa y sin la aplicación de presión. El proceso puede llevarse a cabo con o sin metal de aporte.

GTAW a comenzado hacer una herramienta indispensable para muchas industrias, debido a la alta calidad de aplicación y el bajo costo del equipo, ya que con el podemos manejar cualquier espesor de placa o metal base, con diferentes metales soldables (ferrosos y no ferrosos).

Para la aplicación de soldadura es necesario utilizar un gas protector inerte (Argón o Helio) es por ello que en el medio de la soldadura se le conoce como proceso TIG (Tungsten Inert Gas).

La figura 2.7 muestra como se lleva a cabo la operación de dicho proceso.

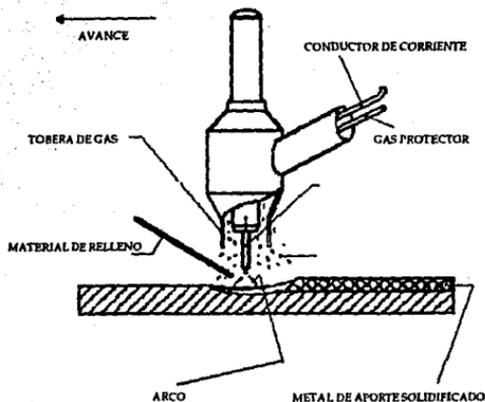


Figura 2.7.- Operación de un proceso de soldadura de arco con gas y un electrodo de tungsteno.

2.3.2.- PRINCIPIOS DE OPERACION.

Para la aplicación del proceso GTAW es necesario contar con una fuente de poder, un electrodo de Tungsteno que se encuentra dentro de la antorcha y gas inerte protector de nuestro cordón de soldadura; todo ello descrito en la figura 2.8.

El gas protector pasa a través de la antorcha para proteger el electrodo, el depósito de la soldadura y la solidificación del metal soldado de la contaminación de la atmósfera. El arco eléctrico se produce por el paso de la corriente a través del gas ionizado. El arco se estabiliza entre la punta del electrodo y la pieza de trabajo. Una vez que el arco y el charco de soldadura se estabilizan, la antorcha se mueve a lo largo de la junta y el depósito se acomoda

progresivamente en la superficie soldando metal contra metal (en el caso de no agregar metal de aporte).

Las variables primarias en el proceso son el voltaje, la corriente, la velocidad de avance y el flujo del gas protector. La cantidad de energía producida por el arco es proporcional a la corriente y el voltaje ($Q = (A \times V) / V_s$). La cantidad transferida por unidad de longitud de soldadura es inversamente proporcional a la velocidad de avance, únicamente para el caso en el que exista metal de aporte. El arco con Helio es más penetrante que con Argón debido a que es un gas con mayor poder calorífico. De alguna manera todas estas variables interactúan mutuamente y es imposible tratarlas como variables independientes cuando se establecen procesos de soldadura para la fabricación de juntas específicas.

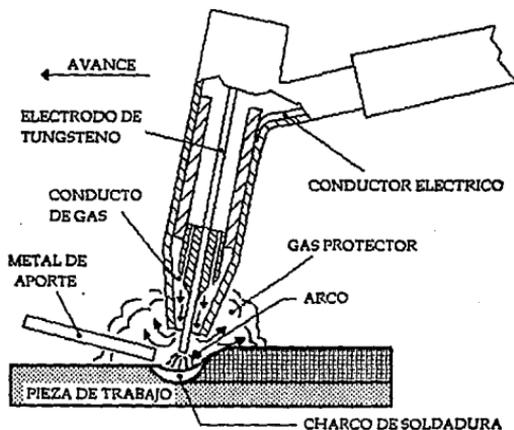


Figura 2.8.- Equipo típico para GTAW.

CORRIENTE DE ARCO.- Con la corriente de arco controlamos la penetración de la soldadura y el efecto es directamente proporcional. El proceso puede ser usado con corriente directa o

alterna, la elección depende del metal a soldar. La corriente directa con polaridad negativa del electrodo ofrece la ventaja de una mayor penetración y una mayor velocidad fusión, especialmente cuando se usa Helio como protección. La corriente alterna produce una limpieza catódica logrando la remoción de óxidos de la superficie de la junta de metales como el aluminio y magnesio. En este caso, el Argón puede ser utilizado para que la protección no salpique.

VOLTAJE DE ARCO.- El voltaje de arco es una variable dependiente, afectada por los siguientes parámetros:

- 1) Corriente de arco.
- 2) Forma de la punta del electrodo de tungsteno.
- 3) La distancia entre el electrodo y la pieza de trabajo.
- 4) Tipo de protección gaseosa.

A veces las otras variables tal como la protección gaseosa, electrodo y la corriente han sido predeterminadas, el voltaje de arco llega a ser una manera para controlar la longitud de arco, una variable crítica que es difícil de monitorear. La longitud de arco es importante debido a que afecta el ancho del cordón; el ancho del cordón es proporcional a la longitud de arco. En la mayoría de las aplicaciones la longitud de arco debe ser lo más corto posible.

Cuando el voltaje de arco se usa para controlar la longitud de arco en una aplicación especial, debemos de tener la precaución de observar las otras variables (enlistadas anteriormente) que pueden afectar dicho parámetro.

VELOCIDAD DE AVANCE.- La velocidad de avance afecta el ancho del cordón y la penetración del proceso. Sin embargo, el efecto sobre el ancho del cordón es más notorio que en la penetración. En otros casos la velocidad podría ser una variable dependiente,

seleccionada para obtener una calidad de soldadura y la uniformidad necesaria, bajo las mejores condiciones posibles con la combinación de otras variables. Generalmente la velocidad de avance se fija en un proceso de aplicación de soldadura mecanizada mientras que las otras variables, tal como la corriente y el voltaje, está variando para mantener el control de la soldadura.

2.3.3.- VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL PROCESO

Las siguientes, son algunas de las ventajas que ofrece GTAW :

- 1) Produce una soldadura de mayor calidad, generalmente libre de defectos.
- 2) Está libre de salpicadura, la cual ocurre con otros procesos de soldadura de arco.
- 3) Puede ser usada con o sin metal de aporte.
- 4) Permite un excelente control de la penetración de soldadura de paso de raíz.
- 5) Se puede sustituir el proceso de soldadura autógena por este, ya que es más barato y de mayor velocidad de aplicación.

Las siguientes, son algunas de las limitantes del proceso:

- 1) Las velocidades de deposición son menores que las velocidades obtenidas con los procesos que utilizan electrodo consumible.
- 2) Se requiere una habilidad y coordinación ligeramente mayor de parte del soldador, que en los procesos de microalambre o GMAW (Gas Metal Arc Welding).
- 3) Es más caro que el proceso con electrodo revestido para secciones delgadas mayores de 3/8 in. (10 mm).

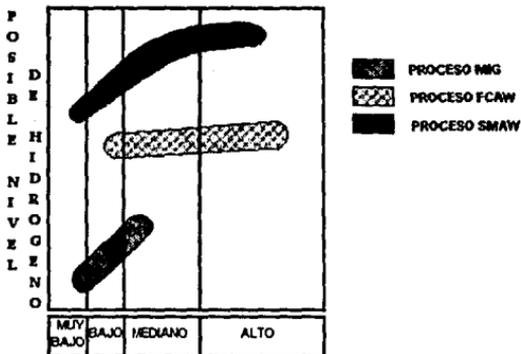
- 4) Posibles inclusiones de Tungsteno si el electrodo entra en contacto con el cordón de soldadura.
- 5) La contaminación del metal de aporte puede ocurrir si la protección gaseosa se interrumpe.
- 6) Posible contaminación o porosidad causada por el escurrimiento de agua que enfría el electrodo.
- 7) El sopleo de arco o deflexión de arco como en otros procesos.
- 8) Las dimensiones de la antorcha dificultan la aplicación en zonas de difícil acceso y maniobra.

Después de analizar cada uno de los procesos por los cuales se puede soldar una fundición de hierro colado, proponemos que el proceso SMAW es el más conveniente debido a:

- A) En base al equipo que se requiere, es el método más económico de soldadura por arco eléctrico.
- B) Existen varias opciones de electrodos para soldar hierro colado; y al mismo tiempo es la soldadura más fácil de conseguir en el mercado.
- C) Su aplicación no representa ninguna dificultad para el operario pues el equipo es muy práctico y no requiere de algo sofisticado.
- D) Este proceso, produce un calentamiento más controlado debido al bajo amperaje utilizado que nos permite prever que la microestructura no se afecte considerablemente, ya que ésta representa uno de los puntos más importantes a cuidar en la estructura metalográfica de los hierros colados.

E) Es uno de los procesos que se conocen comúnmente a nivel internacional como uno de los más recomendables para la soldadura de hierros colados.

F) Es un proceso mediante el cual se puede obtener un mejor control de hidrógeno en la soldadura.



NIVEL DE HIDROGENO EN LA SOLDADURA

CAPITULO III

3.- SOLDADURA

En la unión soldada de un metal podemos observar macrográficamente dos partes bien definidas:

- a) La zona fundida, constituida por el cordón de soldadura y la región adyacente.
- b) El metal base

La zona fundida de una unión soldada es a la vez sede de un cierto número de fenómenos, como son:

- a) Absorción de gases.
- b) Zona afectada por el calor.
- c) Precipitación de carburos.

3.1.- METALURGIA DE LA SOLDADURA

Los efectos metalúrgicos de soldadura son los efectos de calor, ya sea con un proceso de soldadura con una flama de gas, un arco metálico o resistencia eléctrica.

