CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES

DIVISION DE ESTUDIOS DE POST-GRADO

ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES DEL HIERRO GRIS QUE IMPACTAN EN LA SOLDABILIDAD DURANTE LA REPARACION DE AGRIETAMIENTO EN CARCASAS DE TURBINAS DE VAPOR

POR

ING. MARIO JORGE GUERRERO BELTRAN

MONOGRAFÍA

EN OPCION COMO ESPECIALISTA EN TECNOLOGÍA

DE LA SOLDADURA INDUSTRIAL

SALTILLO, COAHUILA, MÉXICO 2009

CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES

DIVISION DE ESTUDIOS DE POST-GRADO

ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES DEL HIERRO GRIS QUE IMPACTAN EN LA SOLDABILIDAD DURANTE LA REPARACION DE AGRIETAMIENTO EN CARCASAS DE TURBINAS DE VAPOR

POR

ING. MARIO JORGE GUERRERO BELTRAN

MONOGRAFÍA

EN OPCION COMO ESPECIALISTA EN TECNOLOGÍA

DE LA SOLDADURA INDUSTRIAL

SALTILLO, COAHUILA, MÉXICO 2009

1
SÍNTESIS

La presente monografía describe el entorno del problema que origina la reparación de grietas en carcasas de turbinas de vapor, considerando casos de estudio y las propiedades de los materiales utilizados, así como los tratamientos térmicos requeridos para proporcionar las propiedades mecánicas requeridas para la soldabilidad de las zonas reparadas, aumentando el ciclo de vida de los componentes de hierro gris.

Se estudian las propiedades mecánicas del hierro gris, la fatiga mecánica y térmica y la capacidad de amortiguamiento referida a las vibraciones que puede absorber un material siendo mayor cuanto menor sea la resistencia a la tensión del hiero gris.

Se analizan casos de estudio sobre la reparación de grietas mediante la aplicación de soldadura, por procesos convencionales, donde se hacen las debidas consideraciones para la mejor práctica de soldabilidad y extensión de vida remanente, lo cual impacta directamente en la reducción de costos debidos a paros por mantenimiento.

El éxito dependerá de la certidumbre en la realización de un procedimiento calificado de soldadura que incluye el dominio de los parámetros esenciales y los rangos de temperatura de “pre” y post-calentamiento.

El tamaño considerable de una carcasa dificulta las operaciones de remoción de grieta y es factor adverso al momento del intento de recuperación e inclusive

un movimiento de posición de la pieza puede hacer que falle un buen intento de reparación.

Entonces, las evaluaciones preliminares solo servirán para estimar el posible comportamiento del proceso de soldadura porque el material de la carcasa esta envejecido (más de 40 años de servicio) y se requieren los tratamientos térmicos para beneficiar en las condiciones del metal base para la adecuada interacción con el material de aporte.

2

OBJETIVOS

General

Desarrollar un estudio que permita diseñar un procedimiento o método para soldar piezas de hierro gris con la mejor logística disponible, con las precauciones de seguridad del personal, economía para la empresa y con el mejor aseguramiento de calidad que permita garantizar la operación de la pieza recuperada.

Específicos

1. Evaluar la soldabilidad del hierro gris con diferentes metales de aporte.
2. Seleccionar los parámetros del proceso de soldar el hierro gris.
3. Medir las propiedades mecánicas de una unión soldada de hierro gris.
4. Revisar características metalográficas de una unión soldada de hierro gris.
5. Estudiar el efecto de un tratamiento térmico en las zonas de soldadura.

3

ALCANCES Y LIMITACIONES

ALCANCE DEL PROYECTO

El desarrollo contempla un estudio que incluye los conceptos que a continuación se mencionan.

A.- Establecer el marco teórico

Sintetizar las propiedades del hierro gris.

Revisar la información de artículos, textos y revistas indexadas para obtener lo más relevante en cuanto a características de hierros grises.

B.- Documentación

Recopilación de datos para eventos similares.

Buscar eventos análogos al presente caso para efectos de selección o adaptar metodologías aplicables.

C.- Investigación

Búsqueda de parámetros de soldadura para una mejor comprensión de la problemática.

Debido a las dificultades del problema es necesario indagar en eventos anteriores que aporten información contundente aplicable al presente estudio.

D.- Análisis de opciones. Contar con alternativas de solución.

Los parámetros del procedimiento de soldadura aplicable así como la selección del metal de aporte más idóneo, proporcionan la mejor combinación del calor de entrada, tal que minimice la posibilidad de agrietamiento.

E.- Capacitación

Contar con elementos de conocimiento para soporte técnico.

Es necesario y conveniente el entrenamiento y calificación del soldador para las actividades de la reparación de la carcasa de la turbina de vapor.

Entre las limitantes al proyecto, se puede considerar que el marco teórico puede tener diferencias al momento de pasar a lo práctico. Este proyecto pretende estudiar esta situación para tener mayores oportunidades de éxito.

Debido a que la pieza ha estado operado por largo tiempo, el fenómeno de fatiga está presente en el material, por lo tanto, las expectativas de soldar la pieza disminuyen ante este panorama, por lo que se pretende ofrecer la mejor alternativa de soldadura para compensar el efecto mencionado.

4

JUSTIFICACIÓN

En la industria de la generación termoeléctrica, resulta indispensable el empleo de turbinas de vapor, máquinas donde la energía del fluido se transmite a un eje o flecha denominado rotor, esto es para mantener un movimiento de rotación y en el acoplamiento con el generador eléctrico.

En la Figura 4.1 se presenta una forma de visualizar la ruta de generar electricidad por la vía termoeléctrica, esto es utilizar la energía del vapor de agua intercambiado por el poder calorífico de un combustible y así en la turbina cambiar en movimiento rotatorio.

Desde el punto de vista termodinámico cada equipo tiene una función en la transformación de energías, en este caso, es energía mecánica partiendo de energía térmica, en la Figura 4.2 se ilustra las energías involucradas en la generación eléctrica.

Equipo de energía mecánica. La turbina de vapor es una serie de elementos o componentes mecánicos que durante su operación están sujetos a fatiga mecánica, térmica, erosión etc. y la manifestación de estos fenómenos ocurre mediante grietas.

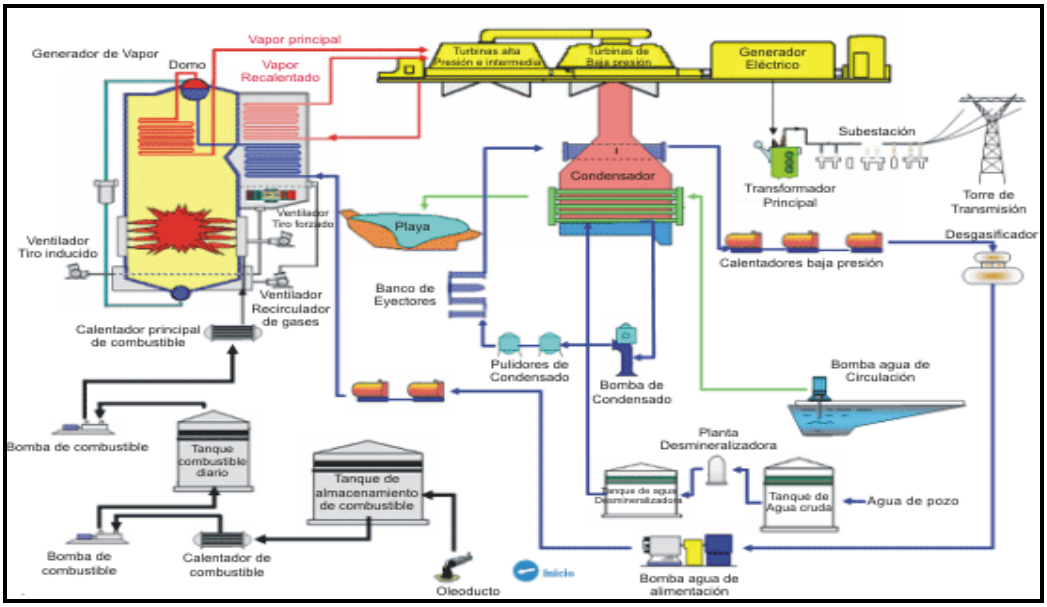
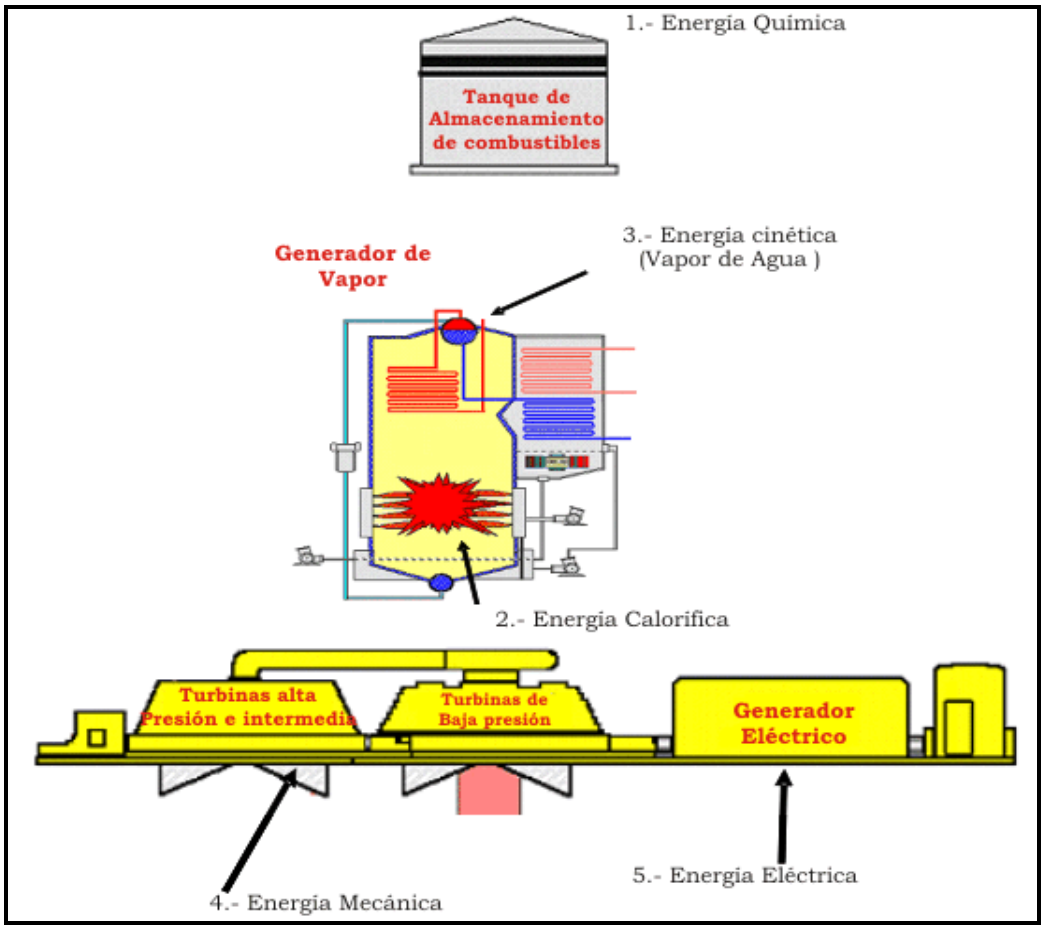


Figura 4.1. Etapas de generación termoeléctrica. (www,cfe.gob.mx).



.**Figura 4.2.** Cambio de energías para producir electricidad. (www.cfe.gob.mx).

El componente del equipo, al que se hace referencia en el presente estudio es la carcasa de la turbina que constituye la cubierta donde se maneja el vapor, su importancia está en que contiene las partes rodantes y soporta las condiciones de operación.

La carcasa, además, tiene que soportar la vibración que puede generarse por la rotación de rotor y alabes, por lo que su grado crítico es de consideración y cualquier indicio de falla debe ser estudiado. Ver Figura 4.3.

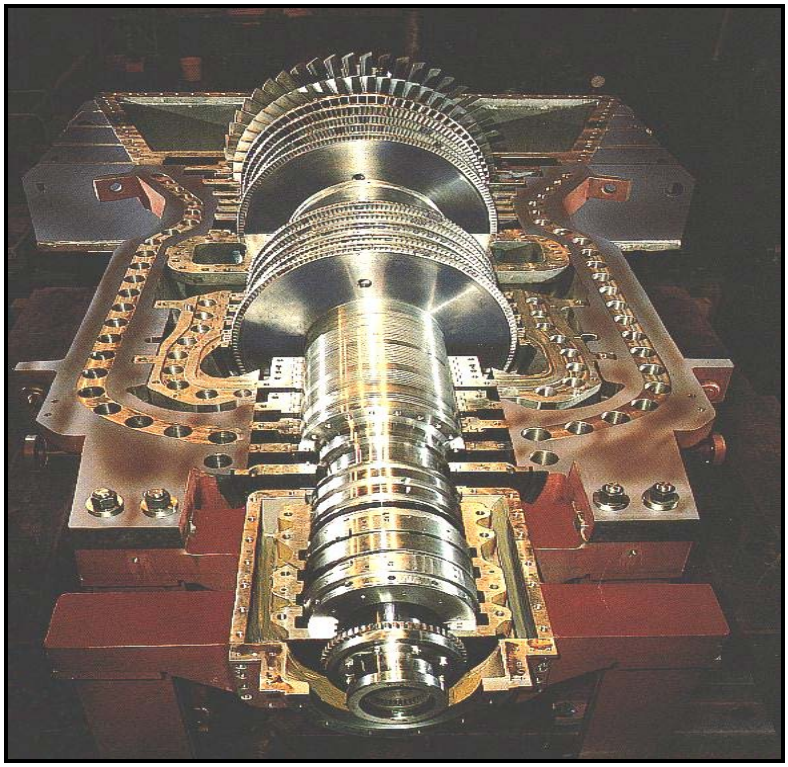


Figura 4.3. Carcasa de turbina, parte inferior. (www.cfe.gob.mx).

En el ámbito de la industria de generación de electricidad a nivel nacional se reportan reparaciones, sólo que no se han documentado técnicamente y tampoco se han difundido, por diversas razones.

Al no haber un documento que describa el proceso por pasos, se pierden detalles importantes y sólo es posible tomar datos de referencia para cuando se presenta un evento similar.

Por lo anterior, el proyecto pretende incluir casos de interés en la fase de documentación para enriquecer con experiencias prácticas y hacer a este documento más confiable para los lectores.

Dentro del campo industrial de generación termoeléctrica existen varias carcasas de turbinas que fueron construidas antes de 1950 con el material de hierro gris, muy posiblemente por facilidades técnicas que serán tratadas más adelante. Estos equipos presentan evidencias del tiempo que han estado en operación, manifestando grietas de diferente forma y tamaño. Este proyecto pretende estudiar el material como una forma de aumentar la confianza de operación de los equipos que presenten grietas, considerando una posible recuperación con aporte de soldadura, además, las dificultades para sustituir un componente de esta magnitud hacen que sea justificable y necesaria una reparación con soldadura al detectar defectos como grietas.

Aunque las características propias del hierro gris, el volumen de la carcasa y la configuración geométrica de la misma permiten que dicho componente opere con defectos de cierta magnitud, específicamente grietas, la seguridad del personal e instalaciones exige de atención a este tipo de problemas.

Reemplazar una carcasa de una turbina no es nada económico y en este caso sale más costeable sustituir todo el turbo-grupo, lo cual multiplica los costos y movimientos.

El volumen de una pieza de esta índole rebasa la capacidad de la gran mayoría de las empresas de fundición nacionales, lo cual aumenta las dificultades de factibilidad, entonces, se puede deducir que una reparación puede incrementar la duración de esta pieza.

Por otra parte, la complejidad de la geometría de una carcasa hace que no sea muy atractivo una fabricación individual, por lo que conseguir un reemplazo sería una tarea por el momento inviable.

Más aún, el avance tecnológico ha ocasionado que mejores equipos con mejor aprovechamiento de espacio hayan sido desarrollados, entonces la sustitución no es una alternativa muy viable, a menos que se quiera actualizar un equipo de esta magnitud, lo que implicaría costos considerables.

Cambiar un equipo de esta naturaleza requiere de tiempo para seleccionar, estudiar, diseñar y optar por una alternativa conveniente; esto hace que una reparación, con cierto margen de confianza, hace justificable contar con una manera de reparación de carcasas dañadas por agrietamiento.

5

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Factores de influencia

El tiempo de operación ocasiona que aparezcan las manifestaciones de un funcionamiento prolongado, por ejemplo, un defecto de fabricación como una grieta o una cavidad, que en un principio no fue detectado, potencialmente podrá aparecer bajo la acción de los esfuerzos operativos.

Manifestación del problema

En una carcasa de turbina hace su aparición alguna grieta, en un momento dado, lo que manifiesta que el material presenta riesgos mayores para continuar operando.

Las grietas son defectos de índole mayor que implican consideraciones especiales, ya que las consecuencias catastróficas de una falla implican daños al entorno personas e instalaciones. En la Figura 5.1 se presenta el tipo de grieta característico del material de una carcasa, este tipo de grietas son indeseables en un equipo de esta naturaleza debido a las condiciones de operación.

Riesgos operativos

Las condiciones operativas de una turbina de vapor son: alta presión y temperatura aproximadamente a los 500°C. EN el caso específico de las unidades 1 y 2 de Central. Termoeléctrica. “Emilio Portes Gil” en Tamaulipas, los valores son: presión 61 Kg/cm^2 y temperatura 480^oC. Por lo anterior es muy demandante, la resistencia de los materiales que intervienen en cada uno de los componentes.

Figura 5.1. Agrietamiento en una carcasa de turbina de vapor. (Cortesía de CFE, GRPN, C. T. Emilio Portes Gil).

Aunado a la operación de una turbina vienen condiciones como las vibraciones mecánicas que hacen la operación de este equipo con mayor condición de riesgo y que favorecen la aparición de grietas.

La erosión y el efecto corrosivo también están presentes en la operación de una turbina de vapor y éstas también influyen para el deterioro y aparición de defectos. Otra muestra de agrietamiento en carcasas de turbina de vapor se puede apreciar en la Figura 5.2.

Figura 5.2. Ilustración de una grieta en la caja de admisión de vapor de turbina. (Cortesía de CFE, GRPNO, C. T. Rosarito).

Universo potencial de eventos

El marco de este proyecto gira en torno a un equipo dentro de la generación termoeléctrica, sin embargo, otros modos de generar electricidad también utilizan turbinas, como en las hidroeléctricas, en este caso las posibilidades de un defecto disminuyen, ya que las temperaturas y la presión son menores, sin embargo, no están exentas de presentar algún daño de esta naturaleza. En la Tabla 5.1 se presenta un universo de equipos turbogeneradores donde potencialmente puede aparecer un defecto.

Tipo de material involucrado

Para el proyecto se ha identificado el tipo de material o aleación denominado hierro gris del que están fabricadas algunas de las carcasas del parque de generación eléctrica de la industria paraestatal mexicana.

