



Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Estudios de Postgrado  
Maestría en Ingeniería del Mantenimiento

**RECONSTRUCCIÓN Y/O REPARACIÓN DE PIEZAS DE FUNDICION  
GRIS, POR MEDIO DE SOLDADURA AL ARCO (SMAW)**

**Byron José Bonilla Chang**

Asesorado por el Dr. Sc. Ing. Roberto Aguilar Rivas

Guatemala, noviembre de 2015



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**RECONSTRUCCIÓN Y/O REPARACIÓN DE PIEZAS DE FUNDICIÓN  
GRIS, POR MEDIO DE SOLDADURA AL ARCO (SMAW)**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**BYRON JOSÉ BONILLA CHANG**

ASESORADO POR EL DR. SC. ING. ROBERTO AGUILAR RIVAS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**MAESTRO EN INGENIERÍA DE MANTENIMIENTO**

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2015



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Ángel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Cristian de León Rodríguez
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Raúl Eduardo Ticún Córdova
VOCAL V	Br. Henry Fernando Duarte García
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. Ángel Roberto Sic García
EXAMINADOR	Ing. César Augusto Akú Castillo
EXAMINADOR	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Pedro Miguel Agreda Girón
SECRETARIA	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez





FACULTAD DE  
INGENIERÍA - USAC  
**EP**  
ESCUELA DE  
ESTUDIOS DE POSTGRADO

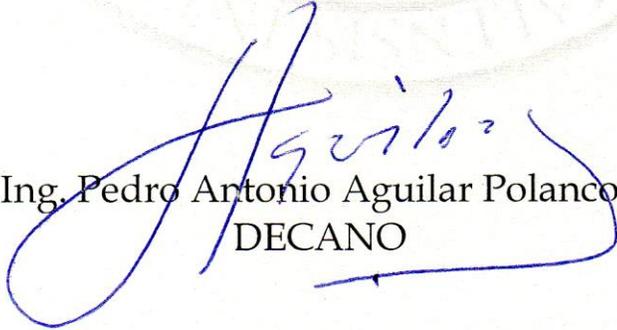
Escuela de Estudios de Postgrado  
Facultad de Ingeniería  
Teléfono 2418-9142 / Ext. 86226

Ref. APT-2015-048

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Postgrado, al Trabajo de Graduación de la Maestría en Ingeniería de Mantenimiento titulado: **"RECONSTRUCCIÓN Y/O REPARACIÓN DE PIEZAS DE FUNDICIÓN GRIS, POR MEDIO DE SOLDADURA AL ARCO (SMAW)"** presentado por el Ingeniero Mecánico **Byron José Bonilla Chang**, procede a la autorización para la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

*"Id y Enseñad a Todos"*

  
Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco  
DECANO

Guatemala, Noviembre de 2015.







FACULTAD DE  
INGENIERÍA - USAC  
ESCUELA DE  
ESTUDIOS DE POSTGRADO

Escuela de Estudios de Postgrado  
Facultad de Ingeniería  
Teléfono 2418-9142 / 24188000 Ext. 86226

APT-2015-048

El Director de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen y dar el visto bueno del revisor y la aprobación del área de Lingüística del Trabajo de Graduación titulado **"RECONSTRUCCIÓN Y/O REPARACIÓN DE PIEZAS DE FUNDICIÓN GRIS, POR MEDIO DE SOLDADURA AL ARCO (SMAW)"** presentado por el Ingeniero Mecánico **Byron José Bonilla Chang**, correspondiente al programa de Maestría en Ingeniería de Mantenimiento; apruebo y autorizo el mismo.

*"Id y Enseñad a Todos"*

MSc. Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos

Director

Escuela de Estudios de Postgrado



Guatemala, Noviembre de 2015.

Cc: archivo  
/la





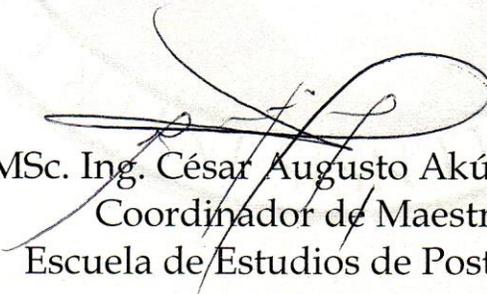
FACULTAD DE  
INGENIERÍA - USAC  
**EP**  
ESCUELA DE  
ESTUDIOS DE POSTGRADO

Escuela de Estudios de Postgrado  
Facultad de Ingeniería  
Teléfono 2418-9142 / 24188000 Ext. 86226

APT-2015-048

Como Coordinador de la Maestría en Ingeniería de Mantenimiento y revisor del Trabajo de Graduación titulado **"RECONSTRUCCIÓN Y/O REPARACIÓN DE PIEZAS DE FUNDICIÓN GRIS, POR MEDIO DE SOLDADURA AL ARCO (SMAW)"** presentado por el Ingeniero Mecánico **Byron José Bonilla Chang**, apruebo y recomiendo la autorización del mismo.

"Id y Enseñad a Todos"

  
MSc. Ing. César Augusto Akú Castillo  
Coordinador de Maestría  
Escuela de Estudios de Postgrado



Guatemala, Noviembre de 2015.

Cc: archivo  
/la



## **AGRADECIMIENTOS A:**

<b>Dios</b>	Por su infinita misericordia, darme la vida, y por su voluntad, la oportunidad para cumplir una meta más de mi vida. A Él sea la gloria y la honra.
<b>Mi familia</b>	Por el amor, paciencia, consejos, apoyo incondicional y motivación en todas las etapas de mi vida.
<b>Dr. Roberto Aguilar Rivas</b>	Por el apoyo, consejos y el compartir sus conocimientos en este proceso.
<b>Ing. Hugo Ramírez</b>	Por su aporte y colaboración en la elaboración de este proyecto.
<b>Milton Morales</b>	Por su amistad y colaboración en el proyecto.