Cada fusión en la operación de soldadura hace intervenir una secuencia lógica de los eventos térmicos o de calor, ésto incluye:

- 1.- Calentamiento del metal.
- 2.- Manipulación del electrodo o antorcha para depositar el metal de soldadura.
- 3.- Enfriamiento del depósito tan bueno como el del metal base.
- 4.- En algunas instancias, poscalentamiento en la estructura interna para relevar esfuerzos.

En la figura 3.1 se muestra la variación de la temperatura del metal base durante su soldadura. El área "A" es metal calentado en un estado fácil de partir.

Como un resultado de la soldadura, la estructura soldada de metal ferroso puede ser martensítica, perlítica y en algunos casos austenítica. El soldador que conoce la metalurgia puede predeterminar la estructura que logrará después del enfriamiento del depósito. Es muy importante conocer las condiciones finales de la estructura después de aplicar un proceso, ya que con ésto determinamos el esfuerzo, la dureza, la ductibilidad, resistencia al impacto, resistencia a la corrosión y propiedades físicas y mecánicas similares del metal. Todas estas propiedades pueden ser afectadas por las condiciones que se dan durante la operación del proceso y también es posible que observando algunas de ellas se puedan evitar posibles dificultades.

Los efectos de calentamiento y enfriamiento no serán necesariamente los mismos para los metales no ferrosos y aleaciones. En algunos casos una diferencia considerable es el rango de temperatura que existe debido a otras características.

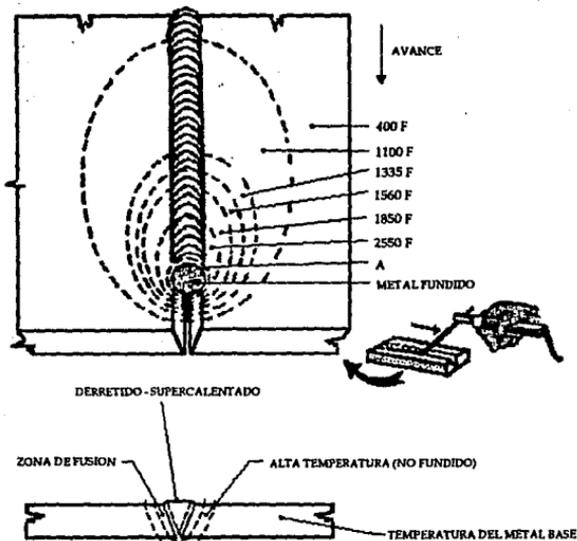


Figura 3.1.- Variación de temperatura del metal base durante la soldadura.

La soldadura de arco de metales ferrosos conlleva temperaturas muy altas. El resultado de ello es una fundición. El metal base junto a la soldadura es comparativamente frío y existe una variación considerable en la estructura de grano que se desarrolla dentro del área soldada, técnicamente esta área adjunta al metal base se conoce como zona afectada por el calor.

3.1.1.- ABSORCION DE GASES

Durante la aplicación de soldadura se debe tener un extremo cuidado con la protección del metal soldado, la posibilidad de que exista oxígeno o nitrógeno o ambos que puedan ser absorbidos del aire, pueden ser gases que dañen nuestro depósito. Formando un óxido o nitruro a lo largo del límite del grano. En este sentido la oxidación debilita grandemente el metal soldado, y reduce la resistencia al impacto y la resistencia a la fatiga de la parte soldada. El nitrógeno forma nitruro de hierro en composición química con el hierro, que logra penetrar en la parte superficial del metal soldado formando lo que conocemos como porosidad.

La vía más satisfactoria para prevenir la contaminación de óxidos y nitruros en el proceso de soldadura de arco metálico es, asegurar que el electrodo este provisto de protección adecuada logrando que el revestimiento en combinación con el arco produzca dióxido de carbono (CO_2) o vapor. En los procesos GTAW (Proceso de Soldadura de Arco con Tungsteno y Gas) y GMAW (Proceso de Soldadura de Arco con Metal y Gas) puede utilizarse también la provisión de un gas inerte como protección.

Otro gas que se puede absorber o producir con el proceso de soldadura es el hidrógeno; que es la principal causa que contribuye al agrietamiento del metal soldado, es por ello la existencia del electrodo bajo hidrógeno para evitar este defecto.

3.1.2.- ZONA AFECTADA POR EL CALOR

Como se observó en la figura 3.1 existe una zona afectada por el calor que varía en su temperatura a medida que avanzamos el arco; toda soldadura de arco eléctrico que se aplica comúnmente presenta una constitución de fundición muy pronunciada cuyo tamaño de grano depende de varias circunstancias, especialmente de la rapidez con que se halla efectuado el enfriamiento. La figura 3.2 muestra la relación que existe entre las condiciones de temperatura, tamaño de grano y dureza en una placa soldada. Esta relación puede estar claramente establecida en una fotomicrografía de una sección de placa de acero (con un 25% de carbono) soldada la cual ha sido sobrepuesta en un diagrama hierro-carburo de hierro.

La fotomicrografía muestra un cordón de soldadura con un proceso automático de una sola pasada. El cordón de soldadura fue depositado sobre una placa media pulgada produciéndose una zona afectada por el calor que se extiende aproximadamente 0.125 plg. adyacente al cordón. Esta zona muestra una variación en la estructura de grano (comenzando por abajo); arriba y abajo de la temperatura eutectoide y una estructura de grano grueso próximo al cordón de soldadura.

La soldadura es, generalmente, tan dura en los bordes de transición de la pieza de trabajo, que estos solo pueden ser trabajados o labrados por rectificad. El origen de esta dureza se explicara basándose en la figura 3.3. La parte que comprende las zonas 1,2 y 3 corresponde a la sección de un cordón de acero depositado sobre la pieza fundida 6. En la cabeza de este cordón, en 1, en una extensión del tamaño de la superficie y la intensidad de la corriente de soldar, hay un material que corresponde aproximadamente al del electrodo; en la zona 1

encontramos acero dulce. En la zona 2 hay una capa de acero que, debido a la absorción del carbono procedente del hierro colado (grafito gasificado) es algo más dura, pero aun fácil de trabajar, mientras que en la zona 3 no es posible, prácticamente evitar un acero quebradizo en consecuencia de una mayor absorción de carbono. Mucho más dura es la zona de transición 4, en la cual se forma una fundición blanca, debido a que es una zona que se enfría bruscamente, que a causa de su fragilidad puede dar lugar a la formación de grietas durante el enfriamiento de la soldadura. Finalmente la zona 5 muestra una fundición del metal base transformada por la acción del calor, y 6 el material básico no sujeto a influencia alguna.

3.1.3.- PRECIPITACION DE CARBUROS

Dentro del proceso de soldadura se presenta un fenómeno térmico y metalúrgico que se conoce como precipitación de carburos, ocasionado por la fusión del metal y su enfriamiento brusco, que se da en la zona afectada por el calor.

Las tensiones térmicas tienen su origen en el enfriamiento de un área de soldadura. Las fracturas, por esfuerzos pueden ocurrir durante y después de la soldadura cuando en enfriamiento del metal base resiste la inevitable contracción del metal de soldadura depositado. Por lo regular, estos esfuerzos se presentan en la frontera del grano, que es precisamente el lugar donde frecuentemente se lleva acabo el fenómeno de la precipitación.

La facilidad que ofrecen algunos elementos como el Cromo, Níquel, Manganeso, Aluminio, etc, para formar carburos, colaborando con el fenómeno de la precipitación y sucede que

entonces aparece, en la zona afectada por el calor, el endurecimiento provocado por el enfriamiento rápido desde temperaturas muy altas.

Otro factor a cuidar con la precipitación de carburos es la microestructura de la zona de soldadura (que puede ser distinta a la zona aledaña al depósito o metal base). En éste sentido, cuando no se tiene un buen control del enfriamiento se pueden presentar de inmediato fracturas ocasionadas por la concentración de esfuerzos.

Los tratamientos térmicos como precalentamiento o poscalentamiento son una buena solución para asegurar que la microestructura, el endurecimiento y la precipitación de carburos, no sean un problema en nuestra aplicación. Dicho lo anterior, los tratamientos térmicos representan una gran ayuda para asegurar una aplicación confiable de nuestra soldadura.

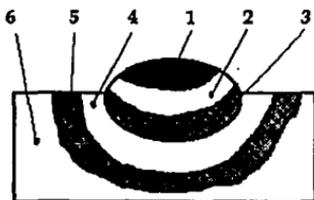


Figura 3.3.- Zonas de influencia térmica.

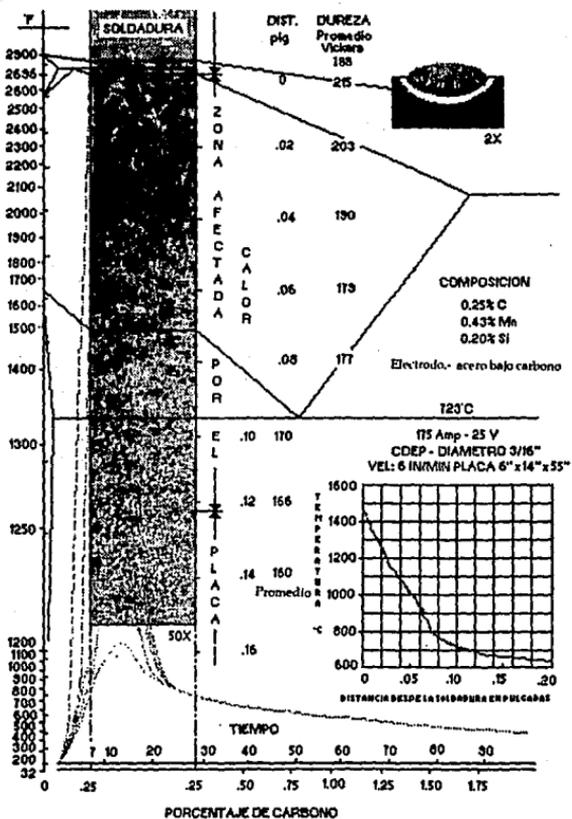


Figura 3.2.- Estructura de una soldadura por arco con electrodos revestidos.