El número de turbinas de la Tabla 5.1 es sólo una referencia ante eventos posibles, cabe señalar que las turbinas de mayor capacidad están construidas de un mejor material que el hierro gris (Acero Cr-Ni-Mo).

Sin embargo, en una central se emplean otros equipos cuyas cubiertas o carcasas son de hierro gris, por mencionar algunos, bombas de agua de alimentación, de las llamadas de circuito abierto, válvulas de cierre, cubiertas de motores eléctricos; por lo que el proyecto también puede ser extensivo para alguno de tales elementos.

Tabla 5.1. Centrales de generación de electricidad con equipos fabricados de hierro gris (www,cfe.gob.mx).

TIPO DE CENTRAL	CANTIDAD	NUIMERO DE TURBINAS
Termoeléctricas	23	76
Hidroeléctricas	57	166
Carboeléctricas	2	8
Ciclo combinado	13	54
Turbogas	39	71
Geotermoelectricas	7	38
Nucleoeléctricas	1	2
Plantas Independientes	21	69

6

BENEFICIOS DEL PROYECTO

Confianza en el servicio de la pieza

Ofrecer una reparación para aumentar la confiabilidad del componente y continuar operando con la certeza de haber reducido una posibilidad de falla de grandes magnitudes.

Restablecer sanidad del material

Establecer la opción de eliminar uno o más defectos de la pieza que permitan al material soportar los esfuerzos, sin un concentrador de esfuerzo que a lo largo del tiempo se convertirá en una falla.

Seguridad en las instalaciones

Reducción de posibilidades de una falla eventualmente catastrófica.

Duración de vida útil

Extender el periodo de utilidad de una carcasa eliminando defectos de agrietamiento.

Operación de la turbina

Mantener en funcionamiento el equipo con mayor margen de confiabilidad.

Ahorros económicos

Siempre será más ventajoso, desde el punto de vista económico, realizar una recuperación de un defecto que cambiar un componente.

7

ESTADO DEL ARTE

7.1. INTRODUCCION A LOS HIERROS COLADOS (FUNDICIONES)[1] [Avner Sidney, 1988; Introducción a la metalurgia Física].

Definición de hierro colado gris. Una aleación es la combinación de dos ó más elementos químicos de los cuales, cuando menos, uno es metal o posee características metálicas, entonces, un hierro gris es una aleación de hierro y carbono, caracterizada principalmente por su microestructura y por presentar una apariencia gris cuando se fractura una pieza de esta naturaleza.

El hierro colado gris pertenece a una familia de aleaciones que incluye al hierro blanco, dúctil, maleable entre los principales, en la Tabla 7.1 se presenta la composición típica de estas aleaciones.

Tabla 7.1. Composición química típica de los hierros colados más comerciales [1].

TIPO DE HIERRO	(% en peso)				
	Carbono	**Silicio**	**Manganeso**	**Azufre**	**Fósforo**
Blanco	1.8 -3.6	0.5 – 1.9	0.25 – 0.8	0.06 – 0.2	0.06 – 0.2
Maleable (Blanco de fundición)	2.2 – 2.9	0.9 – 1.9	0.15 – 1.2	0.02 – 0.2	0.02 – 0.2
Gris	2.5 – 4.0	1.0 – 3.0	0.2 – 1.0	0.02 – 0.25	0.02 – 1.0
Dúctil	3.0 – 4.0	1.8 – 2.8	0.1 – 1.0	0.01 – 0.03	0.01 – 0.1
Con grafito compactado	2.5 – 4.0	1.0 – 3.0	0.2 – 1.0	0.01- 0.03	0.01 – 0.1

La principal diferencia entre estos grupos de aleaciones radica en la morfología del carbono presente, ya sea en forma de grafito o carburo de hierro.

En algunos textos, al hierro colado gris se denomina como “fundición gris”, este término es parte de la nomenclatura de un proceso de obtención de una pieza específica con una forma determinada y el color gris se asocia con la coloración que adquiere cuando dicha pieza se fractura.

Para el presente proyecto, se designará este material o aleación como “hierro gris”, para efectos de nomenclatura.

Sistema de aleaciones. Tal como se mencionó anteriormente, la combinación de dos metales produce o resulta en un sistema de aleaciones; lo más simple para efectos de estudio, es un sistema binario donde dos metales se conjugan en proporciones de peso para formar lo que se denomina como un diagrama de equilibrio binario.

En la realidad, el número de componentes es mayor a dos y en diferentes proporciones, sin embargo, para efectos de estudio, un diagrama binario proporciona bastante información muy fácil de relacionar con lo práctico.

El estudio de los diagramas ayuda bastante en la interpretación de la microestructura de la aleación específica y sirve de base para el desarrollo de aleaciones más complejas. Para el presente proyecto es elemental que exista un diagrama que sirva de base para el estudio de los micro-constituyentes del hierro gris.

Definición de eutéctico. Es una reacción en diagrama de equilibrio donde se pasa del estado líquido y simultáneamente se producen dos fases sólidas en una mezcla de placas o laminillas.

El vocablo “eutéctico” es de origen griego que significa “buena fusión”, esto aplicado, en un diagrama binario a presión constante, donde se representa la combinación de dos metales, implica que el eutéctico es una proporción única donde el punto de fusión es menor que los valores de fusión de cualquiera de

los dos metales involucrados. Aun y cuando se pudiera tener presente más de dos elementos, entonces el diagrama se complica demasiado, para los efectos de explicación se utilizará un diagrama binario. La existencia de un eutéctico tiene muchas ventajas sobre todo en el aspecto económico ya que trabajando esta proporción o aleación se alcanza el punto de licuación para dar forma a piezas ahorrando combustible por ser menor la temperatura del proceso.

DIAGRAMA DE EQUILIBRIO HIERRO–CARBONO [1, 19]

Definición. El diagrama es una representación esquemática de un sistema de aleaciones donde los elementos principales son el hierro y el carbono, por la naturaleza de este último, sólo se presenta hasta lo que es el carburo de hierro, que viene siendo un compuesto intermetálico de 6.67%C y que se conoce como cementita.

El diagrama de equilibrio, presenta dos partes fundamentales, región de aceros y región de Hierros y como ya se anotó, también se denominan “fundiciones”. En la Figura 7.1 se muestra el diagrama binario que representa los puntos de transformación, así como los micro constituyentes resultantes de las reacciones propias, así mismo, se pueden visualizar o predecir ciertas características de las aleaciones utilizadas a nivel industrial, ya sea aceros o hierros colados (fundiciones).

El diagrama de equilibrio (hierro-carbono) tiene una gran importancia y, la información que contiene, ha sido la base para el desarrollo de la siderurgia e industrias ferrosas por lo que su inclusión en este proyecto es inevitable.

En el eje horizontal del mencionado diagrama de equilibrio se puede apreciar el porcentaje de aleación de carbono hasta 6.67% de C; en forma práctica no se llega a contenidos tan altos y sólo se utiliza hasta un aproximado de un 4% de C.

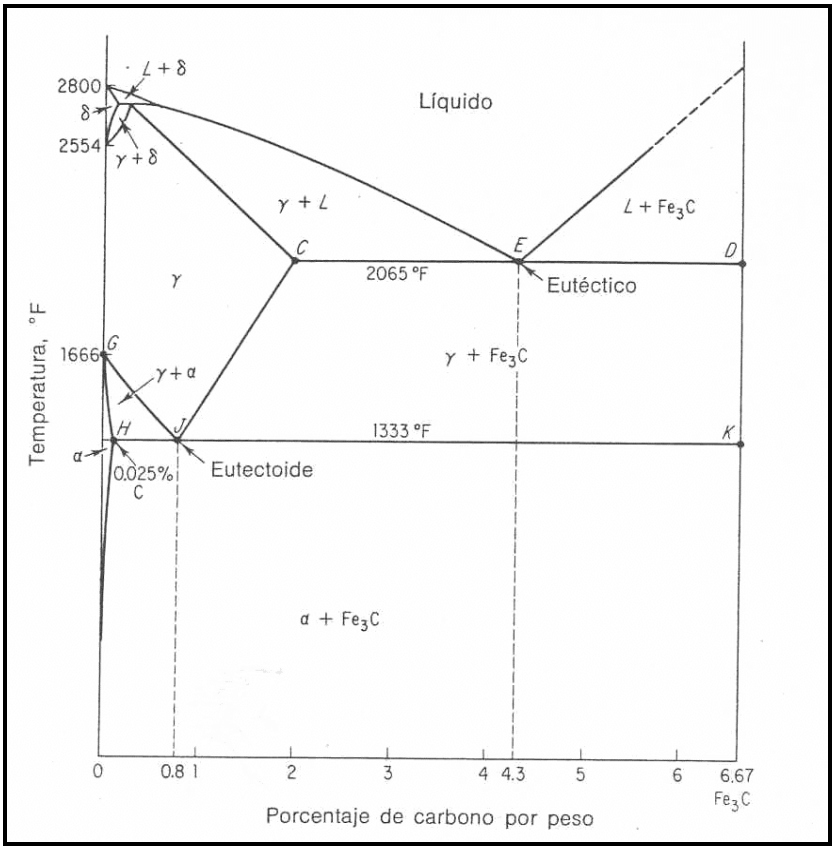


Figura 7.1. Sección del diagrama de equilibrio hierro-carbono para representar aceros y hierros colados [(1)].

Siguiendo en la escala horizontal, desde 0.008% y hasta un 2% se consideran las aleaciones denominadas aceros y, desde 2 hasta 6.67%, son los hierros o fundiciones.

El diagrama contiene tres reacciones, peritéctica a 1495°C y 0.18 %C; eutectoide a 727°C con 0.77%C y eutéctica a 1154°C con 4.3 %C. Haciendo énfasis en que estas reacciones son de mucho interés, principalmente las dos últimas.

Para el presente caso, es conveniente ubicar al proyecto en la región de composición química muy cercana al eutéctico, ya anteriormente se mencionó la ventaja de tener una temperatura menor que el punto de fusión de los metales bases.

Definición de micro constituyentes. El arreglo atómico que siguen los átomos del hierro, es la base para interpretar las fases formadas del hierro gris. El acomodo de estos átomos una celda cúbica de cuerpo centrado con poca capacidad para disolver al carbono; la proximidad en el diagrama de equilibrio de un punto eutéctico por el lado derecho y un punto eutectoide, por el lado izquierdo del diagrama. Los micro constituyentes formados son una mezcla de cada uno de los productos de las reacciones.

El micro constituyente formado en el eutectoide se denomina perlita y al que se forma en el eutéctico se le conoce como ledeburita; entonces en un hierro gris de un 3.8%C tendríamos una mezcla de perlita y ledeburita si existieran las condiciones de equilibrio para que se formaran los micro constituyentes.

Realmente no hay condiciones de equilibrio para que se presente un enfriamiento de una pieza de hierro gris, porque se requiere de mucho tiempo para que los átomos de carbono formen un compuesto llamado cementita y luego se acomoden en placas de perlita, por lo tanto, cuando la aleación está en estado líquido, el carbono está disuelto, a medida que empieza a solidificar comienzan a formarse cristales de austenita que sólo puede disolver hasta un 2% de C, el exceso de soluto se precipita para formar el eutéctico, sin embargo, la formación de cementita, que es un compuesto intermetálico de 6.67%C, requiere de más tiempo, pero debido a que no hay otra manera de solubilidad para el carbono se forman hojuelas de grafito; siendo este último, una forma en que se presenta el carbono en la microestructura de la aleación o hierro gris.

Descripción de hojuelas de grafito en el hierro gris. Al preparar una muestra metalográfica y observar sin ataque químico, en el microscopio óptico se pueden apreciar las hojuelas, según Figura 7.2.

Las hojuelas pueden ser de diverso tamaño, en cuanto a longitud y espesor, repercutiendo en las propiedades mecánicas del material, ver figura 7.3.

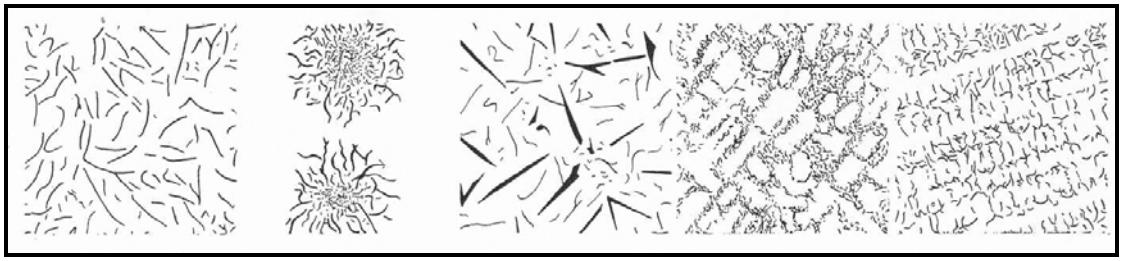


Figura 7.2. Hojuelas de grafito en el hierro gris durante el proceso de solidificación [1].

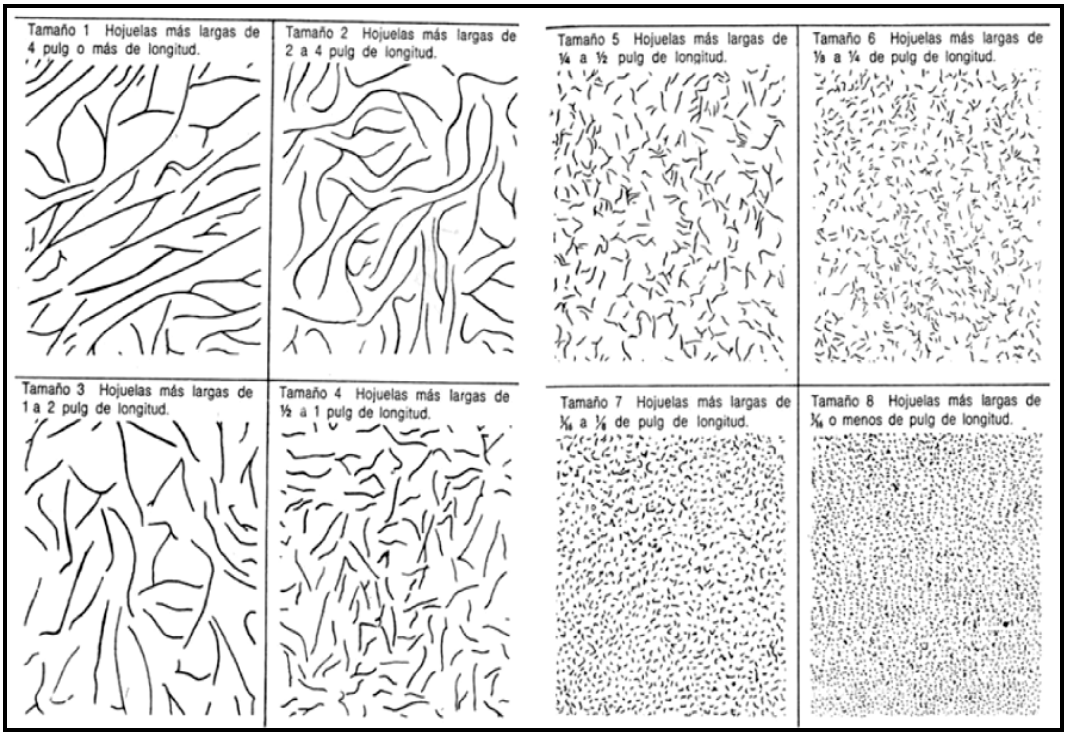


Figura 7.3. La forma influye en el tamaño de las hojuelas de grafito en el hierro gris [1].

PROPIEDADES MECÁNICAS DEL HIERRO GRIS [1, 17, 18].

La institución que establece las especificaciones del material denominado hierro gris o fundición gris, es ASTM, (American Society of Testing and Materials), en cuya especificación A-48 aparece un modo de establecer las calidades de este tipo de material y que se regulan con base en su resistencia mecánica y aunque parezca complicado, realmente es fácil de controlar su grado con sólo medir la dureza en estas piezas.

Los niveles de calidad empiezan desde los 20 hasta los 60 Ksi, en intervalos de 5 Ksi, específicamente sobre el esfuerzo máximo de tensión, no se especifican ni esfuerzos de cedencia ni la composición química, porque de cualquier modo ya se espera un determinado rango. Sobre el contenido de carbono su valor se acerca al 4.3% porque es el eutéctico, que en temimos prácticos es el punto más bajo de fusión en lo que se refiere al sistema de aleaciones hierro-carbono.

Módulo de elasticidad. La curva de esfuerzo – deformación de un ensayo a tensión para una probeta de hierro gris no tiene parte lineal, es decir, no obedece la ley de Hooke, por lo que, no hay proporcionalidad entre el esfuerzo y la deformación y, por lo tanto, la curva obtenida de un ensayo a tensión para un hierro gris puede proporcionar dos módulos, uno tangente a la curva que se genera durante el ensayo, o bien, otro módulo de la secante generada de la mencionada curva. Ver Figura 7.4.

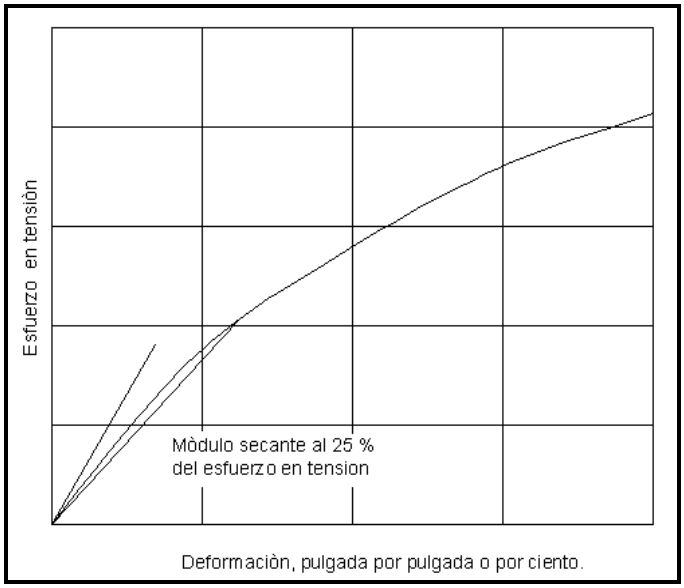


Figura 7.4. Gráfica de un ensayo a tensión de una probeta de hierro gris [1]

El segundo módulo que corresponde con el 25% aproximado de la resistencia a tensión del material, por esta razón no se especifica el valor del esfuerzo de cedencia, además, de que varía según la microestructura presente y

básicamente, es el tamaño y espesor de las hojuelas de grafito; disminuye al aumentar el carbono equivalente, aumenta con el contenido de aleantes, disminuye con la sección o espesores de las piezas y al aplicar un tratamiento térmico de recocido. Ver Figura 7.4.

Relación de poisson. Este valor, por lo general, es una constante y en casi todos lo aceros es de 0.3, en la mayor parte de los materiales hay una contracción con respecto a la elongación para compensar y mantener constante el volumen durante el ensayo de tracción, sin embargo, en un hierro gris hay un cambio de volumen debido a las hojuelas de grafito. Ver Figura 7.5.