3.2.- SOLDADURA DE HIERROS COLADOS

El hierro colado debido a su fragilidad planteaba muchos problemas a los soldadores, problemas que actualmente han ido desapareciendo gracias al desarrollo de técnicas especiales para aplicar la soldadura de hierro colado. El principal avance que hizo posible la soldadura de hierro colado fue el desarrollo de revestimientos especiales para los electrodos (del tipo bajo hidrógeno a la temperatura de trabajo más baja posible). Está ha resultado en una mejor adherencia del metal depositado al hierro colado, ya sea, gris, nodular o maleable. En la soldadura de hierro colado la técnica de aplicación empleada es de vital importancia y la experiencia adquirida por el soldador ha permitido desarrollar nuevos métodos para este procedimiento.

3.2.1.- SOLDADURA DE LAS FUNDICIONES GRISES

Por lo general, todas las fundiciones grises son soldables, pero pueden perder su soldabilidad cuando las piezas hayan sido sometidas a un calentamiento excesivo, como por ejemplo, las parrillas de la cocina o por haber estado mucho tiempo en contacto con agua de mar, etc. La mala soldabilidad de esta clase de piezas se debe a que el carbono y el silicio se oxidan y con ello modifican las estructuras del metal base.

La temperatura del punto de fusión en esta clase de fundiciones es de 1100 a 1200°C.

Se pueden emplear con éxito los siguientes electrodos: De alma de fundición, de acero al carbono, de acero inoxidable, de níquel, de cobre o de aleaciones de estos dos últimos metales.

Después de haber conocido algunos de los electrodos que se pueden emplear con éxito en la soldadura de la fundición gris, nos vamos a referir ahora a un electrodo en concreto, al saber directamente cuál es el electrodo con más posibilidades de llevar a cabo el proceso de soldar en el metal base que ahora estamos analizando.

El electrodo ferro-níquel tiene un tanto por ciento aproximado del 45 al 60% de níquel, 2% de carbono, 4% de silicio, 1% de manganeso, 2.5% de cobre, 0.03% de azufre, 1% en otros elementos y el restante en hierro. El electrodo de níquel contiene un 85% mín. de níquel, 2% de carbono, 4% de silicio, 1% de manganeso, 0.03% de azufre, 2.5% de cobre, 8% en hierro y 1% en otros elementos.

Estos electrodos trabajan con un arco muy corto y una corriente lo más baja posible. El níquel aportado produce en la pieza base una soldadura blanda y limable. La diferencia entre un electrodo de níquel y el de ferro-níquel se puede apreciar en las propiedades mecánicas, las cuales son las siguientes: El electrodo de níquel tiene una resistencia a la tracción hasta de 35 kg/mm², una dureza Brinell de 150 a 225 y un alargamiento del 2 al 6%.

El electrodo de ferro-níquel tiene una resistencia a la tracción hasta 56 kg/mm², una dureza Brinell de 160 a 300 y un alargamiento del 4 al 12%. Estos valores de ambos electrodos son

aproximados, pues cada fabricante le da valores mayores o menores, pero dentro de los límites aquí especificados.

En los casos, cualquiera que sea el electrodo utilizado, la resistencia a la tracción es siempre superior al del metal base. Por el contrario, se obtiene mejor mecanización cuando utilizamos electrodos de níquel; pero empleando el de ferro-níquel se obtiene más resistencia a la tracción, a la tensión y a la fisuración de la costura soldada.

METODO DE APLICACION.- Al electrodo hay que darle un pequeño balanceo lateral para repartir el material de aporte. La fundición gris aumenta su dureza según la cantidad de cementita que posea, pero en este caso concreto la fundición gris es mecanizable, debido a la pequeña cantidad de este microconstituyente que posee. Por este motivo hay que darle al metal base, durante el proceso, el mínimo calor posible, para que así la pieza tenga menos dilatación y contracción, y al mismo tiempo, evitemos al máximo la formación de carburos duros de hierro.

Nunca debemos encender el arco sin depositar material porque corremos el riesgo de que se formen partes duras. Cuando utilicemos electrodos de ferro-níquel, no será necesario ningún precalentamiento de la pieza a soldar, para que el aporte de calor al metal base sea el menor posible con este electrodo. Es preciso trabajar con un arco corto y la menor corriente que el diámetro del electrodo nos permita. La débil intensidad con la que trabajamos, el níquel y la escoria hacen posible que el enfriamiento del cordón no sea rápida.

Es importante aclarar que si el espesor de la pieza es demasiado grande, es conveniente realizar un precalentamiento de 200 a 320°C y también se debe precalentar cuando la fundición son más difíciles de soldar.

En la terminación de un electrodo o en el final de un cordón, antes de cortar, hay que dirigir el electrodo hacia atrás lentamente, o sea hacia el metal que vamos depositando, para impedir que se formen zonas duras.

Los cordones depositados deben ser estrechos en pequeñas pasadas longitudinales (de 21 a 31 mm de largo). Se deben martillar los cordones inmediatamente después de realizados, cuando están completamente al rojo vivo y luego dejar enfriar el trozo de cordón hasta que la mano aguante perfectamente el calor.

Cuando la pieza a soldar haya que aplicarle el precalentamiento, no debe permitirse ni a ella ni al metal de aporte que pierdan la temperatura entre pasada y pasada; por eso, se recomienda realizar la soldadura lo más seguida posible, y si se puede mantener la pieza siempre a una misma temperatura; también en este caso se deben martillar los cordones una vez terminado el electrodo.

Si se diera el caso de soldar una fisura que vaya desde el centro de la pieza a uno de sus extremos, debemos depositar el material de aportación del centro de la pieza al borde de ella, y nunca a la inversa. Para más detalles, en un capítulo posterior, se hará mención de cuales son los distintos métodos de aplicación.

3.2.2- SOLDADURA DE LAS FUNDICIONES NODULARES

Esta clase de fundición se puede designar con tres nombres diferentes, aunque cualquiera de los tres se refiere a la misma clase de fundición, y estos nombres son los siguientes: fundición nodular, fundición esferoidal y fundición dúctil.

La fundición nodular, como se mencionó en un capítulo anterior, se obtiene de un hierro fundido tratado con magnesio y sus principales componentes son: carbono, silicio, manganeso y algunas cantidades pequeñas de molibdeno. Este pequeño contenido de molibdeno depende de la clase de fundición nodular que sea.

El tanto por ciento de níquel que contiene estas fundiciones hace que tengan una resistencia a la tracción y un límite elástico bastante elevados.

Las fundiciones nodulares tienen un mínimo contenido de impurezas de azufre y fósforo. Se aplican mucho en la grande y pequeña industria, ya que sustituyen en su mayor parte al acero moldeado.

Para su proceso de recuperación por soldadura de arco hay que tener en cuenta que este tipo de fundición es la que presenta más facilidad y afinidad para la soldadura, ya que, tienen una elevada resistencia al calor y a la corrosión. Para la segura aplicación de soldadura conozcamos cuáles son los electrodos apropiados:

ELECTRODO APROPIADO PARA SU SOLDADURA.- El electrodo de níquel y el de ferro-níquel, éste último con un 55% de níquel, son los más apropiados para el soldo de esta clase de fundiciones.

Cuando la pieza a soldar es solamente de recargue de una sola pasada, es mejor utilizar el electrodo de níquel, por su fácil mecanización.

Los electrodos deben emplearse bien secos, lo cual quiere decir que se deben mantener calientes (en un horno o cualquier otro dispositivo) a una temperatura de 120°C, a la vez que hacemos uso de ellos.

Se debe utilizar una corriente lo más baja posible, la que nos permita el diámetro del electrodo, con una longitud de arco muy corta.

METODO OPERATORIO.- Hay que darle un pequeño balanceo lateral al electrodo, para repartir lo mejor posible el material de aporte.

Para la reanudación o empalme de cordón con los electrodos de ferro-níquel y de níquel, es conveniente dejar el final del cordón sobre el cual se va a efectuar dicho empalme, un cráter en forma de rampa o chafán. Esto se consigue avanzando de prisa cuando se vea que al electrodo le falta poco para consumirse, y al iniciarse el empalme para el cordón anterior, se debe hacer un poco más atrás del cráter, y de esta forma realizar un cordón de tamaño y consistencia homogéneo.

Siempre que nos sea posible, las piezas deberán soldarse en posición plana u horizontal. En las fundiciones nodulares perlíticas es recomendable realizar un precalentamiento a una temperatura de 200-250°C; las demás fundiciones no requieren del precalentamiento, ya que solo la fundición perlítica necesita de un cuidado especial porque si el material se calienta o enfria bruscamente (como sucede en los procesos de soldadura por arco) se pueden presentar en la pieza soldada puntos duros que son nocivos para el material base.

Se deben martillar cada uno de los cordones y aprovechar al máximo su alta temperatura, pues de esta manera, colaboramos considerablemente a la dilatación del cordón y en muchos de los casos evitamos que éste se fisure.

Se puede decir que tanto las fundiciones grises como las nodulares son en su mayoría soldables.

3.2.3.- SOLDADURA DE LAS FUNDICIONES MALEABLES

GENERALIDADES.- El cliente debe comunicar a tiempo a la fundería el fin a que destina la fundición maleable y darle así la oportunidad para que elija una temperatura que favorezca la soldabilidad, así como el hecho de que la fundición maleable ha mejorado considerablemente de calidad en el transcurso de los últimos años, han operado un cambio notable en las condiciones de soldadura de este material. Hasta hace poco se tenía la intención de emplear en la reparación de la fundición maleable, por lo menos en casos dudosos, la soldadura en vez de la autgena por prometer mejores resultados, pero esto solo puede aplicarse hasta cierto

punto a la fundición maleable negra. Los fructíferos trabajos mancomunados entre la fundería y los soldadores ha operado aquí un cambio digno de encomio desde que la fundería ha sabido adaptarse a las necesidades y conveniencias de la soldadura y puede suministrar una fundición maleable bien soldable.

Según la clase de templado y sus productos hay que distinguir entre fundición maleable blanca y negra, las cuales se comportan de muy distinta manera durante la soldadura, así en lo concerniente a sus propiedades metalúrgicas como los espesores de material, razón por la cual han de ser tratadas aquí separadamente. El peso medio de piezas fundidas de alto valor oscila entre 3 y 15 kg, si bien no es raro ver piezas de fundición que pesan hasta 150 kg.

FUNDICION MALEABLE BLANCA.- El carbono de recocido es un elemento que estorba durante el proceso de soldadura, porque da lugar a la formación de espuma o de burbujas al escaparse el óxido de carbono o el bióxido de carbono. El contenido de carbono debe ser en el hierro bruto, por lo tanto, lo más pequeño posible. Al contrario de la fundición gris, una determinada proporción de manganeso es aquí favorable y deseable para la soldabilidad, porque, además de favorecer la fusión, forman sulfuros ricos en manganeso que eliminan y contrarrestan los inconvenientes del azufre. El silicio, fácilmente oxidable y cuya proporción contenida en la fundición maleable oscila entre 0.3 y 0.8%, sufre durante la soldadura una gran pérdida al fuego (hasta un 50%) y se oxida formando ácido silícico (SiO_2) o silicatos ricos en hierro. Debido a la formación de películas rígidas y delgadas el silicio interrumpe la estructura metálica y provoca el agrietamiento de la soldadura. Mientras que la proporción de fósforo contenida en la fundición no ejerce ningún influjo en la soldabilidad, una proporción de azufre (más de 0.15%) es muy perjudicial, por lo que debe ser siempre muy baja. Los sulfuros ricos en hierro y manganeso que se queman y dan lugar a la formación de anhídrido

sulfúrico, son la causa de una fusión inestable y de la formación de burbujas, grietas, etc., además de favorecer la formación de cementita (endurecimiento).

Si se evita una oxidación del baño de fusión, la fundición maleable blanca (cerca de 5 mm) exenta de defectos, de paredes delgadas, es decir ferrítica, puede ser soldada como el acero. A medida que aumenta el espesor de las paredes (por encima de 8 mm) aumenta notablemente el endurecimiento por recarburación (disolución del carbono de las zonas que contienen carbono de recocido), o sea por la formación de cementita, lo cual puede evitarse únicamente por medio de un intenso precalentamiento a unos 600°C o, lo que es mejor aun, por medio de un recocido posterior.

La fundición maleable blanca defectuosa no es soldable, especialmente cuando existe el peligro de que, debido a la deficiente descomposición de la cementita contenida en el hierro blanco se produzca a causa del calor una gran fragilidad y agrietamiento que no pueden ser eliminados mediante el calentamiento previo. Las superficies fuertemente oxidadas de las piezas fundidas deben limpiarse a fondo de los óxidos adheridos, pues en caso contrario, se produce en la soldadura una reacción entre el carbono y el óxido de hierro formando hierro y óxido de carbono que tienen por consecuencia una intensa formación de poros. La resistencia, la dilatación y la dureza de la fundición maleable blanca dependen del espesor de las paredes del cuerpo y apenas varían durante la soldadura cuando las paredes tienen hasta 8 mm de espesor, por lo menos en lo que se refiere a la resistencia. Pasando de estos espesores puede contarse siempre con un descenso a menudo considerablemente de la resistencia. Mientras que la fundición maleable de paredes delgadas no requieren de un tratamiento térmico posterior a la soldadura, este tratamiento térmico es indispensable cuando el espesor de paredes excede de 6 mm. El recocido se efectúa en un periodo de 2 a 5 hrs. a 900°C, debiendo

llevar al horno de recocido, inmediatamente después de la soldadura, las piezas complicadas afectadas de tensiones, si es que se quiere evitar la formación de grietas. A pesar de ello, la dureza de la soldadura de piezas gruesas aumentara siempre y dificultara el proceso.

FUNDICION MALEABLE NEGRA Y DE NUCLEO NEGRO.- La recarburación da origen, durante la soldadura, a la formación de grandes cantidades de cementita y martensita que tienen por consecuencia una gran dureza y fragilidad de la unión e impiden ejecutar una soldadura utilizable y susceptible de ser debidamente trabajada, a no ser que la pieza aun caliente pase inmediatamente después de terminado el trabajo a un horno de recocido, donde permanecerá aproximadamente 6 hrs. y más, templándola de nuevo después de haberla sometido a un tratamiento térmico a 900°C. De aquí que la fundición maleable negra solo pueda ser soldada debidamente en la fundería y muy raras veces por quien la emplea. A menudo se desiste consientemente de la resistencia a la corrosión y se hace uso de la soldadura dura, en la cual solo se necesita un calentamiento a la temperatura de soldar y no la refusión de la pieza fundida. Por este motivo las soldaduras de reparación de piezas aun no templadas, o sea hierro ledeburítico frágil, se ejecutan en la fundería y eso sólo en casos muy raros.

Generalmente debe sostenerse el punto de vista de que una fundición de poco valor o templada deficientemente, de cualquier clase que sea, no puede ser restablecida mucho menos salvada, por ningún procedimiento de soldadura, por mucho que sea el cuidado y esmero con que se proceda a su ejecución. Condición principal para obtener una buena soldadura es una fundición de alta calidad adaptada a las necesidades de la soldadura por fusión. Así por ejemplo una fundición grafíticamente rígida propensa a la fragilidad escamosa (por escamosa se entienden defectos de superficie que se forman por óxidos que contienen grandes

proporciones de sulfuros) o defectuosa, no podrá soldarse nunca con éxito. Tampoco son soldables aquellas piezas de fundición cuyo núcleo contenga carburos.

CONDICIONES PARA LA SOLDADURA.- Siempre que el operario conozca bien las propiedades de la fundición maleable que va a soldar y no tenga duda alguna acerca de la clase y la soldabilidad de la misma, podrá estar seguro del éxito de la soldadura, toda vez que tomen consideración las medidas termotécnicas indicadas anteriormente. Otra cosa es cuando se desconoce la clase de fundición, procedencia y propiedades de la misma, lo cual, desgraciadamente, sucede en la práctica muy a menudo. El operario se ve aquí continuamente ante nuevos problemas y prefiere proceder calentando previamente la pieza fundida de gran espesor de paredes y después hacer una fusión de prueba. Como material de alambre se utilizan exclusivamente electrodos de acero, y no importando gran cosa el recubrimiento. En general, en una fundición maleable hay que distinguir entre soldadura de reparación y soldadura de unión. Estas últimas, siempre que se trate de la unión entre sí, de piezas de fundición maleable, se practican únicamente cuando se quiera simplificar, por medio de la unión de piezas sueltas de forma favorable, la estructura y configuración de construcciones complicadas.

3.3.- METODOS DE SOLDADURA DEL HIERRO COLADO

Para la soldadura de la fundición se emplean según los casos, tres procedimientos: en frío, en semicaliente y en caliente.

3.3.1.- SOLDADURA EN FRIO

Se emplea este procedimiento para la reparación de fractura o roturas producidas en las piezas de fundición y tiene la ventaja de su mayor sencillez y comodidad, aunque hay que sujetarse desde luego a ciertas normas. Se emplean electrodos de alma de acero y hay que evitar el calentamiento excesivo de las piezas a soldar, que al enfriarse en el aire ambiente ocasionan inevitablemente tensiones de contracción que producirían el agrietamiento no solamente del material base, sino del propio cordón, pues aunque el alma del electrodo sea el acero, no hay que olvidar que hay una zona de la unión en que el material de base y el de aportación se mezclan, por lo cual la proporción de carbono en esa zona es mayor que en un acero corriente, con el consiguiente aumento de fragilidad.

El único medio de evitar este excesivo calentamiento consiste en depositar cordones muy cortos (de unos 5 cm. como máximo) y dejarlos enfriar, pudiendo mientras tanto depositar otro cordón en una zona fría, siguiendo un orden adecuado para mejor repartición del calor.

Es muy conveniente el martilleo de la parte del cordón depositada antes de que llegue a enfriarse, pues de esta forma, al ensancharse ligeramente el cordón por efecto del martilleo, se compensa la mayor contracción de éste con respecto al metal base, ya que la contracción del acero es superior a la de la fundición.