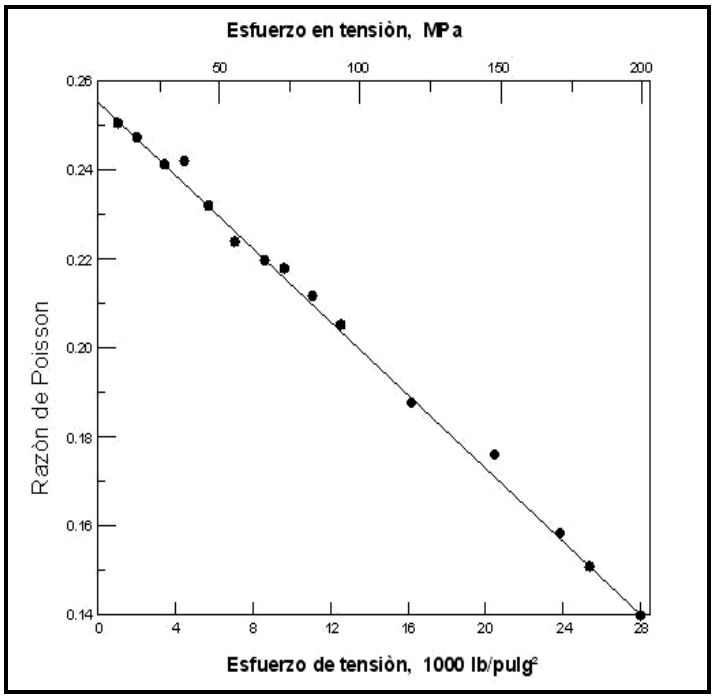


Figura 7.5. Gráfica del valor de Poisson contra la resistencia a tensión [(1)].

El cambio de volumen provoca un aumento en deformación longitudinal, sin que exista una contracción y, por lo tanto, la relación de poisson disminuye al aumentar el esfuerzo.

Propiedades de compresión. Debido a que las hojuelas actúan como muescas, el hierro gris es muy frágil y su resistencia a la tensión depende del tamaño y espesor de dichas hojuelas, sin embargo, este material tiene un mejor comportamiento en los esfuerzos de compresión, ya que en este caso las mencionadas hojuelas de grafito no influyen. Ver Figura 8.6.

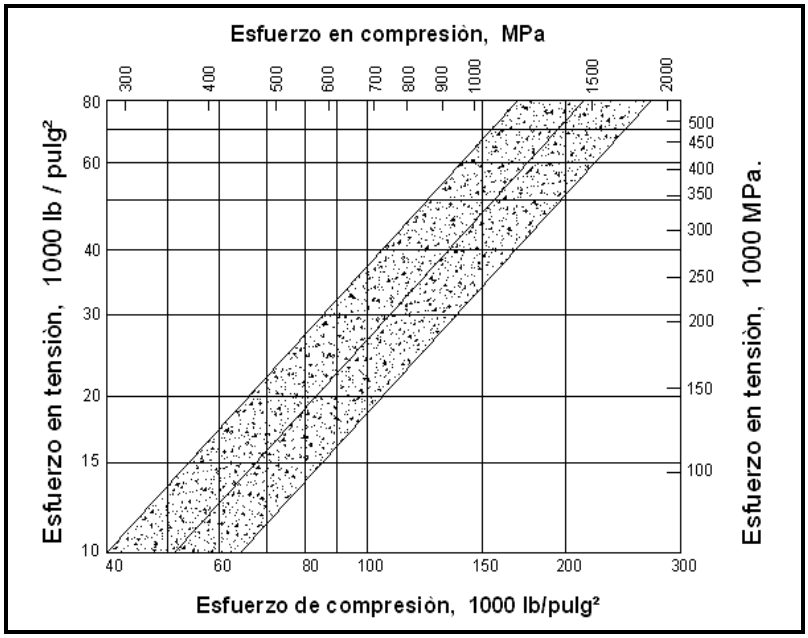


Figura 7.6. Gráfica de la relación entre los esfuerzos de compresión y tensión [(1)].

Por otra parte, la resistencia a compresión es afectada según el tipo de estructura, ya sea ferrítica, perlítica, bainítica o martensítica, conceptos que serán tratados más adelante.

Capacidad de amortiguamiento. Esta capacidad relativa se refiere a las vibraciones que puede absorber un material. En la Figura 7.7 se puede apreciar que la capacidad de amortiguar es mayor, cuanto menor sea la resistencia a tensión del hiero gris.

Figura 7.7. Relación entre el amortiguamiento y el esfuerzo a tensión en el hierro gris [1, 17].

La extinción de las vibraciones por un cambio de energías, de mecánicas a calor, es muy importante en las máquinas y estructuras, de tal forma que si no puede disiparse de esta forma, la amplitud de vibración puede crecer hasta llegar a una falla catastrófica, además, puede reducir la exactitud de la maquinaria, ocasionando desgaste en superficies en contacto e induce estregamiento (acción de pasar calor) entre las partes acopladas.

Los componentes hechos con materiales de gran capacidad de amortiguamiento pueden reducir el ruido de golpeteo, en repeticiones y los sonidos de rozamiento y también reducir al máximo los esfuerzos inducidos por vibración.

El hierro gris es, entre las diferentes fundiciones, aceros y aluminios, el que presenta mayor capacidad de amortiguamiento; por esta razón, es el material ideal para soportes y bases de máquinas, bloques de cilindros de motor y componentes de frenos.

Este comportamiento se atribuye a la forma de las hojuelas de grafito y al comportamiento no-lineal que se aprecia en la curva de esfuerzo–deformación.

La capacidad de amortiguamiento de los hierros grises de resistencia más baja es mejor que los hierros de resistencia más alta, para este concepto, las

hojuelas de grafito más gruesas, son mejores que las finas. Un espesor de sección grande en una pieza fundida aumenta la capacidad de amortiguamiento. La inoculación y la reducción del contenido de fósforo también disminuye la capacidad de amortiguamiento, asimismo, una microestructura ferrítica es lo mejor en este aspecto y una martensítica revenida es mejor que una estructura bainítica.

CONSIDERACIONES EN DISEÑO DE PIEZAS CON HIERRO GRIS [(1)]

Normalmente una pieza fundida o vaciada en un molde no debe requerir mayores procesos como tratamientos térmicos, maquinados o conformado, sin embargo, esto no descarta que se le puedan aplicar según los requerimientos o funciones de cada pieza.

Las ventajas adicionales del hierro gris respecto del acero, son su maquinabilidad, su resistencia al choque térmico y su formabilidad.

Aunque es fácil colar piezas de los diferentes hierros, es mejor hacer una buena selección, por ejemplo, para piezas con secciones delgadas que requieren ductilidad es más conveniente producir el hierro maleable. El hierro gris de baja resistencia mecánica es muy fluido cuando está líquido y solidifica prácticamente sin ninguna contracción por lo que puede verterse en moldes delgados y muy complejos.

7.2.- TRATAMIENTOS TÉRMICOS [(2)] [ASM Metals Handbook Vol. 4, Heat Treating, 1998]

El tratamiento térmico más aplicado con la excepción del relevado de esfuerzos, en los hierros colados, es el recocido; este proceso para un hierro gris consiste en calentar la pieza hasta una temperatura suficientemente alta (ver Tabla 8.2) para suavizarlo y para minimizar o reducir los carburos eutécticos, esto con el propósito de mejorar su maquinabilidad. El recocido reduce muy

significativamente las propiedades mecánicas, por ejemplo, un grado 40 muy seguramente se reducirá a un grado 30 (ASTM, A-48; 1988). El grado de reducción de propiedades con el tratamiento de recocido depende de la temperatura, tiempo de permanencia y elementos aleantes presentes con el Hierro [(2)].

Una síntesis de los tratamientos aplicables al hierro gris se presentan a continuación en la Tabla 7.2.

Tabla 7.2. Principales tratamientos térmicos aplicables al hierro gris [(2)].

TIPO DE TRATAMIENTO TÉRMICO		RANGO DE TEMPERATURAS (^{o}C)
RECOCIDO	FERRITIZANTE	595 – 760
	MEDIO–TOTAL	790 – 900
	GRAFITIZANTE	870 – 940
NORMALIZADO		885 – 925
TEMPLE/REVENIDO		870 - 900/510 – 550
AUSTENITIZADO		845 – 855
AUSTEMPERING		230 – 425
MARTEMPERING		205 – 260
ENDURECIMIENTO CON FLAMA		845 – 870
RELEVO DE ESFUERZOS		545 – 600

TIPOS DE RECOCIDOS.

Comúnmente, una pieza de hierro gris se somete a uno de los siguientes tipos de recocido, ferritizante, medio o completo y grafitizante. Ver Figura 7.8.

Recocido ferritizante. Tratamiento térmico aplicado a piezas sin y con baja aleación, cuando sólo se desea cambiar la fase perlita a ferrita y los carburos a grafito para mejorar la maquinabilidad, generalmente para este proceso no es necesario calentar por arriba del rango de transformación. Cuando la temperatura es por arriba de los 595°C, el carburo de hierro se descompone a ferrita más grafito y a medida que se incrementa la temperatura, la reacción se hace más rápido hasta un valor muy cercano a los 760°C.

Ahora bien, si la temperatura de recocido excede sobre la de transformación, esto puede causar un detrimento al proceso de recocido, porque causará una transformación parcial o total en austenita.

Para la mayoría de los hierros grises se recomienda que este proceso de recocido se aplique entre 705 y 760°C. Es recomendable que el perfil de temperatura dentro del horno debe ser tal, que el rango de temperatura sea seguro para que la pieza esté dentro de dicho rango. Además, se debe permitir el tiempo necesario para asegurar la transformación o permitir la grafitización total, un tiempo recomendado es una hora por pulgada de sección, debiendo considerar que a temperaturas inferiores a 705°C se debe incrementar el tiempo de permanencia. La velocidad de enfriamiento para este proceso no es muy importante, sin embargo, es conveniente un enfriamiento lento, un valor recomendado es de 110°C /hr [(2)].

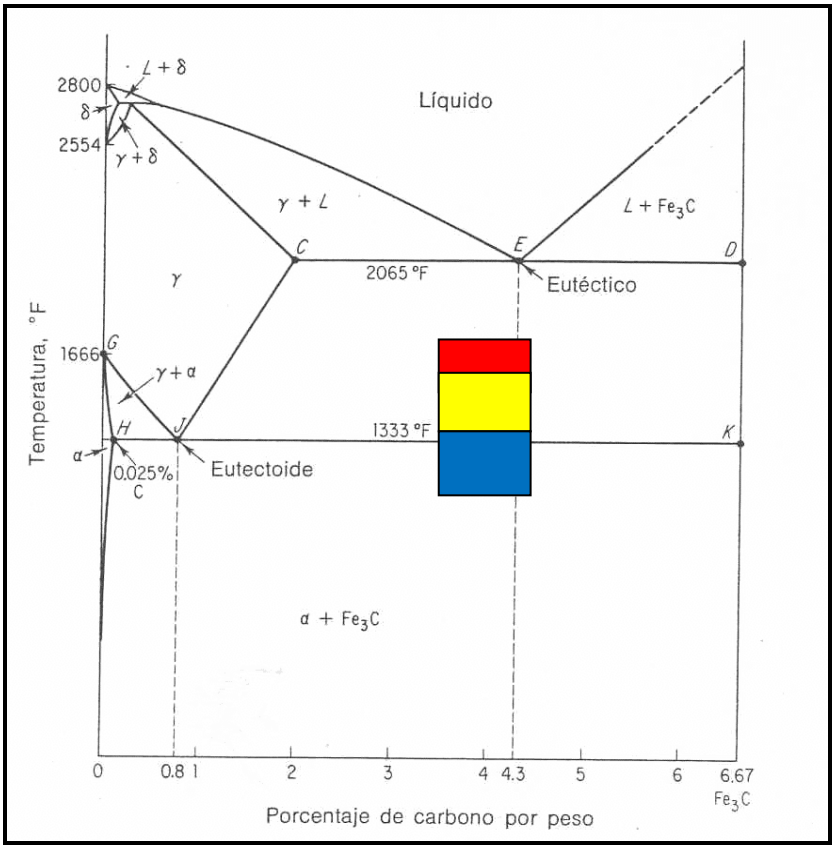
Recocido medio a total

Este proceso se desarrolla a temperaturas entre los 790 y 900°C y se aplica cuando el recocido ferritizante no es efectivo porque el hierro contiene un alto contenido de aleación. El tiempo de mantenimiento para este proceso es comparable con el proceso ferritizante y el enfriamiento debe ser lento especialmente en el rango transformación entre los 790 a 675°C [(2)].

Recocido grafitizante

Si en la microestructura del hierro gris aparecen partículas masivas de carburos, se requiere de mayor temperatura para convertir a éstos en perlita y grafito [(2)].

La formación de los carburos que sea necesario eliminar por recocido puede ser accidental por una inadecuada inoculación o bien por la presencia de agentes formadores de carburos, lo cual inhibe la formación de grafito.



RECOCIDO:	Rango temperatura:	Franja color:
FERRITIZANTE. Cambio de ferrita a perlita.	595 – 760 °C	
MEDIO – TOTAL. Elementos de aleación.	790 – 900 °C	
GRAFITIZANTE. Cambiar carburos a grafito.	870 – 940 °C	

Figura 7.8. Gráfica de tratamientos térmicos de los recocidos en hierro gris [(2)].

Para una transformación de carburos a una razonable velocidad se requiere de una temperatura de 870°C y con un incremento de 55°C la velocidad de transformación se dúplica, por lo que la temperatura más adecuada es de 955°C, aunque se debe tomar en cuenta que con un contenido de 0,10% de fósforo se forma un punto eutéctico que funde a 925°C.

Por esto último, conocer la composición química es importante al momento de aplicar un tratamiento térmico para este tipo de aleaciones.

El tiempo de mantenimiento a la temperatura puede variar desde unos cuantos minutos hasta varias horas, ejemplo un hierro blanco de alto silicio puede ser tratado en 15 minutos a 940°C.

Es muy recomendable que la atmósfera del horno sea controlada porque el hierro gris es muy susceptible a formar escamas si hay humedad presente, entonces los tiempos de permanencia son lo menor posible.

La velocidad de enfriamiento depende del objetivo del tratamiento, si sólo se desea la transformación de carburos y retener una estructura perlítica, entonces se pueda enfriar en aire. Para obtener la máxima maquinabilidad, se debe enfriar dentro del horno, en general, se recomienda un enfriamiento no mayor a 110°C por hora para reducir la aparición de esfuerzos residuales [(2)].

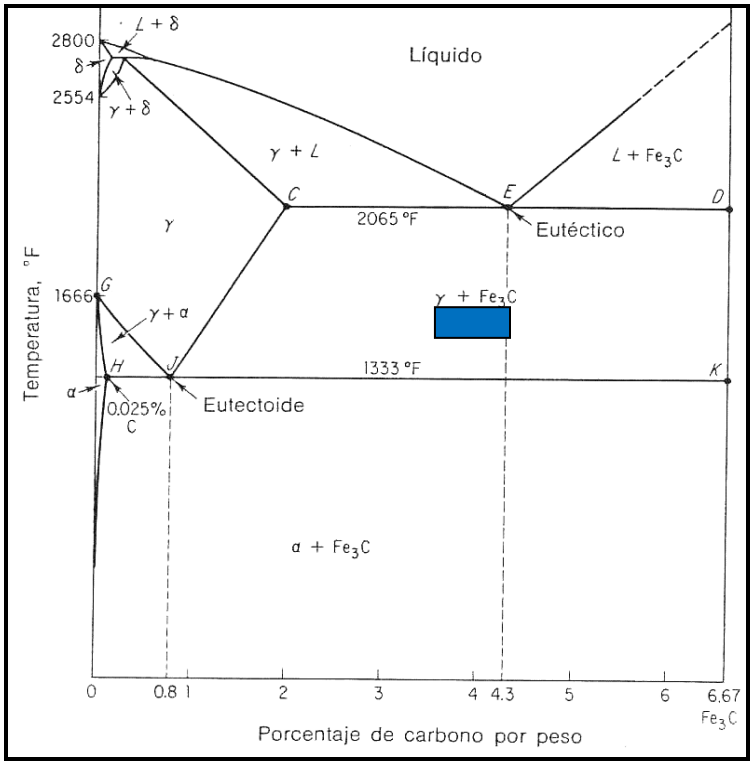
Efecto de los elementos de aleación en los parámetros de tiempo y temperatura

Ciertos elementos, como el propio carbono y silicio aceleran la descomposición de la perlita a la temperatura de recocido, así que, estando presentes en ciertos porcentajes se puede reducir el tiempo de permanencia para un proceso de recocido. Por ejemplo, para hierros con alto contenido de silicio se puede lograr una transformación de perlita a 750°C en 10 minutos, mientras que se requiere de 40 minutos para hierros con bajo contenido de silicio [(2)].

Normalizado

Consiste en calentar la pieza por arriba de la zona de transformación, sostener la temperatura por espacio de una hora por pulgada de sección y enfriar en aire tranquilo hasta la temperatura ambiente. Ver Figura 7.9.

El normalizado puede ser aplicado para elevar las propiedades mecánicas como la dureza y la resistencia a la tensión, a valores similares a los obtenidos en la condición de colado. El rango de temperaturas para aplicar el normalizado está entre los 885 y 925°C. El efecto de la temperatura, al final del proceso, será apreciado en la fineza de la perlita, dependiente entre más alta sea la temperatura de tratamiento [2].



NORMALIZADO. (885-925 °C)

EQUIVALE A UN TEMPLE LIGERO Y SE APLICA PARA OBTENER UNAS PROPIEDADES SIMILARES A LA CONDICION DE COLADO.

Figura 7.9. Gráfica de tratamiento térmico de normalizado en el hierro gris [2].

Temple y Revenido

Los hierros grises son templados y revenidos para mejorar sus propiedades mecánicas, especialmente, la resistencia a tensión y resistencia al desgaste, después de esta combinación de tratamientos, un hierro gris puede desarrollar unas propiedades cinco veces mejor que un hierro perlítico. Ver Figura 7.10.

En el temple con flama o por inducción se requiere que la mayoría del carbono se encuentre combinado, porque el tiempo relativamente corto en que se encuentra la pieza en austenitización requiere del carbono disuelto en la austenita.