Se evita en parte el excesivo calentamiento empleando electrodos mas bien delgados, de fusión rápida y con poca intensidad de corriente.

Es necesario preparar debidamente la unión. Sin embargo es inevitable la formación de una zona de fundición blanca en la parte de unión del acero con la fundición que aumenta la fragilidad de dicha zona, lo cual hace que este sistema de soldadura no sea aplicable en aquellos casos en que se necesita que la unión reúna ciertas cualidades mecánicas.

Para aumentar la adherencia entre el metal aportado de acero y el hierro fundido del metal base se emplea el procedimiento de colocar en la superficie del chaflán unos tornillos, cuyas cabezas se cortan antes de soldar; el calibre de los tornillos varía entre 1/4 y 1/8 de pulgada, según las dimensiones del chaflán. Deben emplearse electrodos especiales de acero con alto contenido de carbono y silicio. De esta forma el metal de aportación se suelda bien con los pernos, quedando como atornillado al metal base (figura 3.4).



Figura 3.4.- Tornillos colocados para anclar la soldadura en el metal base.

Puede aumentarse la superficie de adherencia aumentando el sobre espesor del cordón (figura 3.5).

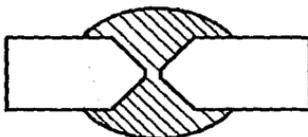


Figura 3.5.- Junta en "X" para aumentar la superficie de adherencia.

En caso de reparación de una grieta conviene practicar un orificio circular en cada extremo para evitar así que la grieta se prolongue por efecto de las tensiones.

Otro caso que puede presentarse es la colocación de un parche para sanear una zona, por ejemplo de una culata de motor de explosión. En éste, como en otros casos, es necesario tener muy en cuenta las partes de mayor dilatación para así dejar el espacio necesario entre los bordes del parche y de la pieza que se repara.

Cuando se desee que la unión sea mecanizable es necesario evitar la zona de fundición blanca en el enlace del metal de aportación con el metal base, y para ello se emplean electrodos de metal Morel (aleaciones de níquel y cobre), que se unen al hierro fundido sin producir zona frágil.

Si el chaflán es amplio puede evitarse el tener que emplear gran cantidad de estos electrodos, que son caros, depositando con ellos solamente la capa (b) de unión con el chaflán y sobre esta capa utilizar los electrodos de acero (c), como se muestra en la figura 3.6.

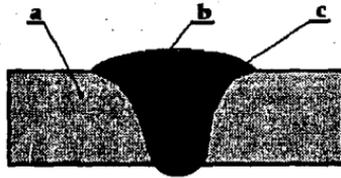


Figura 3.6

Cuando se desea mecanizar la parte superior del cordón se deposita una capa de electrodos, b, de metal Monel sobre el material depositado por los electrodos de acero, c (figura 3.7)

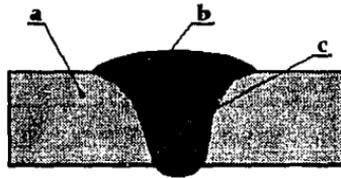


Figura 3.7

En algunos casos, en lugar de metal Monel se utilizan electrodos de bronce, que por tener el punto de fusión más bajo necesita menor aportación de calor, pero en cambio tiene el inconveniente de su mayor peso específico, que da lugar a que las gotas de acero suban a la superficie ocasionando zonas frágiles. También se emplea con éxito en algunos casos (como por ejemplo, en la reparación de fisuras en culatas y bloques de motores) los electrodos de acero inoxidable 18/8 (18% cromo y 8% níquel), llamados austeníticos no endurecibles, por predominar en ellos la Austenita o solución sólida de carbono en hierro.

3.3.2- SOLDADURA SEMICALIENTE

Este método puede emplearse con éxito para soldar chapas achaflanadas que colocan en posiciones más o menos inclinadas (figura 3.8). Si la pieza es pequeña se le da un calentamiento total a temperaturas próximas a los 300°C. Si su tamaño es mayor puede calentarse solamente la parte que se suelde y las partes próximas por medio de uno o varios sopletes.

La soldadura ha de realizarse forzosamente de abajo a arriba, pero no en forma de un cordón continuo, sino por sucesivas capas horizontales en forma de pequeños sectores circulares de unos 10 milímetros de espesor que van rellenando el chaflán. Cada capa se forja inmediatamente de depositada para aprovechar el mismo calor de la soldadura. A continuación se deposita la capa siguiente que también se forja, y así sucesivamente, para rellenar el chaflán en forma ascendente.



Figura 3.8

Se emplean electrodos de acero cuando no interesa que el cordón sea mecanizable; en caso contrario se emplean electrodos de metal Monel; unos y otros de los mismos tipos indicados en la soldadura en frío, como asimismo, los procedimientos indicados en las figuras 3.6 y 3.7 para el ahorro de electrodos Monel.

3.3.3.- SOLDADURA EN CALIENTE

Este es el procedimiento que da mejores resultados para la soldadura del hierro fundido y el único a emplear cuando se trata de uniones que han de reunir un mínimo de cualidades mecánicas, como por ejemplo en la reparación de piezas de maquinaria sometida a esfuerzos, tales como largueros o travesaños de bastidores, dientes de engranaje, etc.

El trabajo se realiza a la temperatura de rojo cereza, o sea a unos 750°C, con lo cual se aleja el peligro de agrietamiento al reducir notablemente la diferencia entre las partes que se sueldan y las partes próximas.

Los electrodos empleados son también de fundición, realizando el trabajo por cordones superpuestos, separando con cuidado la escoria de cada uno antes de depositar el siguiente.

Es preciso que la elevación de la temperatura sea lo más lenta y uniforme posible para evitar la aparición de tensiones internas que ocasionarían el agrietamiento.

Se recomienda el uso de electrodos de fusión rápida a fin de realizar el trabajo en el menor tiempo posible. De todas formas, sobre todo si se trata de piezas macizas y voluminosas, resulta a veces agotador por el fuerte calor que las piezas despiden, lo que hace necesario en muchos casos el que trabajen dos operarios que se releven cada cierto tiempo, pero sin que el trabajo se interrumpa.

CAPITULO IV

4.- PRINCIPALES APLICACIONES DE LA SOLDADURA DE ARCO EN LOS HIERROS COLADOS

No podemos exponer los numerosos casos que puedan presentarse ni dar reglas para cada uno, siendo la experiencia y el buen sentido de quien las realice o dirija el trabajo, unido a sus conocimientos técnicos, los que han de aconsejar las precauciones a tomar en cada caso, siguiendo desde luego los procedimientos generales que se muestran en la tabla 4.1.

El precalentamiento tiene mucha importancia en el soldeo de las piezas de hierro colado, debido a:

1.- *Reduce el nivel de esfuerzos térmicos.* Las tensiones térmicas tienen su origen en el enfriamiento de un área de soldadura. Las fracturas pueden ocurrir durante y después de la soldadura cuando el enfriamiento del metal base resiste la inevitable contracción del metal de soldadura. El precalentamiento reduce los diferenciales de temperatura entre el metal de soldadura y el metal base minimizando la tendencia hacia la fractura.

2.- *Reduce el endurecimiento de la zona de soldadura.* El metal de soldadura y la zona adjunta afectada por el calor pueden endurecer y fracturarse cuando son rápidamente enfriados desde temperaturas muy altas. Precalentando la soldadura y la zona afectada por el calor previene

generalmente que ambas se endurezcan extremadamente debido a la reducción de la razón de enfriamiento.

3.- *Reduce la porosidad y roturas por hidrógeno.* Un arco de soldadura descompone el agua en sus elementos básicos, hidrógeno y oxígeno. El hidrógeno se disuelve fácilmente en el metal de soldadura a altas temperaturas, pudiendo resultar porosidad del metal durante su solidificación. El precalentamiento ayuda a dispersar la humedad. Electrodo recubiertos y fundentes a menudo introducen humedad directamente al arco y al charco de soldadura. El hidrógeno resultante aumenta considerablemente la posibilidad de roturas en la soldadura y/o en la zona afectada por el calor. El precalentamiento reduce la razón de enfriado permitiendo el escape de hidrógeno.

La temperatura de precalentamiento puede ser entre 500°F (260°C) y 1200°F (648°C). La temperatura crítica de la mayoría de los hierros colados, o sea, el punto en el cual las piezas pueden agrietarse es aproximadamente 1450°F (787°C). Por esta razón la temperatura de precalentamiento no debe alcanzar los 1400°F (760°C), y si el calor durante la operación de soldadura excede esta temperatura, la zona de calentamiento debe ser lo más estrecha posible.

El precalentamiento debe ser aplicado uniformemente en toda el área y mantenerla tan bien como sea posible hasta que el metal de aporte se haya enfriado a esa temperatura. Entonces, la pieza debe ser enfriada lentamente a la temperatura ambiente.

En el hierro maleable y el hierro dúctil, se recomienda que el enfriamiento sea más lento cubriendo la pieza soldada con asbesto u otro material aislante.