RECOCIDO:	**Rango temperatura:**	**Franja color:**
TEMPLE. Endurecer para aumentar resistencia al desgaste.	870 – 900 °C	
REVENIDO. Reducir esfuerzos residuales.	510 – 550 °C	

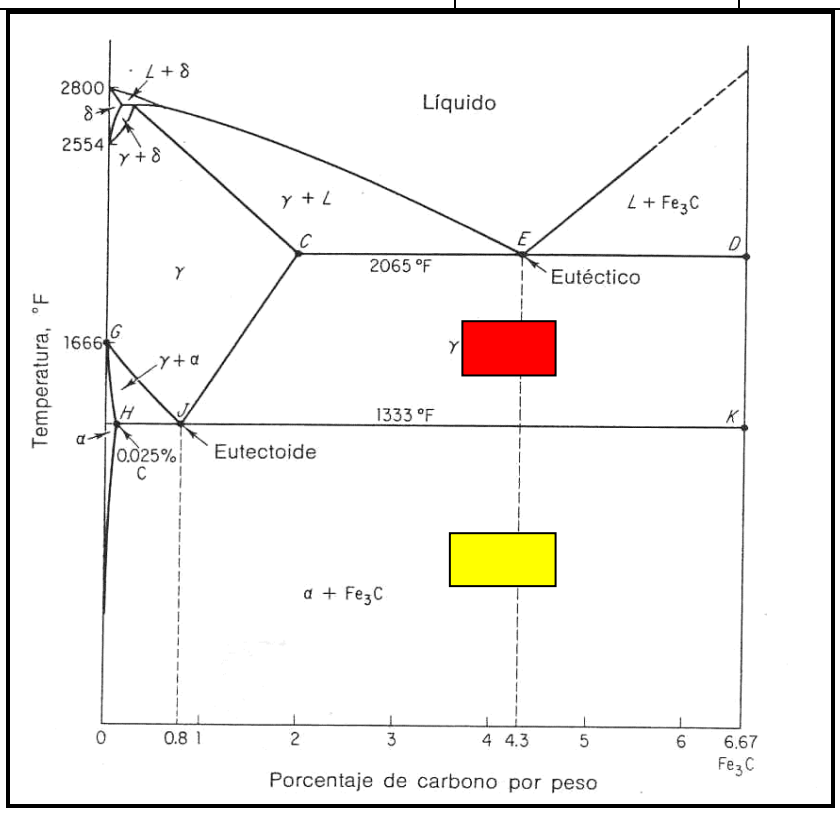


Figura 7.10. Gráfica de los tratamientos térmicos de temple y revenido en hierro gris [2].

En los hierros grises que no contienen más elementos de aleación y poco carbono en combinación, es necesario un tiempo muy largo de austenización. Con el transcurso del tiempo una mayor cantidad de carbono puede ser disuelto y al momento del temple se puede obtener una dureza mayor.

El manganeso, vanadio y molibdeno son reconocidos como elementos que incrementan el endurecimiento en un hierro gris, el cromo y el níquel se agregan para acentuar el efecto del molibdeno. Aunque el cromo no influye directamente en la respuesta de endurecimiento, otra contribución es que ayuda a estabilizar los carburos [(2)].

Austenizado

Las piezas de hierro gris sujetas a un endurecimiento, es necesario colocarlas a una temperatura suficiente para promover la formación de austenita, sostener en esta temperatura hasta que se disuelva una cantidad suficiente para tener la oportunidad de lograr un endurecimiento.

La temperatura a la cual debe calentarse una pieza de hierro gris puede variar dependiendo de su composición química, como dato se puede tomar una referencia de 55°C por arriba de la línea de A_{c1}. El Cromo tiende a incrementar los puntos de transformación y el níquel tiende a descender tales transformaciones, por lo que la elección de la temperatura es una cuestión crítica.

En ocasiones se utiliza un valor de temperatura muy alto para aumentar la cantidad de carbono disuelta en menor tiempo, esto aumenta el riesgo de que al aplicar el enfriamiento, pueda ocurrir una fractura, además de la distorsión y la cantidad de austenita retenida [(2)].

Medios para temple

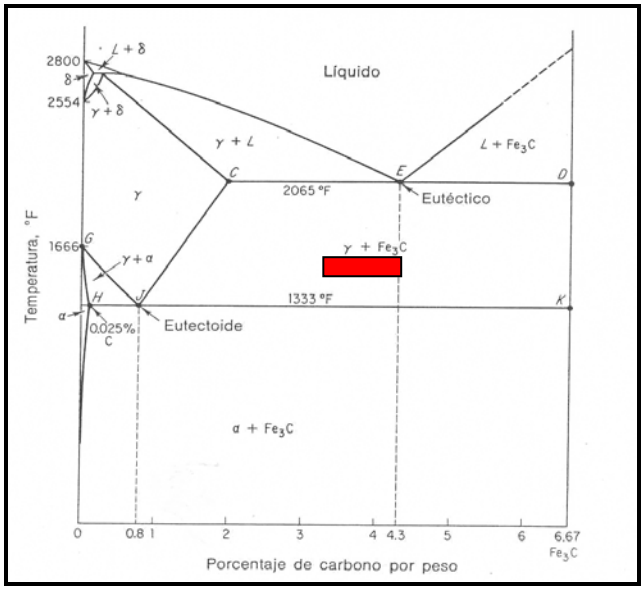
El aceite es el medio más recomendable para aplicar un tratamiento de temple, de preferencia no se debe utilizar agua porque las posibilidades de un agrietamiento son muy altas, un medio menos severo que se puede utilizar es el aire aunque para hierros grises, sin elementos de aleación, esto no será suficiente para formar la martensita [(2)].

Revenido

Una pieza o lote de piezas que han sido templadas requieren del revenido casi inmediatamente, porque los esfuerzos residuales son capaces de agrietar estas piezas, con el revenido disminuirá la dureza pero se lograra una estabilidad al retirar ciertos esfuerzos residuales y se reduce la posibilidad de una formación de grietas en alguna de las piezas [(2)].

Austempering

En este tratamiento la microestructura final en un hierro gris que se forma debajo de la formación de perlita pero arriba de la martensita es una bainita acicular con la variación de ciertas cantidades de austenita retenida dependiendo de la temperatura de transformación. Ver Figura 7.11.



AUSTENITIZADO. (845-855 °C)
AUSTEMPERING. (230-425 °C)
MARTEMPERING. (205-260 °C)

TRATAMIENTOS ISOTERMICOS PARA MEJORES CARACTERISTICAS MECANICAS.

Figura 7.11. Gráfica de los tratamientos térmicos de Austempering y Martempering en el hierro gris [(2).]

El proceso consiste en enfriar, desde la temperatura de tratamiento, en un baño de sales alrededor de 230 a 425°C y cuando sea requerido mayor dureza y resistencia al desgaste se utiliza un rango de 230-290°C. El tiempo requerido para la máxima transformación es determinado por la temperatura del baño y la composición química del hierro gris, las adiciones de cromo, níquel y molibdeno incrementan el tiempo de transformación [(2)].

El espesor de la sección transversal así como la forma de las piezas ofrece limitantes por las dimensiones del baño de sales.

Martempering

Este tratamiento se aplica para desarrollar una estructura martensítica sin producir los esfuerzos residuales de un temple ordinario, es similar al endurecimiento ordinario sólo que con una mínima distorsión. Ver Figura 7.11. La pieza en tratamiento se enfría desde la temperatura de transformación hasta 205-260°C en un baño de sales, aceite, plomo o similar [(2)].

Endurecimiento con flama

Este es un tratamiento muy comúnmente aplicado a piezas de fundición gris, se puede considerar como un endurecimiento superficial porque se desarrolla dureza en la superficie con una parte interna relativamente suave [(2)].

Relevo de esfuerzos

En forma general, las piezas vaciadas contienen esfuerzos residuales, los cuales pueden reducir la resistencia a tensión, causar distorsión y eventualmente ocasionar un agrietamiento. Se puede aplicar un relevado de esfuerzos a una temperatura de 650°C aunque se aplican entre los 540 - 565°C

y con la permanencia de una hora se puede remover el 75–85% de los esfuerzos residuales con que inicia el tratamiento [2].

7.3.- FATIGA EN HIERROS GRISES[3]. [Sindo Kou, (2003) Welding Metallurgy].

La fatiga es un fenómeno que ocurre en piezas metálicas sujetas a cargas o esfuerzos cíclicos o alternantes y que durante un periodo de tiempo hace su manifestación rompiendo o fracturando la pieza.

La manifestación de la fatiga es una fractura característica en tres etapas, la inicial, propagación y el rompimiento. El fenómeno de fatiga tiene dos derivaciones, mecánica; que es ocasionada por fuerzas externas de la índole señalada y térmica que corresponde con esfuerzos en altas temperaturas y oscilación de estas.

Fatiga mecánica

Cada material tiene su propia resistencia a la fatiga y con diferentes valores característicos en acuerdo con sus condiciones mecánicas. Por otra parte, el esfuerzo operativo que ocasiona fatiga se ve influenciado por situaciones como:

a) Acabado superficial

b) Concentradores de esfuerzos

c) Temperatura.

En la Figura 7.12 se ilustra el mecanismo de fatiga como un resultado de una inclusión o bien de un defecto a nivel atómico, el cual durante los desplazamientos de planos cristalográficos ocasionados durante la elongación producto de la fuerza tiene un movimiento similar a la difusión.

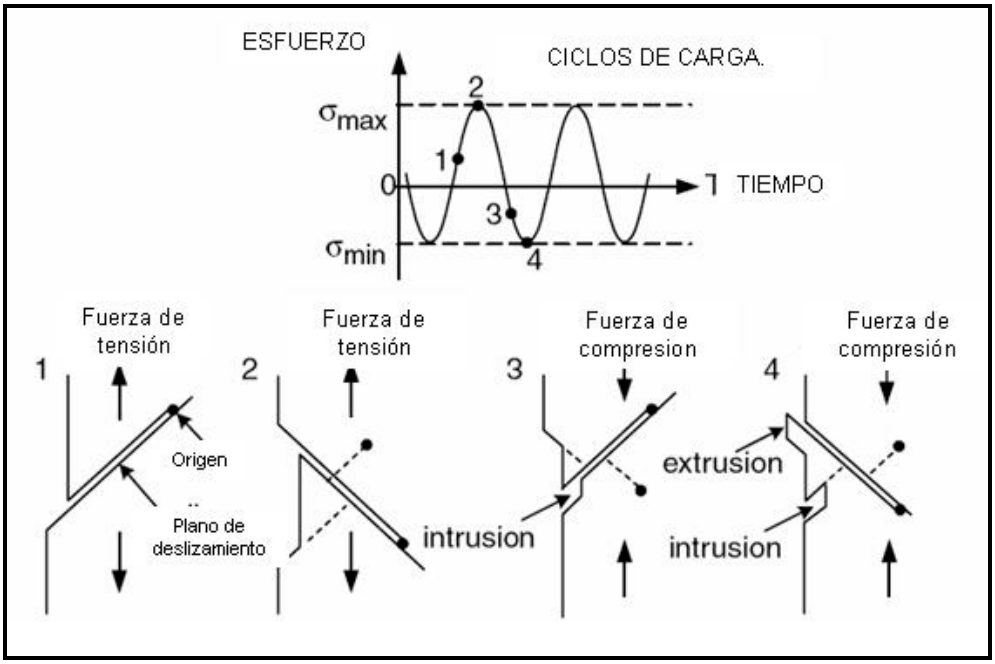


Figura 7.12. Ilustración del fenómeno de la fatiga [3].

La migración de una partícula atómica puede ocasionar huecos o aberturas que hacia el interior se denomina intrusión y en sentido contrario se denomina extrusión.

La aparición de lo anterior provoca concentraciones de esfuerzos que, al paso del tiempo son iniciadores de grietas de fractura.

Algunos materiales, como los aceros, presentan un comportamiento asintótico a un determinado valor que se conoce como “límite de endurancia” o límite de resistencia a fatiga que sirve para diseñar el funcionamiento de cada pieza sujeta a esfuerzos de índole dinámico [4].

Otros materiales como el aluminio no tienen límite de endurancia o límite de resistencia a fatiga, por lo que su esfuerzo de falla ocurre invariablemente a cierto espacio de tiempo contrastando con una falla tiempo tendiendo a infinito de un material que sí presenta esta tendencia.

Las pruebas de fatiga son costosas (Ver Figura 8.16) y conllevan circunstancias como el tiempo de transcurso, por lo que este tipo de pruebas no son muy numerosas y se aprovecha lo que se va investigando. Ver Figura 7.13.

En el caso del hierro se presenta un comportamiento con alguna similitud con los aceros, sólo que es más sensible a las entalladuras que corresponde con los concentradores de esfuerzos.

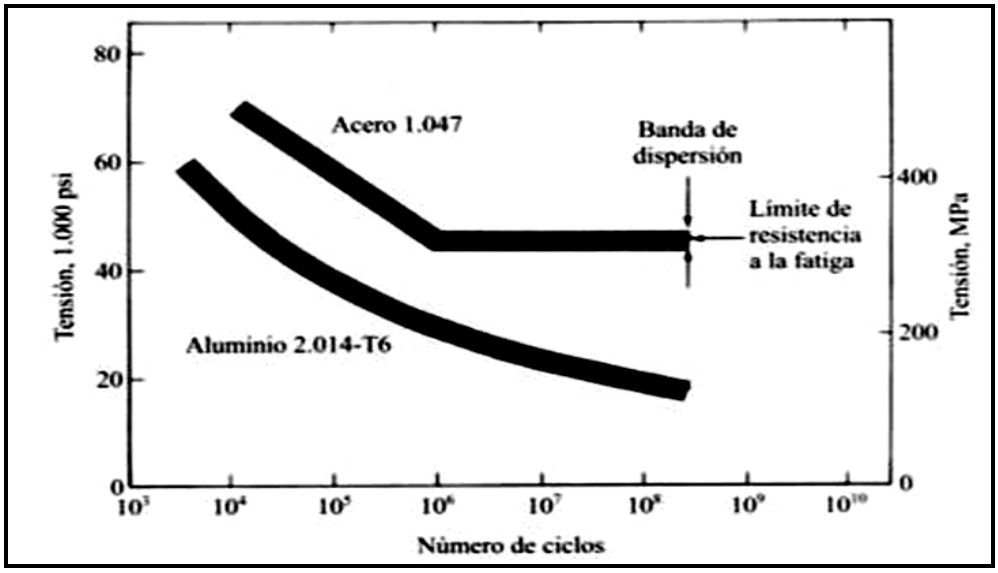


Figura 7.13. Ejemplos de graficas de ensayos a fatiga [(4)].

Cuando se quiere establecer un valor de diseño para los valores de “límite de resistencia a fatiga”, para el hierro gris se puede tomar el 35% del mínimo especificado para el esfuerzo máximo de tensión [(4)].

En la Figura 7.13 se ejemplifica la interpretación del límite de resistencia a fatiga, que también se ha denominado como límite de endurancia, la primer curva corresponde a un acero ordinario, esto es solamente con carbono como elemento de aleación, la segunda curva es de un aluminio con aleación y tratamiento térmico de endurecimiento.

En la Figura 7.14, se ejemplifica el límite de fatiga para un hierro gris y se incluye otra gráfica del comportamiento contra la temperatura.

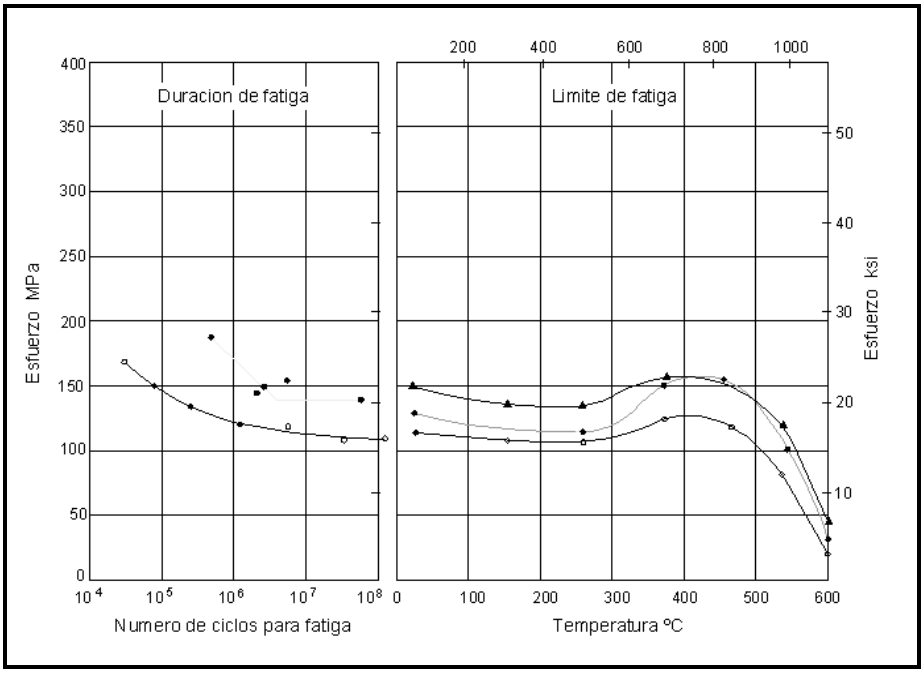


Figura 7.14. Grafico de pruebas de fatiga para hierro gris [5].

Es importante señalar que la carcasa de turbina de vapor del presente estudio, opera a temperaturas intermedias (aprox. 500°C) y conviene tener en cuenta que la resistencia a tensión será diferente durante la operación. Ver Figura 7.15.

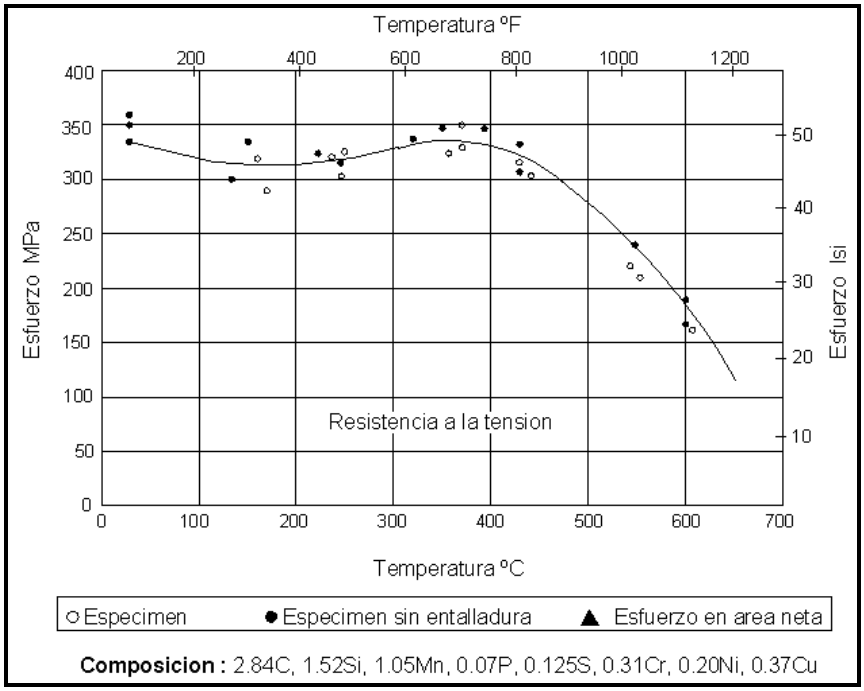


Figura 7.15. Curva de esfuerzo de tensión contra temperatura del hierro gris [5].

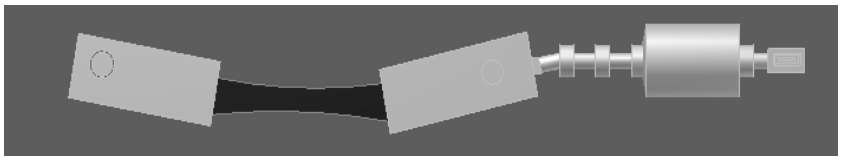


Figura 7.16. Esquema de una prueba de ensayo a fatiga [3].