RESUMEN DE PROCEDIMIENTOS PARA SOLDAR HIERRO COLADO			
TIPO DE HIERRO COLADO	PROCEDIMIENTO	TRATAMIENTO TERMICO	PROPIEDADES
FUNDICION GRIS	Soldar con varilla de hierro colado	Precalear y enfriar lentamente	Las mismas como la original
	Soldar con varilla de acero	Preferentemente precalentar en todos los casos posibles	Mejor soldadura; las piezas soldadas pueden estar demasiado duras para maquinarse; si no realizamos un precalentamiento, se necesita soldar intermitentemente para prevenir el agrietamiento
	Soldar con varilla de acero alrededor de los espárragos (tornillos) en la junta	No precalentar	La junta tan fuerte como la original
	Soldar con níquel	Preferentemente precalentar	La junta tan fuerte como la original; una pequeña zona endurecida y maquinable
FUNDICION MALEABLE	Soldar con varilla de hierro colado	Precalear y poscalear con el fin de repetir el tratamiento de maleabilización.	Buena soldadura, pero su aplicación es lenta y costosa
FUNDICION BLANCA	No se recomienda soldar		
FUNDICION NODULAR	Soldar con níquel	Preferentemente hacer un precalentamiento y poscalear.	La junta fuerte y dúctil, pero algunas propiedades disminuyen; maquinable; toda la calidad disminuye en la ausencia de precalentamiento y/o poscalear

TABLA 4.1

Si no se precalienta, la pieza se debe mantener tan fría como sea posible. Para todos los fines prácticos, solamente el proceso SMAW (Soldadura de Arco con Electrodo Revestido) con electrodos de acero se puede utilizar en la fundición gris sin necesidad de ser precalentada. Un alto porcentaje de las piezas reparadas de maquinaria pesada caen dentro de ésta categoría. Múltiples pasos son siempre empleados en piezas de hierro colado esencialmente cuando éstas no se precalientan.

Las piezas de hierro colado pueden presentar diferentes tipos de fracturas, dependiendo de las causas de ésta sabremos si se puede o no recuperar. En la tabla 4.2 se muestra un marco de referencia sobre el cual podremos determinar, dependiendo del tipo de hierro colado, si se lleva a cabo la recuperación.

Para soldar las piezas de hierro colado es necesario seguir las siguientes recomendaciones:

- Evitar usar el cepillo de fierro para eliminar la escoria.
- Martillar en caliente.
- No utilizar en la preparación de la junta esmeril de carburo de tungsteno y en su lugar ocupar un esmeril de carburo de aluminio.
- Soldar con la menor corriente posible.
- Preferentemente usar electrodos 55 y 99% Ni.
- Los cordones de soldadura no mayores de 3cm. de longitud.
- En múltiples pasos, distribuir los cordones para evitar concentración de esfuerzos térmicos.
- Aplicar el cordón de soldadura del centro hacia afuera de la pieza.

RECUPERACION DE PIEZAS DE HIERRO COLADO				
TIPO DE HIERRO COLADO	RECUPERACION	TIPO DE FRACTURA	TIPO DE PREPARACION	
			PZAS. CHICAS	PZAS. GRANDES
FUNDICION GRIS	SOLDABLE	<ul style="list-style-type: none"> * Ruptura por tensión o compresión * Sobrecalentamiento y concentración de esfuerzos térmicos * Leves impactos * Fracturas por hidrógeno 	<ul style="list-style-type: none"> * Bisel * Taladrar extremos 	<ul style="list-style-type: none"> * Bisel * Tornillos de sacrificio * Precalentamiento * Poscalentamiento
FUNDICION BLANCA	NO SOLDABLE	*****	***	***
FUNDICION NODULAR	SOLDABLE	<ul style="list-style-type: none"> * Tensión o compresión * Leves impactos * Endurecimiento de la pieza por sobrecalentamiento 	<ul style="list-style-type: none"> * Bisel * Precalentamiento * Poscalentamiento 	<ul style="list-style-type: none"> * Bisel * Tornillos de Acero Inoxidable * Precalentamiento * Poscalentamiento
FUNDICION MALEABLE	SOLDABLE	<ul style="list-style-type: none"> * Fracturas por la aparición de carburos, debidos al sobrecalentamiento * Formación de fracturas por microestructura dañada por el calor 	<ul style="list-style-type: none"> * Bisel * Precalentamiento 	<ul style="list-style-type: none"> * Bisel * Tornillos de Acero Inoxidable bajo Cr (0.05 %) * Precalentamiento * Poscalentamiento

TABLA 4.2

CAPITULO V

5.- REDUCCION DE COSTOS

El propósito general de incluir éste capítulo en nuestro trabajo de investigación es ofrecer una opción que permita optimizar el aprovechamiento de los recursos y establecer una justificación real de nuestro tema de tesis: La recuperación de piezas de hierro colado por medio de soldadura de arco. En este sentido, es muy importante aclarar que, en nuestro tiempo encontrar una opción que nos permita ahorrar tiempos de producción, mantenimiento y recuperación de piezas al costo más bajo posible y en el menor tiempo, ofreciendo a la grande y pequeña industria una variante que cumpla con las anteriores necesidades.

Un punto a considerar es el hecho de que la fundición y los productos que se obtienen de ella, son de alguna manera productores también de elementos contaminantes del medio ambiente. Motivo por el cual su menor utilización constituyen un beneficio tangible a nuestro ecosistema. Por lo tanto, nuestra propuesta, (establecida en esta tesis) pretende proporcionar un método con beneficios económicos que a continuación se establecerán, así como también, un beneficio a nuestro medio ambiente.

La información para el análisis de costos ha sido desarrollada para facilitar la recolección de datos, y una vez que estos han sido recopilados permitir la relación sistemática y directa de los costos en soldadura y su comparativo con la producción por medio de fundiciones.

Para establecer un análisis de costos, es necesario e indispensable contar con un método de costeo en el cual se identifiquen las variables que intervienen en el caso de recuperar piezas por medio de soldadura de arco y comparado con la producción de las mismas en un taller de fundición; todo ello con el fin de obtener un cuadro comparativo que nos conduzca a una reducción de costos utilizando el proceso de soldadura de arco con el cual recuperamos la pieza muestra en el capítulo anterior.

Los costos en soldadura están repartidos en dos áreas básicas: Mano de obra y material. En una operación de soldadura típica, aproximadamente un 80%-85% del costos de fabricación está relacionado con la mano de obra, ya sea que se esté soldando o no. El factor humano desempeña un papel importante en la implementación de reducción de costos, en el sentido que el operador o el supervisor puede hacer que la idea de reducir los costos tenga éxito o fracase si su actividad no es paralela. El operador debe ser capaz de manejar las ventajas ganadas en productividad que pueden resultar de un proceso de soldadura contra la producción o reparación por medio de fundición.

La dimensión de la soldadura también se toma en cuenta para la reducción de costos pues se considera que el número de pasos es un factor determinante en la cantidad de depósito. En muchos casos, la manera más fácil de basar los ahorros que se pueden realizar con un método de soldadura, es considerar los kilogramos de metal depositado, debido a la facilidad para

obtener los datos. A continuación se muestra el formato del análisis de costos comparativo de un proceso de soldadura contra la producción de piezas de hierro colado en una fundidora:

Producción de piezas por fundición

L- Se identifican las características y especificaciones de la pieza dañada que se desea producir nuevamente:

- a) Pieza : Disco de fundición gris.
- b) Dimensiones: Diámetro interior = 3.8125 in, diámetro exterior = 8.375 in y con espesor de 2.4375.
- c) Masa de la Pieza: 2 kg

2.- Para el caso de producir la pieza dañada en un taller de fundición :

(Los siguientes datos fueron obtenidos en Fundiciones Fernández S.A. de C. V.)

- a) Sin elementos aleantes: N\$ 56.00 el Kilo.
- b) Molde: N\$ 97.00
- c) Colada por más de 100 piezas: N\$ 75.00 Pieza
- d) Tiempo de entrega (Mínimo 100 piezas): 1 a 2 semanas.

Por medio de soldadura de arco

Los datos que a continuación se presentan fueron tomados de prácticas en campo, en el laboratorio técnico de Lincoln Electric.

Datos Preestablecidos :

- a) Proceso: SMAW.
- b) Electrodo: NiCl (99% Ni).
- c) Corriente: AC o DC.
- d) Polaridad: Electrodo al negativo.
- e) Velocidad de avance: 0.1 in/min.
- f) Rango de corriente: 60 - 120 amp.

Datos prácticos de la aplicación:

1.- Tasa de deposición:	6.4 kg/hr teórica.
2.- Factor de operación:	30 %.
3.- Cantidad de soldadura depositada por hora:	1.92 kg/hr real.
4.- Tiempo utilizado por cantidad de soldadura:	0.52 hr/kg.

Costos de mano de obra e indirectos:

5.- Costo (mano de obra e indirectos):	10 N\$/hr.
6.- Costo por cantidad de soldadura:	5.2 N\$/kg.
7.- Costos adicionales del proceso:	2 N\$/kg.
8.- Mano de obra e indirectos:	7.2 N\$/kg total.

Costo de material:

9.- Costo del electrodo:	20.9 N\$/kg.
10.- Eficiencia del electrodo:	65 %.
11.- Costo del material depositado:	13.86 N\$/kg real.

Costo total:

12.- Línea 8 + Línea 11:	20.79 N\$/kg.
--------------------------	---------------

A continuación se detallan cada uno de los conceptos del análisis de costos en el proceso de soldadura:

Descripción del proceso. La sección inicial del análisis identifica el tipo de proceso y si este se va a realizar en forma manual, semiautomática o automática. Junto con la nomenclatura AWS del proceso, se deben suministrar también los parámetros: amperaje, voltaje y polaridad. Es necesario agregar en esta sección el tipo de electrodo a usar, el diámetro del electrodo y su clasificación AWS. Si la máquina no está provista de medidores, el voltaje se puede encontrar usando un voltímetro conectado a través del portaelectrodo y la pieza de trabajo. El amperaje también se puede encontrar manualmente usando un amperímetro de gancho colocado alrededor del cable de trabajo.