Fatiga térmica

Este concepto involucra la operación de piezas en temperaturas mayores del ambiente, diferenciando de una pieza que durante su operación aumenta su temperatura y que, requiere de un enfriamiento ya sea con medios líquidos o gaseosos.

La consecuencia del fenómeno denominado fatiga térmica también es un rompimiento o fractura, sin embargo, de manera particular se le denomina termofluencia. Ver Figura 7.17.

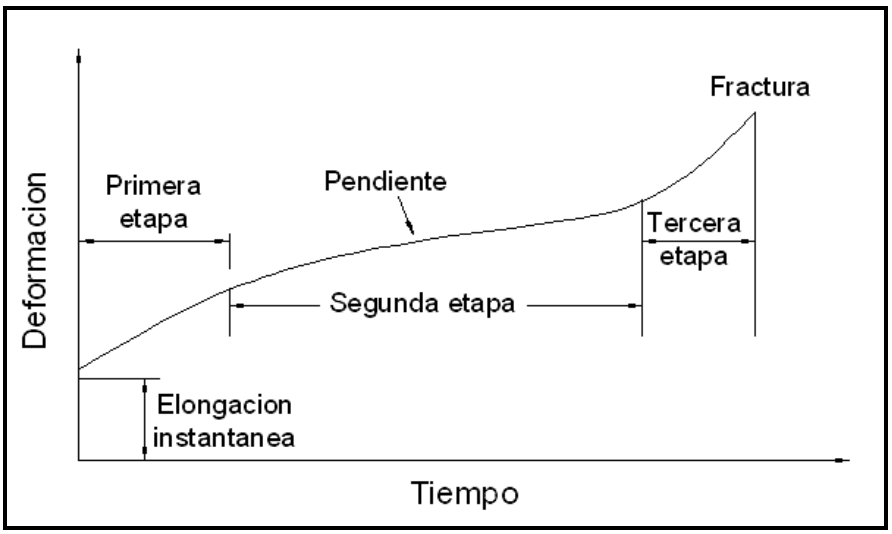


Figura 7.17. Grafica de termofluencia [4].

La curva mostrada en la Figura 7.17, que es general para cualquier material metálico, muestra una primera etapa donde una deformación ocurre hasta una aparente estabilidad, que da paso a la segunda etapa que relativamente es la

vida útil de la pieza, en la tercera etapa dicha deformación se incrementa notablemente hasta que ocurre el rompimiento.

Aunque el hierro gris no es un material utilizado para piezas que operen a altas temperaturas, sin embargo, una carcasa permanece a una temperatura significativa (500 ^{o}C), en el interior, entonces, se deduce que las grietas que aparecen son influenciadas por este fenómeno.

7.4.- SOLDABILIDAD DE LOS HIERROS GRISES [6, 8, 14]**.** [Canadian Welding Association, Journal Fall, 2005].

Desde el punto técnico, los grados más soldables de hierros colados son lo que tienen un mínimo de carbono combinado e inclusiones simétricas de grafito. Por lo anterior, el hierro dúctil ferrítico ó denominado nodular es expuesto durante su proceso de vaciado para obtener un hierro de alta pureza y por lo tanto, es el que más fácilmente se puede unir con soldadura.

Un tratamiento térmico de recocido permite las condiciones de enfriamiento de equilibrio para promover la disolución de algunos carburos, martensita y perlita con la finalidad de obtener un grado de ferrita lo mayor posible [8]**.** En contraparte, si empleamos elementos de alta pureza puede producir una ferrita basta, sin necesidad de un tratamiento térmico.

El resultado de los métodos anteriores produce una ferrita comparable con un acero AISI 1020 pero con esferoides de grafito dispersos en la matriz. También, el recocido ferritizante ocasiona que los esfuerzos residuales del proceso de vaciado sean eliminados, estas situaciones hacen más favorable el proceso de soldadura.

Debido a que el carbono combinado está en forma de perlita, carburos de hierro o martensita, la habilidad para la soldadura disminuye y los riesgos de un agrietamiento aumentan.

Los porcentajes de las fases anteriores varían de una pieza a otra, esto hace que sea necesario un precalentamiento a altas temperaturas (250-500°C) y combinado con métodos para prevenir agrietamiento como el martilleo o granallado.

Procesos de soldadura

Se puede utilizar varios de los siguientes procesos de soldadura para realizar uniones en fundiciones, por mencionar: soldadura por oxígeno y gas (Oxigen Fuel Welding, OFW), soldadura de arco con electrodo recubierto (Shield Metal Arc Welding, SMAW), soldadura por arco con electrodo continuo (Gas Metal Arc Welding, GMAW) y soldadura con alambre tubular (Flux Cored Arc Welding, FCAW).

Los procesos más productivos tienen un mayor aporte de calor; esto hace que la microestructura sea más cambiante y se requiere de tomar precauciones. Ahora bien, en el presente caso que atañe en cuanto a reparar defectos, esto es una situación muy especial, por lo que el proceso más recomendable seria el proceso de soldadura con electrodo de tungsteno (Gas Tungsten Arc Welding, GTAW) anticipando que el tipo de aporte en su presentación comercial no tiene muchas opciones [7].

Electrodos o metales de aporte[14]

Los tres tipos de electrodos más recomendados son; Níquel, Níquel-Hierro o bien Níquel-Hierro-Manganeso. Por lo general, los procesos de más alto grado de depósito son los más apreciados por cuestiones de productividad [8].

Una institución técnica para nomenclatura de electrodos recomendados para esta tarea especifica es identificada como; Sociedad Americana de la Soldadura, por su siglas en inglés AWS, quien tiene su especificación A-5.15. El

Código ASME, Sección II, Parte C adquiere esta misma nomenclatura. Ver Tabla 7.4.

Zonas afectadas por el calor

Debido a que el hierro colado tiene mucho carbono, es extremadamente endurecible, cuando se suelda con electrodos de Níquel, el metal aportado contiene básicamente austenita y en teoría con cualquier razón de enfriamiento no debe haber inconveniente alguno porque dicha fase puede disolver hasta un 2% de carbono [1].

Tabla 7.4. Electrodos recomendados para soldadura de hierros colados (Código ASME, Sección II, Parte C) [14, 16].

Clasificación AWS	Número UNS	C	Mn	Si	P	S	Fe	Ni	Mo	Cu	Al	Otros
(% en peso)												
Electrodos proceso SMAW												
E Ni-CI	W-82001	2	2.5	4	0.03	0.03	8	85 min		2.5	1.0	1.0
E Ni-CI-A	W-82003	2	2.5	4	0.03	0.03	8	85 min		2.5	1.0-3.0	1.0
E NiFe-CI	W-82002	2	2.5	4	0.03	0.03	Bal	45–60		2.5	1.0	1.0
E NiFe-CI-A	W-82004	2	2.5	4	0.03	0.03	Bal	45-60		2.5	1.0-3.0	1.0
E NiFeMn-CI	W-82006	2	10.-14.	1	0.03	0.03	Bal	35-45		2.5	1.0	1.0
E NiCu-A	W-84001	0.35-0.55	2.3	0.75	0.03	0.03	3.0-6.0	50-60		35-45	---	1.0
E NiCu-B	W-84001	0.35-0.55	2.3	0.75	0.03	0.03	3.0-6.0	60-70		25-35	---	1.0
Electrodos proceso FCAW												
E NiFeTa-CI	W-82032	2	3.0-5.0	1	0.03	0.03	Bal	45-60		2.5	1.0	1.0

Sin embargo, la zona afectada por el calor, presenta otra situación muy diferente. Se ha notado el beneficio que hay cuando el hierro contiene ferrita, con esto se reduce la posibilidad de que se formen fases duras, independientemente de la velocidad de soldadura. El tiempo y la temperatura se minimizan con la velocidad y no se da tiempo para la difusión ni para la formación de compuestos, que puedan ocurrir a partir de las inclusiones de

grafito. Así se evitan las bandas de martensita y de carburos en las zonas afectadas por el calor, por otro lado, los hierros que contienen perlita en sus matrices son más susceptibles a formar carburos y martensita revenida, a menos que se utilice un precalentamiento.

Tratamientos térmicos previos y posteriores

Dada la templabilidad y las propiedades mecánicas de un hierro colado es muy conveniente aplicar un precalentamiento, de preferencia por los 315°C (600°F), antes de soldar y seguido de un enfriamiento muy lento. Con lo anterior se pueden reducir las posibilidades de evitar un agrietamiento que se produciría al momento de aplicar el metal de níquel, en el caso de optar por este metal de aporte.

Un tratamiento posterior a la soldadura puede ser aplicado a las piezas, con el fin de mejorar su maquinabilidad, especialmente en la zona afectada por el calor, además de reducir los esfuerzos residuales, que una eventual distorsión pudiera causar. Debido al alto contenido de carbono, la templabilidad es muy alta y, por lo tanto, con el aporte de calor, las posibilidades de una formación martensítica son muy probables y por lo mismo la aparición de una grieta es directamente proporcional.

Consideraciones para el proceso de la soldadura

Es muy necesario tener en cuenta que al reparar un defecto, como en el presenta caso de estudio, se deberá eliminar por medio de maquinado, esmerilado u otro medio similar que elimine la suciedad, grasa, aceite u otro contaminante inorgánico u orgánico.

En el caso de que la pieza este impregnada de aceite, se recomienda un tratamiento térmico de 371-538°C (700-1000°F).

La preparación de la junta debe ser diseñada, con el cuidado del caso, para espesores muy grandes, se requiere de un diseño del tipo “J”, la esencia de esto es, el menor metal de aporte. El amperaje para soldar debe estar de acuerdo con las recomendaciones y de preferencia lo más bajo posible, sin sacrificar la fusión del metal de aporte.

La posición debe ser plana y horizontal, a menos que las piezas requieran de otra posición.

Para el caso de cavidades muy grandes, entendiéndose que son más de tres veces el diámetro del electrodo, se recomienda empezar depositando metal en las paredes e ir cerrando dicha cavidad. Dentro de las posibilidades para la soldadura, se puede optar por un proceso denominado brazing con la utilización de metal de aporte de metal base cobre- zinc.

Es muy probable, que una unión de estos materiales no soporte la pruebas ordinarias de doblez guiado debido a la ductilidad que requiere es muy superior a lo que el hierro gris puede dar. De cualquier modo es necesario evaluar la unión ya sea en forma directa o con piezas testigos.

8

CASOS DE ESTUDIO

REPARACIONES REALIZADAS EN COMPONENTES DE HIERRO GRIS

Entre la información revisada se cuentan algunos artículos de reparación de carcasas fabricadas de acero, aún y cuando el grado de dificultad para reparar un equipo, de estas características, es muy alto, derivado de que es un material fatigado y con tendencia al endurecimiento, el tipo de material es muy diferente con respecto al presente caso a pesar de tener el mismo elemento base.

En un acero el efecto de un tratamiento térmico para mejorar las propiedades mecánicas se ve tan sólo limitado por las dimensiones de la pieza, para acomodarse en un horno, inclusive, un tratamiento aplicado localmente puede ayudar a que la operación tenga un éxito mínimo deseable. Sin embargo, el hierro gris el tratamiento no es efectivo al 100% porque el grafito en exceso requiere de mucho tiempo tan sólo para cambiar su morfología, ya no se diga para formar un compuesto químico, esto hace que inclusive sea más rentable volver a fabricar nuevamente la pieza; para el presente caso, una pieza nueva implica involucrar una fundición que pueda disponer de alrededor de unas 4 toneladas de metal líquido, capacidad para moldear una pieza de forma complicada, esto es incosteable recomendándose adquirir un equipo completo, nuevo con mejores características de desempeño y mejor eficiencia.

Ante el panorama anterior, buscando un incremento en duración, el objetivo del proyecto es establecer un procedimiento que pueda lograr una reparación de una serie de defectos, tales como grietas en un equipo que ha operado por más de 60 años.

CASO DE ESTUDIO No. 1 [7]. Ramos Morales Félix y colaboradores; 2005; Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas; Cuba; Reparación por soldadura de tapas, agrietadas, de hierro fundido.

Del Centro de Investigación en Soldadura de la Universidad de Santa Clara en Cuba, Félix Ramos y colaboradores realizaron, en 2005, un trabajo sobre la reparación de una tapa de hierro gris, perteneciente a un cilindro secador en una planta papelera.

El defecto es una fuga de vapor ocasionada por una grieta, consecuencia del fenómeno de fatiga. El material tiene un alto contenido de fósforo. Para el caso que nos compete, este dato es significativo, ya que influye en la formación de eutécticos que bajan el punto teórico de 1129°C.

La falla ocurre en una reparación anterior con la manifestación de grietas, tanto en la zona afectada como en la parte de aporte de metal, ver Figura 8.1.

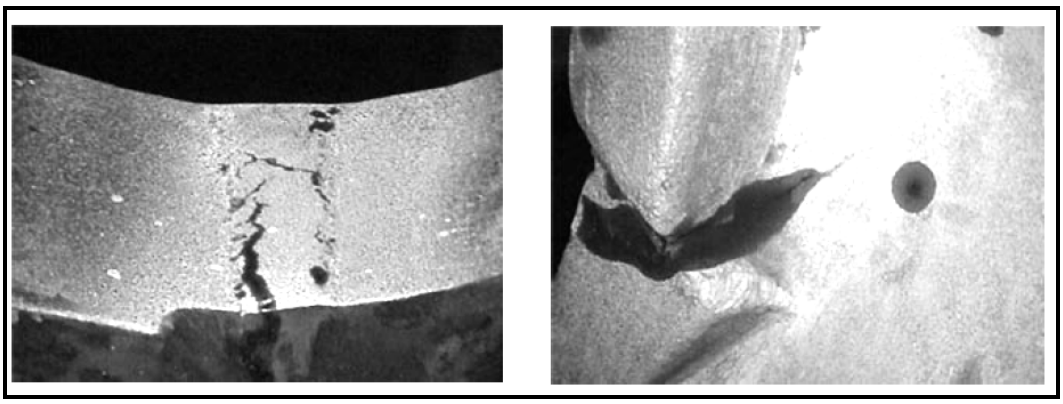


Figura 8.1. Corte transversal de la pieza para mostrar la apariencia de una fractura [7].

En general, la reparación se realiza eliminando la parte que contiene grietas, dándole forma de bisel tipo “U”, para proceder a agregar aporte de base hierro-níquel según AWS E-NiFe-CI con un electrodo de 3.2 mm de diámetro. Ver la Figura 8.2.

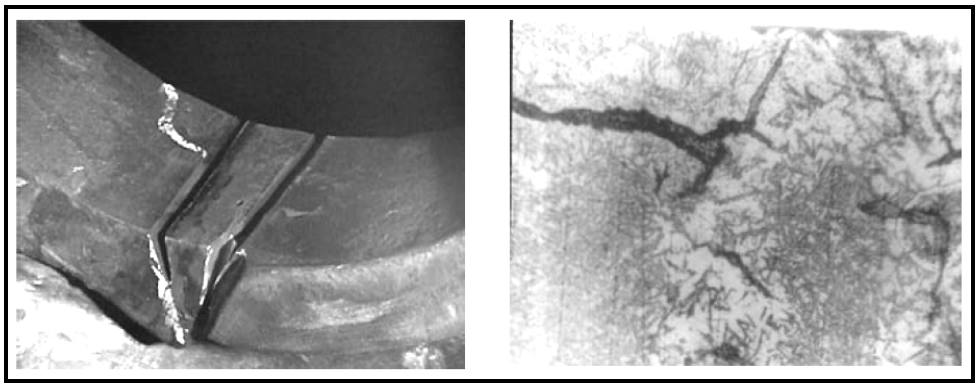


Figura 8.2. Ilustración de la remoción de material previo al deposito de soldadura [7].

El procedimiento de soldadura es con proceso SMAW DCEN, con una corriente de 75-80 A no se especifica el voltaje. Los cordones son de aproximadamente de 30 mm de longitud y martillando continuamente. La acción del martilleo en los cordones reduce la posibilidad de aparición de grietas al enfriarse el cordón. Se ilustra la secuencia de los depósitos en la Figura 9.3.

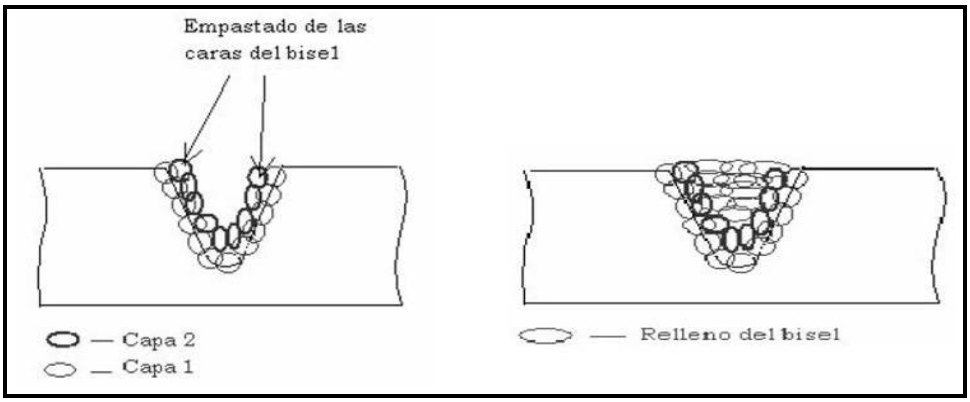


Figura 8.3. Esquema de aplicación de cordones de soldadura en el bisel de la pieza [7].

CASO DE REFERENCIA No. 2 [8]. Unfried Silgado Jimy, Tavares Acevedo Efraín; Universidad Nacional de Colombia; 2004. Soldabilidad de fundiciones grises con materiales de aporte tipo RBCu-Zn-A, ERCuAl-A2 y ERNiFe-CI-A.

Se empleo una probeta de cierto parecido a la que se utiliza para calificar procedimientos de soldadura solo que con un tipo de junta con bisel doble, según la siguiente Figura 8.4.

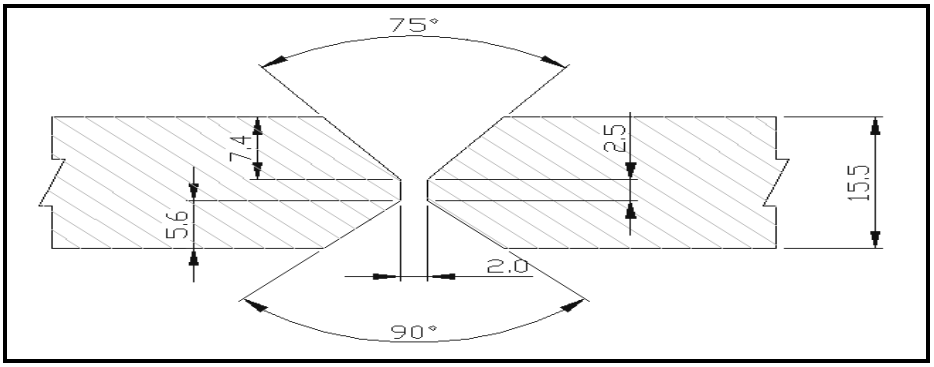


Figura 8.4 Un esquema de doble bisel para soldar la pieza por ambos lados [8].

En el estudio utilizaron de varios tipos de soldadura según se muestra en la siguiente Tabla 8.1:

Tabla 8.1. Variables empleadas en el estudio de soldabilidad de hierro gris [8].

MA	Proceso	Temperatura de precalentamiento	Temperatura del horno durante la aplicación	PWHT
RBCuZn	OFW	500°C	600°C	650°C /2 hr enfriado al aire
ERCuAlA2	SMAW	260°C	320°C	350°C /1 hr enfriado en el horno
ENiFeC1A	SMAW	260°C	320°C	350°C /1 hr enfriado en el horno

En el análisis de resultados, se destaca la disminución en la resistencia a tensión de la unión con la soldadura RBCuZnA, a pesar de los mejores valores de temperatura que se manejaron, siendo el metal de aporte ERCuAlA2 el que presentó el mejor valor.

El ensayo de las pruebas de doblez muestra baja tenacidad del material, sin embargo, es interesante este estudio y seguramente servirá para comparar algunas futuras pruebas.

Es recomendable que durante el proceso de soldadura, sea el mínimo calor de entrada. La caracterización de la microestructura es sintetizada en la siguiente Tabla 8.2.

Tabla 8.2.- Síntesis de los datos de inspección [8].

Matriz metálica predominante :	80% Perlita + Ferrita
Porcentaje Carbono equivalente :	3.45%
Porcentaje de Carbono total :	3.32%
Dureza Brinell :	249 – 255 BHN
Resistencia a la tracción :	33.7 Ksi
Forma de grafito libre :	Tipo B ASTM A-247
Temperatura aproximada fusión:	1300ºC

Una matriz perlítica tiene menos probabilidades en el proceso de soldadura, posiblemente, con el manejo de las temperaturas se logró una buena unión.

CASO DE REFERENCIA No. 3 [9]. Recomendaciones para soldar hierros colados (Guidelines for Welding Cast Iron; 2008: Lincoln Electric).

En seguida se presentan una serie de recomendaciones aplicables al hierro gris.

1.- El hierro colado es muy difícil de soldar, sin embargo, no es imposible, siendo el hierro gris el más común de la familia de los hierros colados.

2.- En la selección de electrodo se recomienda el 99% Ni, en caso de un solo paso, cuando sea necesario utilizar pasos múltiples es recomendable el 55% Ni.

3.- Es recomendable optar por un precalentamiento antes de aplicar la soldadura, en el rango de 260 – 650°C (500 – 1200°F), sin embargo, no debe sobrepasar los 760°C (1400°F), porque el material base llegaría a un rango crítico de transformación, el incremento de la temperatura debe ser lenta y uniforme.

4.- En el caso de requerir hacer una reparación en frío, debe entenderse que esto significa que es una temperatura de alrededor de 100°F. En este caso, se deben realizar depósitos de soldadura muy cortos de 1”, seguido de un martilleo para inducir esfuerzos de compresión que contrarresten la posible aparición de grietas. En esta técnica se debe permitir el enfriamiento sin forzar con aire y menos con agua.

5.- Para el caso de grietas mayores se recomienda una serie de pernos roscados a la superficie biselada, con esto se ayuda a recibir el metal de aporte y se reduce la cantidad de calor aportada.

CASO DE REFERENCIA No. 4 [(10)]. Siewert T. A. and McCowan C. N., NIST; Weld Repair of the U.S. Capitol Dome.

El estudio involucra reparación de hierro gris, donde se reporta una reparación efectuada en el domo del Capitolio en Washington D. C. en lo concerniente a los soportes metálicos de la cubierta exterior, que tienen una antigüedad de más de 140 años y cuya duración se manifiesta en un deterioro, en forma de grietas, en algunos sectores y corrosión en la mayoría de las partes descubiertas. (Ver Figura 9.5).

La determinación del tipo de material, el cual en su mayoría resultó hierro gris de fabricación de la época, esto es, con las limitantes de aquel entonces, siendo

el porcentaje de carbono de 3.39 y 0.60% P. Se hace referencia del contenido de fósforo por la significancia negativa de su presencia en la aleación.

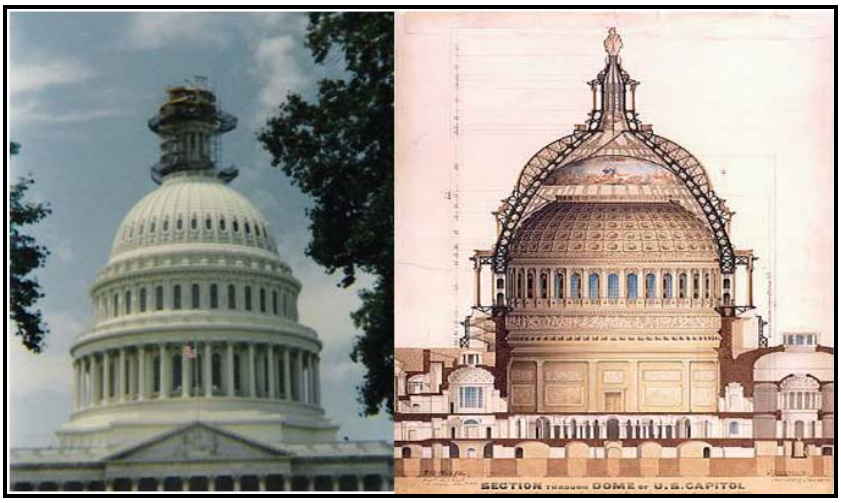


Figura 8.5. Ilustración del Capitolio en Washington D. C. [10].

A continuación, se determinó la microestructura de las partes involucradas encontrando piezas constituidas de ferrita y perlita; además de la morfología y tamaños de las hojuelas. Con los datos obtenidos se estimó las características mecánicas de resistencia a la tensión. Ver Figura 8.6.

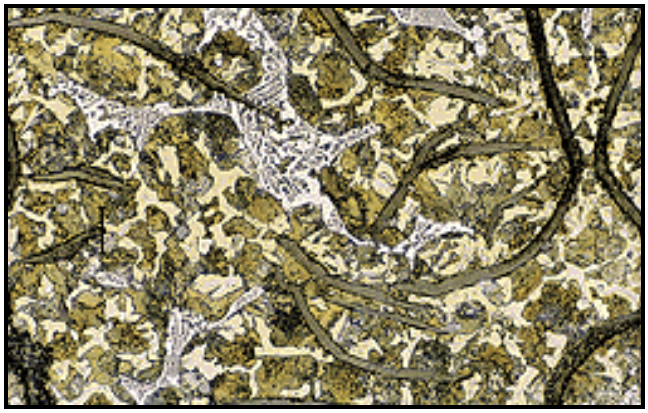


Figura 8.6. Ilustración obtenida para ejemplificar la microestructura, [10].

Posteriormente, el personal de la institución involucrado desarrolló un procedimiento de soldadura para la reparación.

Entre los electrodos evaluados más notables, resultó el base níquel (ENi-CI-A y ENiFe-CI-A), además de las opciones ECuNi (copper- nickel alloy), ENiCu-7. Además el proceso SMAW fue considerado como la opción de proceso de soldadura más recomendable.

Para el presente caso estos datos anteriores tienen un valor significativo aún y cuando la diferencia de magnitud de volumen sea por demás muy grande sirve para indicar una ruta a seguir.

Otro concepto muy interesante y que vale la pena señalar es, la importancia del precalentamiento que, sin lugar a dudas, hace la diferencia entre la funcionalidad del proceso.

CASO DE REFERENCIA No. 5 [11]. ASTM E-756-05. Método de prueba estandarizado para medir las propiedades de materiales en vibración-amortiguamiento (Standard Test Method for Measuring Vibration-Damping Properties of Materials) y Charles Moritz; 2009; Metodologías de prueba en amortiguamiento (Damping Test Methodologies).

Para el presente estudio se reviso el estándar de ASTM E-756-05 por la razón de que es una de las propiedades señaladas como capacidad de amortiguación [4].

La literatura señala que el hierro gris es el mejor material para absorber las vibraciones y disiparlas ya sea mediante calor o por otro medio. Dentro de la investigación se encontró que el estándar antes mencionado es la base para las pruebas de amortiguación.

Los valores que entrega la prueba son diferentes a lo anunciado por el autor Askeland Donald R llegándose a la conclusión de que la gráfica aplica solo para

ciertos materiales específicos. Se asume que el hierro gris es uno de los mejores materiales en absorber las vibraciones por las razones que se mencionaron en el segmento dedicado a las propiedades mecánicas y la razón para revisar el estándar es parte del proceso de investigación.

La carcasa está sujeta a vibraciones y el hecho de que este material tenga capacidad de absorber dicho fenómeno permite que las grietas avancen más despacio que en otro tipo de material, por lo tanto esta situación es de interés para la monografía.

En la investigación de Charles Moritz y colaboradores (2009) durante una exposición auspiciada por SAE International, (Society Automotibe Engeneers) aporta una exposición sobre las pruebas de amortiguamiento que se consideró conveniente para este apartado. Para ilustración de la prueba de amortiguación se presenta las Figuras 8.7 y 8.8.

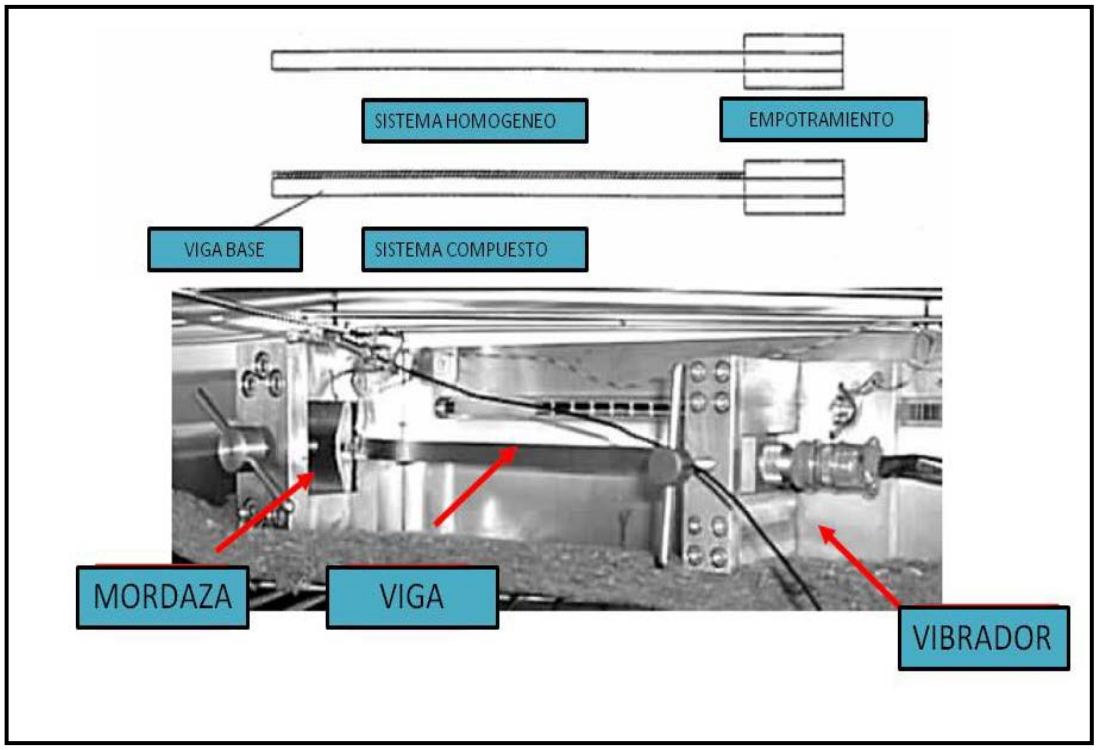
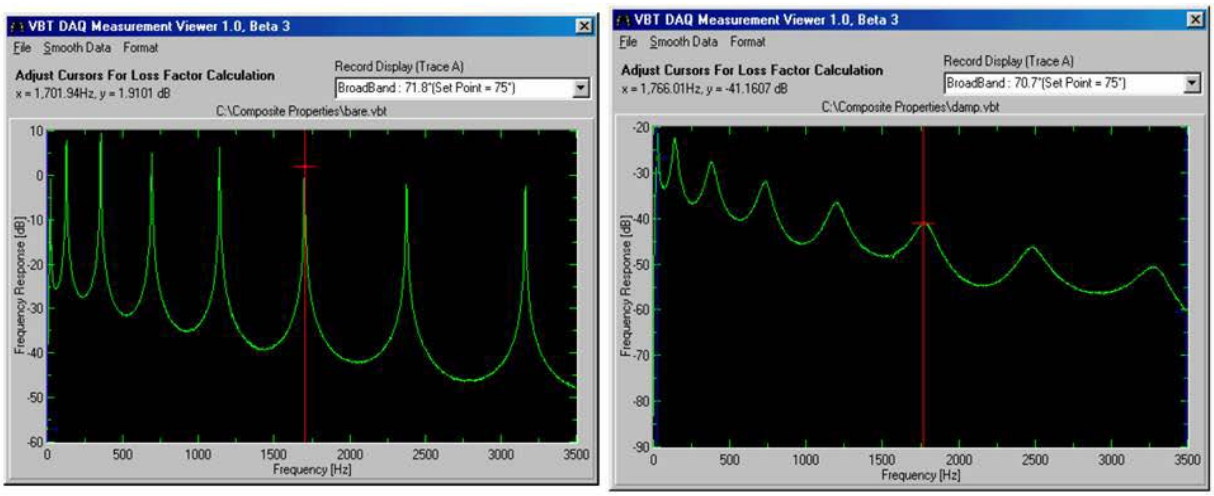


Figura 8.7. Ilustración de la prueba de amortiguamiento SAE J1637/ASTM E-756 [12].



CURVA DE RESPUESTA "FRF" CON BAJO AMORTIGUAMIENTO.

CURVA DE RESPUESTA "FRF" CON ALTO AMORTIGUAMIENTO.

Figura 8.8. Ilustración de las respuestas obtenidas en la prueba de amortiguamiento [12].

CASO DE REFERENCIA No. 6 [13, 15]. N. Stephenson; 1976; Soldadura de fundiciones de alto níquel con grafito en forma de hojuelas y esferoidales (The welding of flake and spheroidal graphite NI-resist castings); Nickel Development Institute, INCO (International Nickel Company).

En la Figura 8.9 se ilustra la manera de preparar las piezas para una reparación con soldadura.

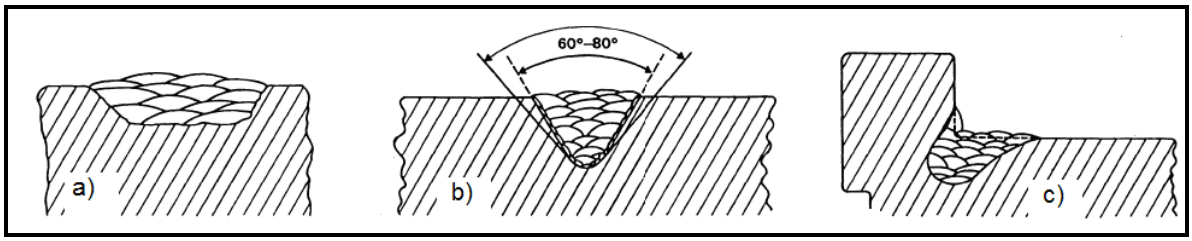


Figura 8.9.- Esquemas recomendados para la reparación de defectos en piezas vaciadas con un contenido alto de carbono (3%) [13].

En el segmento de la izquierda a) para un defecto que esta poco profundo en la parte central de la figura b), defecto relativamente profundo y en la parte c) para defectos en esquinas.

En la Figura 8.10 se presenta la magnitud de los biseles utilizados para unir piezas,

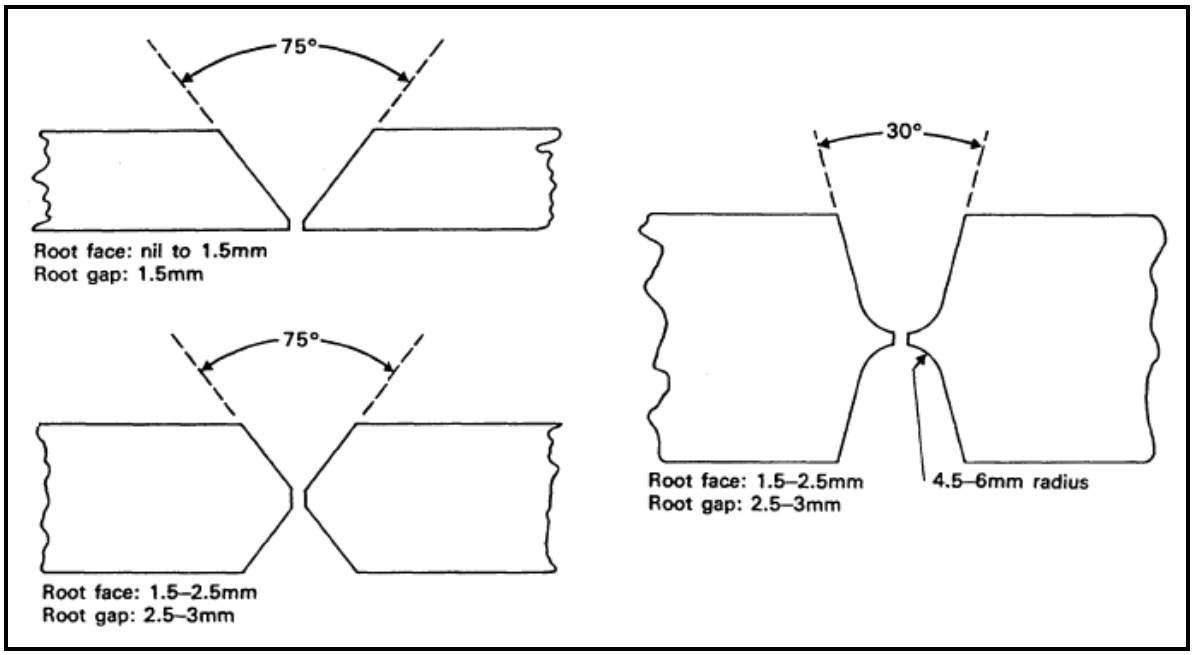


Figura 8.10.- Esquemas recomendados para la unión de piezas vaciadas con un contenido alto de carbono (3%) [13, 15].

El tipo de materiales mencionados en el artículo contiene altos porcentajes de níquel (hasta 30%); se resalta que las hojuelas de grafito presentan mejores propiedades de tenacidad y ductilidad que las del hierro gris, sin embargo, la matriz austenítica tiene menos tolerancia con los elementos de fósforo y azufre y, en el caso de rebasar los límites de 0.04% el riesgo de un agrietamiento en caliente es de altas probabilidades. Además, entre el mismo tipo de estas aleaciones es más fácil de soldar aquellas que tienen cierta tendencia esférica, de la presencia del grafito, que aquellas que presentan la forma de hojuelas, esto en similitud a los hierros grises.