Velocidad de avance. La forma más exacta de determinar la velocidad de avance es midiendo físicamente la longitud de la soldadura después de haber tomado el tiempo utilizado en realizar la soldadura. La longitud de soldadura (pulgadas) dividido por el número de minutos

requeridos para soldar esa longitud es la velocidad de avance en pulgadas por minuto. Si este método no es práctico se puede encontrar la velocidad de avance siempre y cuando se conozca la dimensión de la soldadura (lb/ft) y la velocidad de deposición (ver descripción línea 1).

Velocidad de avance = a velocidad de deposición (lb/hr) / 5 x peso de la soldadura (lb/ft)

Línea 1. La velocidad de deposición es probablemente el parámetro más fácil de figurarse, sin embargo es el más difícil de calcular. Existen varios métodos para calcularlo, usando diferentes fuentes de información. La AWS ha elaborado tablas en las que se encuentran los datos para velocidad de deposición para cada uno de los diferentes electrodos, basándose en la composición química y la corriente con la que se funden dichos electrodos. Dichos datos son tomados de pruebas en laboratorios, bajo las condiciones ideales de operación. La velocidad de deposición en la línea 1 tiene incluida la eficiencia del electrodo (Línea 10), y a menos que se especifique lo contrario, la eficiencia de los electrodos puede ser tomada con los siguientes valores:

PROCESO	EFICIENCIA
SAW	100%
GMAW-SPRAY	97%
GMAW-CO ₂	93%
FCAW-GS	86%
FCAW-SS	83%
GTAW (con aporte)	70%
SMAW	65%

La velocidad de deposición se encuentra multiplicando la velocidad con que se funde el electrodo por la eficiencia correspondiente. La velocidad con que se funde el electrodo se

refiere a la cantidad de electrodos que se consumen durante la soldadura, y la eficiencia muestra que porcentaje real se transforma en metal depositado.

Línea 2. El factor de operación representa el tiempo que el arco está prendido con respecto al tiempo total para realizar todas las operaciones. Trabajos que disminuyen el factor de operación incluyen remoción de escoria, preparación de la junta, acoplamiento, tiempo de cambio de consumibles, descansos, etc. El factor de operación es muy variable y extremadamente importante en análisis de costos en soldadura debido al impacto directo en el tiempo utilizado en soldar. Como se mencionó previamente los costos de mano de obra son usualmente los costos más altos en el proceso de fabricación y no los costos del material. Debido a que existen muchas operaciones diferentes a la de soldadura, las estimaciones del factor de operación son difíciles; por lo tanto, las operaciones no realizadas con la soldadura deberán ser estimadas. Para proveer un punto de partida los factores de operación típicos se clasifican por proceso de la siguiente manera:

PROCESO	FACTOR DE OPERACION
MANUAL	20-30%
SEMIAUTOMATICO	32-35%
GMAW-SEMI	35-40%
AUTOMATICO	50-80%
ROBOTICA	80-90%

Con la ayuda de los datos del proceso de soldadura, se puede calcular el factor de operación. El arco se encuentra prendido solamente cuando se está depositando material. Considerando este hecho, las libras de metal depositado por unidad o por año pueden ser combinadas con la velocidad de deposición para obtener las horas en que el arco se encuentra prendido.

El número de horas en que el arco se encuentra prendido dividido para el número total de horas trabajadas nos da el factor de operación para esa estación. Factores de operación basados en una unidad o un año están descritas por las siguientes ecuaciones:

(1) Estimación por unidad:

$$\text{Factor de Operación} = \frac{\text{Horas de Arco Prendido}}{\text{Lbs. Metal Depositado por Unidad/Velocidad de Deposición}}$$

$$\text{FACTOR DE OPERACION} = \frac{\text{Horas Arco Prendido}}{\text{Total Horas Trabajadas}}$$

Línea 3. Aquí se calcula el valor actual de metal depositado y representa simplemente las libras de metal depositado después de considerar operaciones diferentes a las operaciones de soldadura. Después de que el operador ha estado trabajando por una hora, uno puede esperar que se deposite esa cantidad de libras.

Línea 4. Invertiendo simplemente el número en la línea 3, podemos generar el número de horas que toma depositar un libra de material después de haber considerado el factor de operación. Usando este número con los costos de mano de obra del operador y los costos indirectos, podemos calcular los costos de mano de obra para un operador al depositar una libra de soldadura (línea 8).

Línea 5. El costo indirecto y de mano de obra se obtiene usualmente del gerente de planta o personal del área. La mayor parte de las reducciones en costos no afectan significativamente los costos indirectos, pero si afectan los costos de mano de obra.

Línea 6. Una vez que se ha determinado los costos de mano de obra y los costos indirectos, se puede determinar los gastos actuales de soldadura. La línea 4 nos indicó el número de horas que se requiere para depositar una libra de metal de soldadura, y cuando se multiplica este valor por el costo de mano de obra y costos indirectos, se obtiene los costos actuales de soldadura.

Línea 7. Costos adicionales incluyen el biselado, esmerilado, limpieza, etc. Antes o después de haber realizado la soldadura. Costos adicionales necesitan ser determinados si no se han incluido en el factor de operación y se pueden obtener de la siguiente manera: si los costos adicionales no están específicamente documentados, use los valores de mano de obra y costos indirectos (línea 5) y aplique esta unidad al tiempo necesario para realizar las operaciones no relacionadas con la soldadura. Por ejemplo, si cierta estación de trabajo requiere 30 minutos (total) para biselar, esmerilar una pieza, la mano de obra y los costos indirectos son N\$30/hr los costos adicionales por unidad serán : $(0.5 \text{ hr}) \times (30) = \text{N\$}15/\text{unidad}$ (costo adicional). Ahora, la hoja de cálculo requiere que el número este en N\$/lb. Esta unidades pueden obtenerse conociendo las lb/unidad, las cuales pueden ser encontradas multiplicando lb/ft por el total de pies en una unidad. En nuestro ejemplo la unidad consiste de 5 pies de soldadura.

Línea 8. Aquí se colocan los costos indirectos y mano de obra, son simplemente los costos actuales totales de soldadura (línea 6) mas los costos adicionales totales de soldadura (línea 7).

Cada cantidad debe ser expresada en unidades idénticas, en este caso N\$/lb. La diferencia entre la línea 8 y la producción de una pieza en fundición, constituye los ahorros en costo de mano de obra por cada libra de metal depositado y serán usados en un sumario comparativo de costos.

Línea 9. En ésta se tiene que proporcionar el costo del electrodo.

Línea 10. La eficiencia de electrodo puede ser estimada usando los datos de la línea 1. Las eficiencias actuales pueden variar $\pm 5\%$, especialmente con los electrodos tubulares.

Línea 11. Este cálculo convierte eficiencia en pesos actuales de electrodo necesario para depositar una libra de soldadura. Por ejemplo, los electrodos tubulares pueden costar N\$ 8.00/lb; pero esta libra de electrodo pierde aproximadamente 15% de su peso en escoria, humos y salpicadura. Por lo tanto, se necesitan mayor cantidad de electrodos para compensar estas pérdidas. En nuestro ejemplo,

$$\text{N\$ } 8.00/\text{lb} + 85\% \text{ eficiencia} = \text{N\$ } 9.41/\text{lb} \text{ de material de soldadura}$$

Línea 12. Los costos de material más los costos de mano de obra nos dan el costo total de la recuperación.

A continuación hemos agregado un programa de computación que integra las líneas que se detallaron anteriormente. El propósito de incluirlo, es dar una herramienta práctica que nos permita dar un buen uso al análisis de costos de esta tesis. El programa está hecho en lenguaje Basic y el listado incluye una corrida de dicho programa.

```

10 Rem Tesis: "Recuperación de piezas de Hierro Colado por Medio de Soldadura
20 Rem                               de Arco Eléctrico.
30 Rem Programa para Comparar el Costo de Recuperación de una Pieza de Hierro
40 Rem Colado Mediante el Proceso SMAW y su Fabricación en Horno de Cubilote.
50 Cls:Key off
60 Print Tab(22) "Datos del Electrodo y su Aplicación":Print:Print:Print
70 Print "Electrodo: 1)AWS ENi-CI (99%Ni) 2)AWS ENiFe-CI (55%Ni) 3)AWS EST"
80 Enter$=Inkey$:If Enter$="" Then 80
90 If Enter$="1" Then 130
100 If Enter$="2" Then 140
110 If Enter$="3" Then 150
120 Locate 6,4:Print "Selección Inválida":Goto 80
130 A$="Electrodo AWS ENi-CI 99%Ni":Goto 160
140 A$="Electrodo AWS ENiFe-CI 55%Ni":Goto 160
150 A$="Electrodo AWS EST":Goto 160
160 Locate 6,1:Input "Costo del Electrodo (N$/kg)":coselec
170 Input "Diámetro del Electrodo (in)":d$
180 Input "¿Cuántos Electrodo se Van a Utilizar":noelec
190 Input "corriente (A)":corr
200 Input "Velocidad de Desplazamiento (in/min)":veldes
210 Input "Sueldo del Soldador por Hora de Trabajo (N$/hr)":sueldo
220 Input "Costos Adicionales (N$/kg)":cosadi
230 Print:Print:Print:Print Tab(30) "Datos de la Colada"
240 Print:Input "Costo por Kilo de Fundición (N$/kg)":coskg