Casos no documentados. Experiencias en centrales de CFE.

***Caso 1**. Carcasa superior de turbina de vapor de CCC Huinalá.*

Los datos y referencias anteriores sirven para establecer los puntos de partida ante una potencial serie de pruebas que pudieran realizarse, a continuación se presenta un par de eventos que no se cuenta con documentación, más bien son testimonios y que vale la pena como aporte técnico.

Una carcasa de turbina, parte superior, fabricada de hierro gris, durante un mantenimiento periódico y en una maniobra de desplazamiento sufrió un impacto en una de las esquinas, con el golpe se desprendió una “astilla”, con lo cual no se podía hacer sello al momento de ensamblar ambas mitades y, por consecuencia, se presentaría una fuga de vapor, lo que ocasionaría una serie de eventos presumibles e indeseables. El caso no presentaba gran dificultad y, se estimaba que no habría complicaciones al momento de aplicar soldadura para recuperar la sección dañada y luego con un maquinado para dejar la superficie lisa totalmente para que se pudiera lograr un sellado.

Las dificultades surgieron derivado de que la soldadura fue rechazada por el metal base, se intentó con electrodos Ni-Cr, conocido como inconel, posteriormente se trató de soldar con electrodos de níquel puro y tampoco funcionó. Técnicamente, no se verificó la dureza y tampoco el tipo de microestructura, ni se hicieron pruebas y el precalentamiento fue, de forma totalmente fuera de cualquier control y la técnica utilizada era como si se quisiera soldar un acero ordinario.

Se intentó con varilla de electrodo E-7018, sin el recubrimiento, este aporte se efectuó con proceso GTAW; el resultado fue de una adherencia, debido a que la altura de espesor requerida era menor a un ¼” se pudo lograr una recuperación del daño.

La pieza finalmente pudo operar porque era cuestión que sólo hubiera un poco de adherencia ya que al ensamblar las partes actuaría una fuerza de compresión entre ambas partes de la carcasa, que permitiría la funcionalidad de la unión.

Caso 2. *Caja de admisión de vapor de una turbina de vapor de C. T. Rosarito.*

Después de haber realizado un mantenimiento programado a una turbina de vapor y a punto de ensamblar la parte superior, se observó un goteo regularmente continuo donde no se visualizaba que existiera algún líquido.

En la inspección visual se detectó una cavidad de origen, como defecto de fabricación, en un sector de admisión de vapor, el defecto permaneció porque siendo una sección de esquina, el espesor remanente soportaba la presión porque el esfuerzo de trabajo del material era a compresión.

El defecto, una cavidad pseudoesférica, ofrecía riesgos a la integridad general y una vez detectado no podía obviarse ni ignorarse, por lo que se procedió a realizar un procedimiento de reparación.

En síntesis, se precalentó la pieza a unos 500°C y se aisló con colcha de asbesto dejando descubierta el área a rellenar y mediante el proceso SMAW, con la participación alternada de dos soldadores se llevó a efecto el relleno utilizando E7018.

Aún y cuando la reparación se llevó a cabo de una manera apresurada las posibilidades de lograrlo exitosamente eran muy buenas, porque el precalentamiento de una masa metálica, muy grande, reducía los esfuerzos desarrollados durante el proceso. Por otro lado, el aislamiento aseguraba que no se presentaría un enfriamiento brusco, con lo que se reducía las posibilidades de agrietamiento y con la aplicación continua se mantenía la temperatura de interpasos. Además, al aplicar el metal líquido, por ser un defecto esférico, la carcasa actuaba como si tan solo estuviera conteniendo el

metal líquido dando oportunidad de formar una liga intermetálica con buenas expectativas.

Tal y como se anuncia antes, este caso no se documentó porque no se hacen pruebas de evaluación ni tampoco de comprobación, esto es, un desarrollo empírico que funciona por situaciones meramente casuales y que, a pesar de esto mismo, funcionan para lo que se desea.

9

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Como desarrollo del presente trabajo se llegó a las siguientes conclusiones:

1. El hierro gris es un material frágil y pobre en propiedades mecánicas, sin embargo, puede vaciarse a menor temperatura en comparación de un acero.
2. Una pieza de hierro gris como es una carcasa, cumple con una función muy importante y por eso merece atención cuando aparece un defecto como lo es una grieta.
3. La reparación por soldadura del material de la carcasa requiere de un procedimiento calificado de soldadura.
4. La condición metalúrgica de la carcasa, implica en gran medida, la diferencia entre el éxito y el fracaso en un intento de reparar agrietamientos.
5. La elección del tipo de proceso de soldadura y del metal de aporte tiene una gran importancia y su selección depende de una metodología que también es elemento clave para lograr una unión exitosa en este material.
6. La aplicación de tratamientos térmicos “pre” y post-soldadura garantizan mejores propiedades microestructurales, evitando fases frágiles indeseables, tales como la formación de carburos y martensita [(20)].

7. Se requiere evaluar, con pruebas no destructivas, antes y después de la reparación.
8. A manera de referencia, en la industria automotriz, para la reparación de monoblocks, que están fabricados de hierro gris, se utiliza un electrodo base Ni, que no requiere “pre” ni post-calentamiento [21].
9. En cuanto a los costos existe un compromiso en la selección de los materiales de aporte, dado el alto costo de los base níquel y la disponibilidad comercial de los base hierro.

RECOMENDACIONES.

A.- EVALUACIÓN PREVIA A LA REPARACIÓN DE LA CARCASA DE TURBINA [2]. [ASM Metals Handbook Vol. 4, Heat Treating, 1998]

La reparación de una pieza de las dimensiones de una carcasa de turbina que contiene defectos identificados como grietas, requiere de una evaluación de ciertas características que no pueden ser obviadas y, para conseguir una operación exitosa, depende de qué tanta exactitud se tenga en el conocimiento de ciertos parámetros, que a continuación se mencionan:

Composición química.

Anteriormente, se ha mencionado que, el material de la carcasa es de hierro gris y ante la eventual necesidad de una recuperación con soldadura, los componentes que forman tal material deben ser conocidos lo más preciso posible. Para la determinación de cada elemento se deben considerar métodos de química analítica con el propósito de que los resultados obtenidos sean lo más exacto posible.

Entonces y por lo anterior, será necesario tomar una muestra en forma de virutas para determinar los elementos principales que a continuación son mencionados.

Carbono

Este elemento, sin lugar dudas es el principal, su valor nos indica en el diagrama de equilibrio, la posición con respecto del punto teórico eutéctico (Ver Figura 9.2) y, por consiguiente, la temperatura de líquidos, además partiendo del evento de que es mayor al 3%, se puede esperar que la microestructura en la pieza se encuentre como hojuelas de grafito, para este caso en particular.

Silicio

El contenido de silicio influye en formación de la morfología del grafito y requiere de cierta cantidad (aprox. 1.5 %) para hacer notar su presencia como agente grafitizante.

Fósforo

Este elemento, considerado como impureza, debido a que afecta negativamente, entre otras influencias, ocasiona una reducción en la temperatura de *líquidus* que afecta al momento de la soldadura.

Cromo

Este elemento incrementa las temperaturas de transformación y forma carburos de cromo, que a su vez, aumentan la dureza, su presencia aumenta la sensibilidad al agrietamiento, puede ocasionar un endurecimiento no deseado que fomente el agrietamiento.

Molibdeno

Al igual que el cromo, mueve en sentido ascendente los puntos de transformación, no es muy formador de carburos y sí incrementa la dureza, por lo general, acentúa el efecto del cromo.

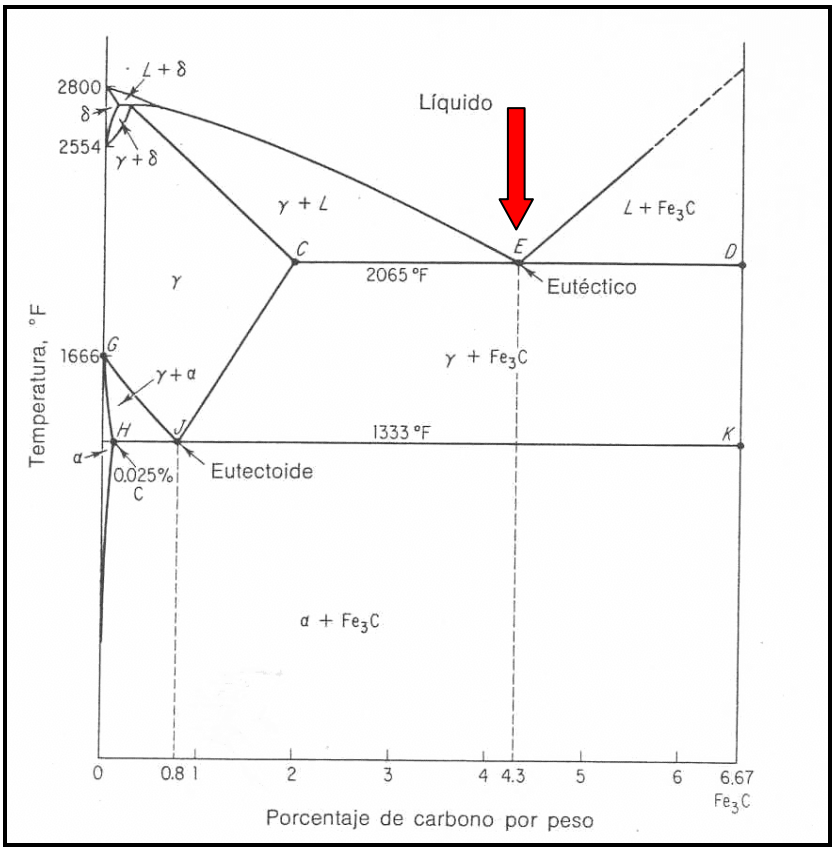


Figura 9.1.- Punto eutéctico del diagrama para resaltar la importancia del contenido de Carbono. [(1)].

<u>Microestructura</u>

Es muy importante conocer ciertos parámetros metalográficos, la morfología del grafito, los contenidos de perlita y ferrita; las posibilidades de soldar con éxito dependen, en gran medida, de conocer los componentes que constituyen la microestructura de la pieza. Es conveniente tener siempre la referencia del diagrama hiero-carbono. Ver Figura 9.1.

A fin de determinar lo anterior y, ante la magnitud de la pieza, deberá aplicarse técnicas especiales en metalografía de campo, sólo que sea posible obtener una sección capaz de producir un espécimen metalográfico; en este caso se sugiere aplicar un analizador de imágenes para obtener los porcentajes de cada fase.

Ferrita

Entre mayor sea la cantidad de ferrita presente, las posibilidad de lograr la unión por soldadura en este material, se incrementan notablemente. Ver Figura 9.2.

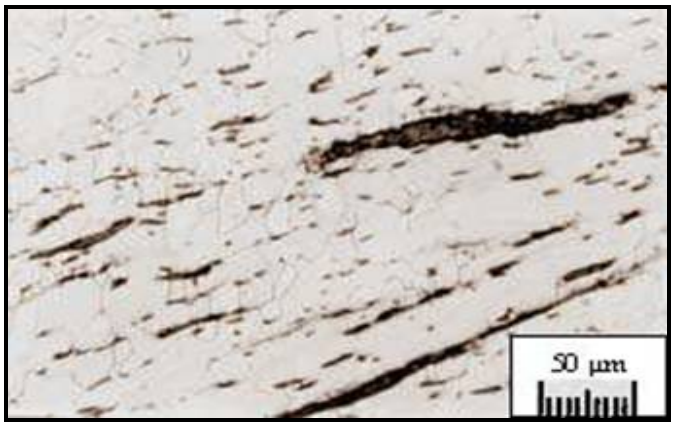


Figura 9.2. Microestructura de un hierro gris que presenta ferrita [2].

Perlita.

Este componente, para una reparación con soldadura se considera adverso y en el proceso de la soldadura, las posibilidades de lograr una unión disminuyen, por eso, su cuantificación es de primordial importancia. Ver Figura 9.3.

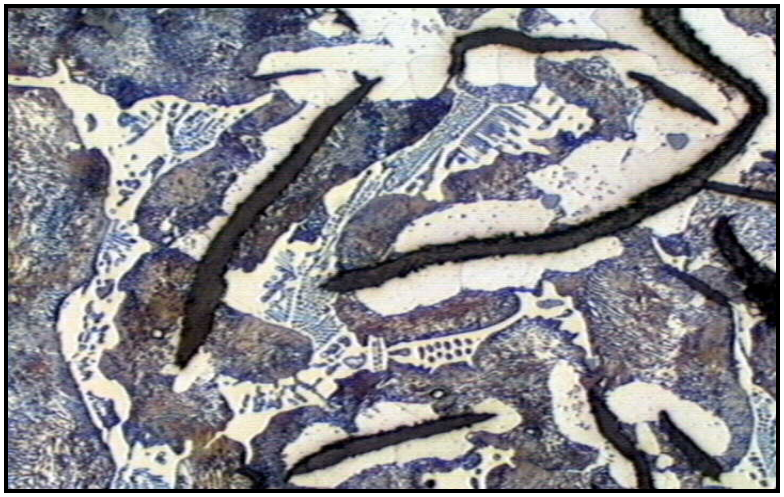


Figura 9.3. Microestructura de un hierro gris que presenta perlita, ferrita y carburos [2].

Cementita.

Este componente es carburo de hierro y su presencia, entre los micro-constituyentes, influye en un aumento del valor de dureza y también la sensibilidad al agrietamiento, esta fase disminuye drásticamente las posibilidades de lograr la unión por soldadura.

Grafito

Este componente es una forma natural de carbono, su morfología influye en las propiedades mecánicas del hierro gris, entre más grande sea el tamaño de las hojuelas de grafito, (Ver Figura 9.4) disminuyen las posibilidades de soldadura.

Figura 9.4. Microestructura de un hierro gris que presenta las hojuelas de grafito [2].

Evaluación de propiedades mecánicas.

Dureza.

Debido a que la pieza está fabricada y no es posible obtener muestras grandes de material, es muy conveniente evaluar, cuando menos, el valor de la dureza como propiedad principal. La dureza proporciona una idea de la resistencia a la tensión, por lo que es muy recomendable determinar el valor de esta propiedad, al incrementarse el valor de dureza, disminuyen las posibilidades de soldar.

Evaluación no-destructiva.

Es muy importante saber con qué defecto es necesario enfrentarse, para el presente caso, es un agrietamiento, sin embargo, sus dimensiones representan el grado de dificultad en la reparación. La posición en la carcasa es muy significativa porque representa cómo entra el soldador para recuperar el defecto.

Una prueba de líquidos penetrantes es rápida y proporciona una idea de la magnitud de una grieta, sin embargo, por ser una técnica de inspección superficial, sus limitaciones quedan en eso y la profundidad es la dimensión más importante. Una inspección con ultrasonido, en acero proporcionará la profundidad de una grieta con un grado de confiabilidad muy alto, sin embargo, en hierro gris, es difícil inspeccionar este material con dicha técnica, aun así es conveniente el intento y el resultado proporcionará una información de utilidad. En el evento de ser inevitable la reparación, se puede ir eliminando la grieta por abrasión y verificando con líquidos penetrantes, esto es muy lento, sin embargo es parte del aseguramiento.

B.- ESTRATEGIAS PARA AUMENTAR LAS POSIBILIDADES DE SOLDAR CON ÉXITO. [14]. (ANSI/AWS D11.2-89, Guide for welding iron castings).

Planeación.

La estrategia primordial será determinar los parámetros, anteriormente mencionados y, de acuerdo con esto elegir la mejor opción disponible. En seguida, el defecto o grieta deberá ser aislada, esto es, dentro de la pieza establecer las dimensiones, ubicación y posteriormente evaluada con técnicas de inspección no destructiva, para determinar su propagación interna. Lo anterior proporciona una idea de la magnitud del defecto y en caso de ser varios defectos de esta especie, así mismo aplica la misma consideración, cabe señalar que la cantidad de defectos y la cercanía entre sí, determina el esfuerzo técnico por recuperar la pieza y sobre todo el costo económico que esto ocasiona.

Una grieta debe ser tratada para evitar que se propague, un modo práctico es redondear los extremos o puntas, tal operación debe ser debidamente elaborada, teniendo presente, que al momento de intentar recuperar por la vía de soldadura, se debe aplicar la cantidad menor posible.

Uso de tratamientos térmicos.

En el evento de que la pieza contenga, en su microestructura, un contenido significativo de perlita o cementita, esto representa una reducción en las posibilidades de soldar, ante esta situación, se puede optar por la aplicación de un tratamiento térmico.

El recocido es recomendable para modificar la microestructura, buscando una transformación de perlita a ferrita y en el caso de que hubiera cementita, buscar la transformación hacia grafito. Respecto a las hojuelas de grafito, estas pueden constituir un obstáculo de encontrarse en forma alargadas, por lo que se busca que adquieran una microestructura nodular o tendiendo hacia lo esférico.

El tamaño de la carcasa influirá en la viabilidad de aplicar un tratamiento térmico, sin embargo, puede hacerse el intento de una modalidad del proceso en forma localizada, la gran masa de la carcasa dificulta el calentamiento y alcanzar la temperatura hasta el valor mínimo puede ser un objetivo difícil de lograr, sin embargo, la habilidad e ingenio serán los elementos que harán la diferencia para soldar una pieza de este tipo.

El precalentamiento es elemental y a una temperatura mayor de lo ordinario, en comparación de un acero, en un inicio se requerirá por arriba de los 300°C.El relevo de esfuerzos para este material es inevitable y es recomendable que se aplique inmediatamente, aunque sea de manera localizado.

Pruebas preliminares de soldabilidad.

Una estrategia indispensable en un evento delicado o con grandes probabilidades de no lograr el objetivo, es probar en muestras antes de llegar hasta la pieza. Una regla implícita es que se puede hacer la reparación con un electrodo de una composición química similar a los contenidos en la carcasa, sin embargo, ante el riesgo de una fragilización, por las dificultades de controlar las temperaturas de interpaso, este intento puede ser muy complicado.

En el caso de hacer el intento con un electrodo de alto níquel, se va a generar una zona de interfase por las diferentes estructuras creadas, cúbica de cara centrada y cúbica de cuerpo centrado (FCC.- “Face Center Cubic, y BCC.-Body Center Cubic), en un material tan frágil, esto puede igualmente llevar a un intento fallido.

Otra situación que debe contemplarse, es la disponibilidad de electrodos, por lo que las pruebas deben concretarse a lo disponible, es muy bueno que entre mas tipos de electrodos que se puedan conseguir, las alternativas ofrecen mejores posibilidades de conseguir éxito.

Es conveniente que las pruebas sean llevadas a cabo en un material lo más similar posible, difícilmente se puede cumplir esto, sobre todo en lo que se

refiere a la fatiga, sin embargo, entre más cercana sea la composición química entre materiales se puede tener información más representativa.