```

```

250 Input "Peso de la Pieza (kg)";pespza
260 Input "Numero de Piezas";nopza
270 Input "Costo del Molde (N$)";molde
280 Input "Costo de la Colada (N$)";coscol
290 Factop=0.3;Eficielec=0.65;Tasdep=6.4
300 soldep=tasdep*factop;tiempso1=1/soldep
310 cossold=(sueldo*.1+sueldo)*tiempso1;suma1=cossold+cosadi
320 suma2=coselec/eficielec;total1=(suma1+suma2)*(noelec*0,168)
330 cospzas=coskg*pespza;total2=cospzas+molde+(coscol*nopza)
340 total=total2/nopza
350 p=0;totalf=0
360 For I=1 to 1000
370 p=p+1
380 totalf=totalf+total
390 If totalf<=total1 Then 410
400 Goto 420
410 Next I
420 Cls
430 Print Tab(30) "Costo por Soldadura"
440 Print:Print A$;Print "Diámetro del Electrodo:";D$;"in"
450 Print "Corriente:";corr;"A"
460 Print "Velocidad de Desplazamiento:";velde$;"in/min"
470 Print "Tasa de Deposición:";tasdep;"kg/hr"
480 Print "Factor de operación:";factop;"100 %"
490 Print "Eficiencia del Electrodo:";eficielec;"100 %"

```

```

500 Print "Costo del Electrodo:";coselec;"N$/kg"
510 Print "Costo:;$";total1;"con";noelec;"electrodos para";nopza;"piezas."
520 Print:Print Tab(30) "Costo por fundición"
530 Print:Print "Costo del Molde: N$";molde
540 Print "Costo por Kilo de Fundición:";coskg;"N$/kg"
550 Print "Costo de la Colada: N$";coscol
560 Print "Costo: N$";total2;"para";nopza;"piezas."
570 If total2>=total1 Then 580 Else 610
580 Print:Print:Print "Con un máximo de";p;"piezas es recomendable fundir"
590 AHORRO=total2-total1:Print "EL AHORRO ES DE: N$*"
600 Color 30:Locate 21,17:Print AHORRO:Color 15:Goto 620
610 Print:Print:Print "Con un mínimo de";p;"piezas es recomendable soldar"
620 End

```

Costo por Soldadura

Electrodo AWS ENi-CI 99%Ni
 Diámetro del Electrodo: 1/8 in
 Corriente: 80 A
 Velocidad de Desplazamiento: .1 in/min
 Tasa de Deposición: 6.4 kg/hr
 Factor de Operación: .3 *100 %
 Eficiencia del Electrodo: .65 *100 %
 Costo del Electrodo: 20.9 N\$/kg

Costo: N\$ 5989.153 con 150 electrodos para 100 piezas.

Costo por Fundición

Costo del Molde: N\$:97

Costo por Kilo de Fundición: 56 N\$/kg

Costo de la Colada: N\$ 75

Costo: N\$7709 para 100 piezas.

Con un máximo de 78 piezas es recomendable fundir

El AHORRO es de N\$ 1719.848

CONCLUSIONES

En este trabajo de investigación acerca de la "Recuperación de piezas de hierro colado por medio de soldadura de arco", se han abordado diferentes temas en una manera práctica y sencilla. Los objetivos planteados al inicio de esta tesis se han cumplido en buenos términos, ya que cada uno de los capítulos a desarrollar han cubierto todas las expectativas que planteamos en la introducción de nuestra investigación.

Las investigaciones que hicimos acerca de las fundiciones desde su producción, clasificación, hasta su aplicación nos permitieron comprender el problema al que nos enfrentaríamos al tratar de recuperar piezas de un material con características muy especiales; con detalles en los que había que analizar la metalurgia, sobre todo, porque el proceso de soldadura por arco eléctrico, por su propia naturaleza, se realiza la fusión del metal en un lapso de tiempo mucho muy pequeño, en el cual se llega a la temperatura de fusión y al enfriamiento casi instantáneamente y recordemos que en nuestro análisis se menciona que uno de los factores a cuidar es la estructura granular de nuestra pieza a soldar y es indudable que el proceso de soldadura trae consigo cambios metalúrgicos debido al calentamiento.

Para conocer más ampliamente las características de los hierros colados, el primer capítulo de este trabajo incluye los datos más concretos de los tipos de fundiciones y algunos puntos interesantes que fueron creando la base de nuestra propuesta.

Otro aspecto que tiene gran valor para los fundamentos de nuestra tesis, es el conocer los procesos de soldadura por arco eléctrico que permiten la soldabilidad de los hierros colados, cuidando que las características propias del proceso fueran dándonos la mejor opción para así llegar a una propuesta que cubriera las necesidades que tenemos, en base a nuestra pieza a recuperar.

La metalurgia de la soldadura es un tema que se abordó de una manera amplia, para poner en claro los cuidados que deben preverse al soldar una pieza, y más en este caso, en el que los factores calentamiento y enfriamiento son de valiosa importancia para la estructura de los hierros colados. La soldadura en hierros colados debe considerarse un caso especial en lo que se refiere a su aplicación, ya que comúnmente, utilizamos el proceso de soldadura para unir dos metales o simplemente para mantenimiento y producción de piezas frecuentemente de acero al carbono; y los hierros colados deben tratarse con cuidados muy específicos, porque no se trata de una estructura fácil de soldar. Todas estas consideraciones fueron incluidas en el capítulo 3.

En este sentido, el capítulo 4 nos refirió a recomendaciones muy precisas que se deben tener cuando estamos soldando hierros colados. Pueden considerarse como consejos prácticos de la aplicación, pero en realidad existen innumerables factores que deben tomarse en cuenta en la soldadura de hierros colados; realmente enlistar cada uno de ellos y establecer el método y la aplicación más adecuada es muy difícil y por tanto, consideramos pertinente aclarar que no pretendemos descubrir el hilo negro en la aplicación de soldadura para este tipo de metales, sino que el objetivo primordial de este capítulo es dar algunas ideas que sean útiles y prácticas, basadas en la teoría y la experiencia que recabamos de gente especializada en recuperar piezas de hierro colado.

Como se mencionó en la introducción de nuestra tesis, un objetivo primordial a cubrir por ésta, es dar una opción a la industria que utiliza o produce piezas de hierro colado para recuperarlas y se ve en la necesidad de recurrir a la fundición para producir nuevamente la pieza. Para ello, se consideró de valiosa importancia el hacer un análisis de costos que nos permitiera tener un comparativo de la recuperación de la pieza contra la producción de la misma. Dicho análisis pretende ser una herramienta más para determinar en qué momento, basado en la inversión, es mejor utilizar una u otra opción. Para agilizar este análisis y debido a que en nuestros días los paquetes de computación son de gran ayuda, nos permitimos facilitar un programa que ayude a tal fin; éste se maneja de una manera muy fácil y proporciona datos de mucho interés.

Ahora bien, nuestros objetivos han sido cubiertos en su totalidad y finalmente hemos llegado a la conclusión de que las piezas de hierro colado pueden ser recuperadas por medio de soldadura de arco eléctrico bajo ciertas condiciones y para ello deben tomarse en cuenta las consideraciones que esta tesis detalla en su interior.

En lo que se refiere al aspecto personal, este trabajo ha cumplido con todas las necesidades e inquietudes que planteamos al inicio de la tesis. Estamos satisfechos y consideramos que es un trabajo valioso que trae consigo aspectos interesantes en general.

BIBLIOGRAFIA

Specht y Tanzen, "FUNDICION DEL HIERRO Y EL ACERO". Metalurgia Tomos II y V, Barcelona, 1978, edit. SINTES, pags. 24-29 y 35-39.

W.J. Ellis, "INGENIERIA DE MATERIALES", México, 1976, edit. RSI, pags. 10-21.

Flinn, "MATERIALES DE INGENIERIA Y SUS APLICACIONES",

Biedermann y Hassekief, "FUNDICION DEL HIERRO Y DEL ACERO", Buenos Aires, 1957, edit. Macagno y Cia., pags. 320-333.

"DICCIONARIO DE MATERIALES Y PROCESOS DE INGENIERIA", Barcelona, 1970, edit. Labor, pags. 228-270.

Shimpke, P., "TRATADO GENERAL DE SOLDADURA", Soldadura Eléctrica, Tomo II, México, 1982, edit. G. Gilli, pags. 46-54 y 342-364.

Rivas Arias, José María, "SOLDADURA ELECTRICA", Madrid, 1976, edit. Paraninfo, pags. 40-46 y 135-150.

Guadilla López, Antonio, "TECNOLOGIA ELEMENTAL DE LA SOLDADURA POR ARCO ELECTRICO", España, 1975, edit. Dossat, pags. 16-18 y 107-114.

Dagdu Rietz y Helmut Koch, "SOLDADURA ELECTRICA POR ARCO", España, 1970, edit. Aguilar, pags. 251-258.

T. B. Jefferson, "METALS AND HOW TO WELD THEM", The James F. Lincoln Arc Welding Foundation, Cleveland, 1978, edit. Welding Engineer Publications, pags. 215-231.

"ARC WELDING PROCESS", Enciclopedia de la American Welding Society, Tomo II, USA, 1992, Capítulos 2, 3 y 4.