Entre más sencillas sean las probetas se pueden hacer más rápido las evaluaciones, el efecto de masa se ignora bajo esta premisa, sin embargo, es obvio que no es posible la reproducibilidad exacta. La evaluación consiste desde las variables eléctricas de calibración hasta la penetración de la soldadura, además de las temperaturas y la verificación de no aparición de grietas. Es primordial evaluar las temperaturas de tratamientos previos y posteriores e, inclusive, de interpasos. Dado que evaluaciones muy exhaustivas elevan el costo dramáticamente y cada prueba involucra varios estudios, entonces es conveniente un plan de pruebas donde se pueda obtener datos representativos, para esto la inspección metalográfica es imprescindible.

Logística.

En esto se considera todas las instalaciones y equipos necesarios para hacer las maniobras y poder llevar a cabo los intentos de recuperación de la carcasa. En las instalaciones de servicio de la carcasa difícilmente se puede contar con un horno de tratamiento térmico por lo que es muy probable que esta pieza requiera de ser trasladada a instalaciones que sí cuenten con un equipo de esta naturaleza.

Un tipo de horno con plataforma eléctrica es muy recomendable, porque el precalentamiento es inevitable, al extraer la carcasa del horno se puede habilitar una “canastilla” para acercar al soldador, debidamente protegido, y así depositar en forma programada unos cordones de soldadura. Es conveniente tener más de un soldador, las condiciones de soldar son extremas y de un grado de dificultad muy alto.

El proceso de depósito de soldadura es muy lento y en caso de que la carcasa se enfríe es conveniente introducir al horno la carcasa, aunque el efecto de masa puede ayudar a mantener la temperatura.

C.- RECOMENDACIONES PARA EL PROCESO DE SOLDADURA [14]. (ANSI/AWS D11.2-89, Guide for welding iron castings).

Lo que a continuación se menciona son notas sugeridas para enfrentar la problemática de un componente como lo es una carcasa de turbina agrietada, con el propósito de tener éxito en recuperarla con aplicación de soldadura.

El éxito de soldar el hierro gris dependerá de qué tanto se apliquen las técnicas recomendables, los conceptos básicos de metalurgia de soldadura, la ingeniería de materiales y la habilidad de cada soldador que participe en la recuperación de la carcasa.

Preparación del metal base.

En el presente caso de estudio, esto se refiere a la carcasa y las consideraciones son especiales, para una unión con soldadura. Un aspecto inicial es el tipo de junta o preparación para depositar metal líquido, es elemental aplicar la condición del menor aporte posible a depositar. Ver Figura 9.5).

En realidad, la junta resulta de eliminar la grieta, es importante dejar una preparación del tipo “J”, con esto se busca reducir, en lo posible, que no se forme una abertura que requiera de mucho aporte y que en caso de que se profundice el defecto, quede sólo el espacio para maniobrar con el electrodo.

Calor de entrada

El calor de entrada influye directamente en la zona que se afecta por el calor, por lo que las características eléctricas deben ser calibradas para lo menor posible. Otra condición básica es el precalentamiento, debe estar lo más alto

posible del rango de 370-480°C. Esto debe de coincidir con las pruebas previas efectuadas buscando obtener lo siguiente:

a) Facilitar la fusión de la zona aledaña al depósito.

b) Prevenir la formación de grietas por los esfuerzos térmicos.

c) Reducir esfuerzos residuales.

d) Reducir distorsión.

e) Reducir dureza en la zona afectada por el calor.

f) Reducir gradiente de temperatura por espesores de pared.

g) Reducir gradiente de temperatura cuando se aplican materiales disímiles.

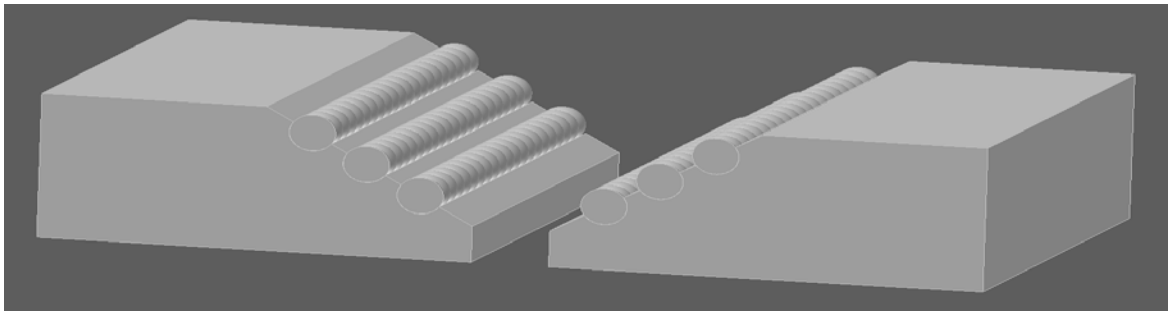


Figura 9.5. Esquema para ilustrar el depósito de los primeros cordones de soldadura [14].

Tratamiento térmico posterior o relevado de esfuerzos

Una vez que se completa la soldadura, se recomienda el relevado de esfuerzos lo más rápido posible con el propósito de lograr lo siguiente:

a) Proporcionar ductilidad a la zona afectada por el calor durante la soldadura.

b) Incrementar maquinabilidad a la soldadura y zona afectada.

c) Descomponer la fase cementita que se forma durante el proceso de soldadura.

d) Transformar la martensita que se forme en una fase menos frágil.

e) Relevar de esfuerzos residuales.

Para el presente caso se tiene las opciones siguientes según lo que se quiera obtener.

a) Cuando se requiere reducir parcialmente la dureza obtenida en alrededor de un 30%: 480°C seguido de un enfriamiento en aire quieto.

b) Cuando se requiere reducir la dureza en un 50%: 590°C seguido de un enfriamiento en aire quieto.

c) Cuando se requiere de máxima suavidad posible. 900°C seguido de enfriamiento dentro del horno.

Proceso de soldadura recomendable.

Cada proceso implica ventaja y en contraparte situaciones no favorables; se insiste una vez más que; la elección del proceso depende de las pruebas realizadas tal y como se mencionó en capítulo anterior.

El proceso OFW permite una temperatura de flama que es menor a la que se genera en un arco eléctrico. Esto en cierta medida puede ser ventaja si no se quiere afectar una gran zona aledaña, para reducir posibilidades de que al momento de un arco eléctrico se genere un agrietamiento o bien para los primeros pasos de soldadura o conocido como fondeo.

En caso de optar por un proceso de arco eléctrico se recomienda GTAW, esto es un arco con electrodo de tungsteno y aporte de metal. Es posible utilizar un proceso SMAW, solamente que; el riesgo de un agrietamiento se incrementa, se puede recomendar que para efectos de cerrar o rellenar la abertura una vez que existe suficiente material depositado de pared que soporte las dilataciones y que exista la seguridad de que la pieza base soportará el metal depositado.

Electrodo o metal de aporte

La elección del metal de aporte también deberá ser marcada por las pruebas que se hayan realizado y se pueden considerar tres grupos de electrodos para el aporte de metal en la recuperación:

a) Electrodos de hierro gris.- Presentan una composición química con cierta similitud y cumple la regla de aportar mismos elementos químicos para asegurar la afinidad.

El riesgo que se puede presentar al usar este tipo de electrodo; es el endurecimiento que se puede producir al descuidar las temperaturas de precalentamiento, interpaso o bien al no aplicarse el relevado de esfuerzos. En el metal base, que corresponde a la carcasa, existe un tipo de microestructura formado originalmente dentro de ciertas condiciones por el proceso de vaciado y que dicha microestructura ha sido modificada por el tiempo en operación, esto genera un riesgo porque el carbono puede estar contenido en tres estructuras, perlita, cementita ó grafito y realmente se encuentra en una proporción de cada una de las tres. Al tener diferentes propiedades mecánicas es a lo que se refiere con el riesgo de que no se consiga la liga metalúrgica lo cual significa una segregación y de manera física una grieta de solidificación.

b) Electrodos base níquel

Este tipo de electrodos tiene una cualidad de que al ser de microestructura austenítica con la capacidad de disolver mayor cantidad de carbono y con mejor ductilidad, es una opción con buenas posibilidades de lograr una liga metalúrgica que soporte la unión.

La situación que pudiera hacer la diferencia es la interfase que se formaría de un material ferrítico hacia un austenitico, sin embargo, la opción en viable y depende mucho de la combinación de microconstituyentes presentes en el metal base.

c) Electrodos base cobre.

Este grupo de electrodos es empleado dentro del proceso brazing, en el cual se emplean temperaturas mayor a 480°C y menor al punto de fusión del metal base, utilizando el principio de capilaridad. Esta opción es buena como recuperación de defectos relativamente pequeños y para carcasas donde sólo se quiere rellenar de material para que la integridad reduzca las posibilidades de que el defecto crezca. Se debe tener en cuenta que las propiedades mecánicas a tensión no son favorables, sin embargo, en ciertas condiciones se puede aprovechar la capilaridad.

Pruebas recomendadas de soldabilidad.

En AWS D-11.2, apéndice A, se ha tomado el diagrama para fabricar probetas recomendables para pruebas preliminares a fin de evaluar temperaturas de precalentamiento y encontrar lo más óptimo a fin de evaluar la compatibilidad de un metal de aporte con probetas de hierro gris y variando parámetros de la maquina de soldar. Ver Figura 9.6.

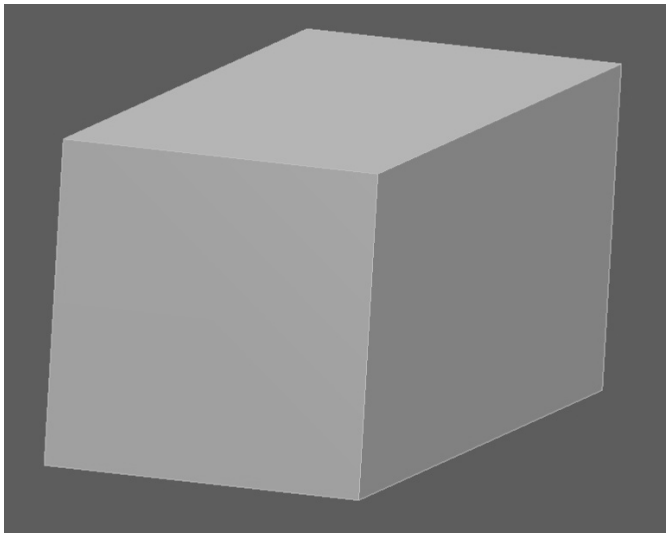


Figura 9.6. Esquema de bloque 3”x3”x6” que recomienda AWS D-11.2 Apéndice A.

Las condiciones de soldadura recomendadas por AWS D11.2 se enlistan a continuación:

Proceso: GTAW.	Voltaje: 14 Volts.
Corriente: 250 Amperes.	Polaridad: DCEN.
Velocidad: 33 cm/min.	Electrodo Tungsteno: 5/32” Ø
Técnica de inicio: Alta frecuencia.	Calor de entrada: 6.3 kJ/cm.
Gas de protección: Argón 1132 dm^3/h.	Temp. Precalentamiento: 650°C.

Las pruebas incluyen la posibilidad de evaluar depósitos de soldadura empleando electrodos que se encuentren disponibles en el mercado con la intención de ver la afinidad en las interfases que se van a formar y el efecto de la temperatura y un post- tratamiento para mejorar la liga intermetálica.

10

BIBLIOGRAFÍA

1) Avner Sidney, (1988); Introducción a la metalurgia Física, segunda edición, Libros Mcgraw Hill de Mexico S. A. de C. V.; México D. F., República Mexicana; pp 329- 358 y pp 420- 454.
2) ASM, Metals Handbook, Vol. 4, Heat Treating, 9ª. Edicion, (1998); Metals Park, Ohio, U. S. A; pp 529-542.
3) Kou Sindo, (2003); Welding Metallurgy, second edition, Wiley interscience, a John Wiley & Sons, Inc. Publication; Hoboken, New Jersey, USA, pp 122-137.
4) Askeland, Donald R & Phulé Pradeep P. (2004); Ciencia e Ingeniería de los Materiales, 4a edición, International Thompson Editores, S. A. de C.V; México D. F. República Mexicana; pp 349-351.
5) ASM, Metals Handbook, Vol. 1, Properties and Selection: Irons and Steels, 9ª. Edition, (1988); Metals Park, Ohio, U. S. A; pp 11-32.
6) Canadian Welding Asociation, Journal Fall 2005, Welding Cast Iron, www.cwa-acs.org.
7) Ramos Morales Félix, Juan A. Pozo Morejón, Eduardo M. Díaz Cedré, Enrique Velásquez Pérez, Alexis Maza Sánchez, Ómar García Manresa, Alejandro Duffus Scott; Centro de Investigaciones de Soldadura;.

Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas; Cuba; 2005; Reparación por soldadura de tapas, agrietadas, de hierro fundido.

8) Unfried Silgado Jimy, Tavares Acevedo Efrain; Soldabilidad de Fundiciones Grises con Materiales de Aporte tipo RBCu-Zn-A, ERCuAl-A2 y ERNiFe-CI-A; 2004; Universidad Nacional de Colombia.
9) Guidelines for Welding Cast Iron; 2008: Lincoln Electric.
10) Siewert T. A. and McCowan C. N., National Institute for Standards and Technology; R. A. Bushey, J. Doherty, and T. Christ, ESAB Welding and Cutting Products; D. J. Kotecki, Lincoln Electric Corp; D. L. Olson, Colorado School of Mines; L. W. Myers, Jr. Consultant (formerly with Dresser Rand Co.); E. Hinshaw and S. Kiser, Special Metals Inc.; 2002, Weld Repair of the U.S. Capitol Dome.
11) ASTM E-756-05.-Standard Test Method for Measuring Vibration-Damping Properties of Materials.
12) Moritz Charles, Blachford Inc.Tom Lewis, Damping Technologies, Inc. Richard Fridrich, Fridrich Acoustical Consulting; 2009; Damping Test Methodologies.
13) N. Stephenson; 1976; Nickel Development Institute, INCO; The welding of flake and spheroidal graphite NI-resist castings; publication 4421.
14) ANSI/AWS D11.2-89, Guide for welding iron castings.
15) Makar J. M; McDonald S. E; Mechanical behavior of spun-cast gray iron pipe; Institute for research in construction; National Research Council Canada; http://irc.nrc-cnrc.gc.ca.
16) ASM, Metals Handbook, Vol. 6, Brazing, Welding and Soldering (1993), Metals Park, Ohio, USA, pp 307-318.
17) ASTM, VOL. 01.02, EDICION 1988, A-327.- Standard Test Methods for Impact Testing of Cast Irons.
18) Mangonon Pat, (2001); Ciencia de Materiales, Selección y Diseño, Primera edición, Pearson Educación México; México D. F. República Mexicana; pp 512-535.

19) Higgins Raymond, (1984); Ingeniería Metalúrgica, Tomo 1, 11ª. Impresión, Compañía editoria continental; México D. F., República Mexicana; pp 283 – 298.

20) Marines Pedro (2007); Estudio de recuperación de piezas de hierro nodular con diferentes materiales de aporte por soldadura SMAW, COMIMSA.

21) Bustos J. Antonio (2006); Recuperación de monoblock de hierro gris mediante soldadura, COMIMSA.

11

LISTA DE FIGURAS Y TABLAS

Figura 4.1	Etapas de generación termoeléctrica.	6
Figura 4.2	Cambio de energías para producir electricidad.	7
Figura 4.3	Carcasa de turbina parte inferior.	8
Figura 5.1	Agrietamiento en una carcasa de turbina de vapor.	12
Figura 5.2	Ilustración de una grieta en la caja de admisión de vapor de Turbina.	13
Tabla 5.1	Centrales de generación de electricidad con equipos fabricados de hierro gris.	14
Tabla 7.1	Rangos de la composición química típica de los Hierros colados más comerciales.	17
Figura 7.1	Sección del diagrama de equilibrio Hierro Carbono para representar aceros y hierros colados.	20
Figura 7.2	Hojuelas de grafito en el hierro gris durante el proceso de solidificación.	22
Figura 7.3	La forma influye en el tamaño de las hojuelas de grafito en el hierro gris.	22
Figura 7.4	Grafica de un ensayo a tensión de una probeta de hierro	23

	gris.	
Figura 7.5	Grafica del valor de Poisson contra la resistencia a tensión.	24
Figura 7.6	Grafica de la relación entre los esfuerzos de compresión y tensión.	25
Figura 7.7	Relación entre el amortiguamiento y el esfuerzo a tensión en el hierro gris.	26
Tabla 7.2	Principales tratamientos térmicos aplicables al hierro gris.	28
Figura 7.8	Gráfica de tratamientos térmicos de los recocidos en hierro gris.	30
Figura 7.9	Grafica de tratamiento térmico de normalizado en el hierro gris.	32
Figura 7.10	Grafica de los tratamiento térmicos de temple y revenido en hierro gris.	33
Figura 7.11	Gráfica de los tratamientos isotérmicos en hierro gris.	35
Figura.7.12	Ilustración del fenómeno de la fatiga.	38
Figura 7.13	Ejemplos de graficas de ensayos a fatiga.	39
Figura 7.14	Grafico de pruebas de fatiga para hierro gris (ASM, Volume 1, 1988).	40
Figura 7.15	Curva de esfuerzo de tensión contra temperatura del hierro gris.	40
Figura 7.16	Esquema de una prueba de ensayo a fatiga.	41
Figura 7.17	Grafica de termofluencia.	41
Tabla 7.4.	Electrodos recomendados para soldadura de hierros colados.	44
Figura 8.1	Corte transversal de la pieza para mostrar la apariencia de una fractura.	48

Figura 8.2	Ilustración de la remoción de material previo al deposito de soldadura.	49
Figura 8.3	Esquema de aplicación de cordones de soldadura en el bisel de la pieza.	49
Figura 8.4	Un esquema de doble bisel para soldar la pieza por ambos lados.	50
Tabla 8.1	Síntesis de las variables empleadas durante este caso de referencia.	51
Tabla 8.2	Síntesis de los datos de inspección.	52
Figura 8.5	Ilustración del Capitolio de Casa Blanca, Washington D.C.	53
Figura 8.6	Ilustración obtenida para ejemplificar la microestructura de referencia al artículo en cuestión.	53
Figura 8.7	Ilustración obtenida para ejemplificar la prueba de amortiguamiento.	55
Figura 8.8	Ilustración de las respuestas obtenidas en la prueba de amortiguamiento.	56
Figura 8.9.	Esquemas recomendados para la reparación de defectos en piezas vaciadas con un contenido alto de Carbono (3%).	56
Figura 8.10	Esquemas recomendados para la unión de piezas vaciadas con un contenido alto de Carbono (3%).	57
Figura 9.1	Punto eutéctico del diagrama para resaltar la importancia del contenido de Carbono.	64
Figura 9.2	Microestructura de un hierro gris que presenta ferrita.	65
Figura 9.3	Microestructura de un hierro gris que presenta Perlita.	65
Figura 9.4	Microestructura de un hierro gris que presenta las hojuelas de grafito.	66
Figura 9.5	Esquema para ilustrar el depósito de los primeros cordones	73

	de soldadura.	
Figura 9.6	Esquema de bloque 3”x3”x6” que recomienda AWS D-11.2 Apéndice A.	77