1.2.4.	Fundición nodular.....	11
1.3.	Soldabilidad del hierro fundido.....	13
1.3.1.	Problemas comunes en soldadura de fundiciones de hierro .....	15
1.3.2.	Efectos del carbono en la soldadura.....	17
1.4.	Zona afectada por el calor (ZAC).....	18
2.	SOLDABILIDAD DE LA FUNDICIÓN GRIS.....	21
2.1.	Electrodos para el proceso SMAW.....	22
2.2.	Temperaturas para el proceso de soldeo.....	24
2.3.	Temperaturas de precalentamiento.....	25
2.4.	Tratamiento térmico post-soldadura.....	27
3.	DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN.....	29
3.1.	Identificación del material base.....	29
3.1.1.	Ensayo de chispa.....	29
3.1.2.	Ensayo metalográfico.....	33
3.1.2.1.	Fundición gris.....	34
3.1.2.2.	Fundición nodular.....	34
3.1.3.	Ensayo de dureza.....	37
3.1.3.1.	Fundición gris.....	37
3.1.3.2.	Fundición nodular.....	38
3.2.	Procedimientos de muestreo y realización de probetas para el análisis de la fundición de hierro.....	38
3.2.1.	Fundición gris.....	38
3.2.2.	Fundición nodular.....	39
3.3.	Procedimientos estudiados de soldadura en fundiciones de hierro.....	41
3.3.1.	Método convencional.....	43

3.3.2.	Método propuesto.....	43
4.	PROCESO EXPERIMENTAL.....	47
4.1.	Ensayos de soldadura.....	47
4.2.	Ensayos de dureza.....	49
5.	RESULTADOS.....	51
5.1.	Fundición gris.....	51
5.2.	Fundición nodular.....	53
5.3.	Ensayos metalográficos.....	56
6.	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	59
7.	CONSIDERACIONES PARA SELECCIÓN DEL MÉTODO.....	73
7.1.	Temperatura.....	73
7.2.	Material de aporte.....	74
7.3.	Forma de aplicación.....	75
8.	METODOLOGÍA SELECCIONADA PARA LA SOLDADURA EN FUNDICIONES DE HIERRO, POR MEDIO DE SOLDADURA AL ARCO (SMAW).....	77
	CONCLUSIONES.....	81
	RECOMENDACIONES.....	83
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	87



## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1.	Diagrama de Equilibrio Fe-Fe <sub>3</sub> C.....	2
2.	Gráfica Fundiciones-Carburo de hierro.....	3
3.	Diámetro vs. resistencia a la tracción de grados de fundición gris.....	7
4.	Tipos de fundición gris.....	9
5.	Tipos de fundición gris según la ASTM A247.....	10
6.	Fundición nodular.....	12
7.	Fundiciones de acero, blanca, gris y maleable.....	13
8.	Representación microestructural de la (ZAC) en soldadura de fundición de hierro.....	16
9.	Solidificación de metales.....	19
10.	Esquema de temperaturas y zonas en fundición gris típica.....	22
11.	Dureza de materiales de aporte en soldadura de fundiciones.....	24
12.	Efecto del carbono equivalente en temperatura de fractura para grados distintos de fundiciones.....	26
13.	Diferentes tipos de fundición.....	30
14.	Comparación haz de chispas.....	31
15.	Ensayo de chispa.....	32
16.	Micrografía del metal base, fundición gris, aumento de 100X.....	36
17.	Micrografía del metal base, fundición nodular, aumento de 100X.....	36
18.	Efectos del pulido en húmedo.....	37
19.	Probetas de fundición gris.....	39
20.	Dimensiones de probeta fundición nodular.....	39
21.	Biselado de probeta.....	40

22.	Diagrama de Graville.....	41
23.	Nomograma de Coe.....	42
24.	Preparación de bordes del cordón de soldadura.....	44
25.	Curvas de dureza fundición gris con ENiFeCl.....	52
26.	Curvas de dureza fundición gris con ENiCl.....	53
27.	Curvas de dureza a partir del cordón de soldadura ENiFeCl fundición nodular.....	55
28.	Curvas de dureza a partir del cordón de soldadura ENiCl fundición nodular.....	56
29.	Micrografía de resultados fundición gris aumento de x100.....	57
30.	Micrografía de resultados fundición nodular aumento de x100.....	58
31.	Efectos de baja temperatura de precalentamiento ( $\leq 200^{\circ}\text{C}$ ).....	60
32.	Efectos de temperaturas de precalentamiento mayores a los $300^{\circ}\text{C}$ ..	60
33.	Superficies de cordón de soldadura generadas con electrodo ENiCl con exceso de temperatura $> 300^{\circ}\text{C}$ .....	63
34.	Curvas características con las diferentes temperaturas de trabajo.....	64
35.	Efectos de baja temperatura de precalentamiento ( $200^{\circ}\text{C}$ ).....	66

## TABLAS

I.	Clasificación de grados de fundición gris.....	7
II.	Electrodos para soldadura de hierros fundidos.....	23
III.	Clasificaciones de fundición dúctil, según ASTM A-536-77.....	35
IV.	Ensayos de dureza; material de aporte: ENiFeCl fundición gris.....	51
V.	Ensayos de dureza; material de aporte: ENiCl fundición gris.....	53
VI.	Ensayos de dureza a partir del cordón de soldadura; distancia: 2.5mm, material de aporte: ENiFeCl fundición nodular.....	54
VII.	Ensayos de dureza a partir del cordón de soldadura; distancia: 2.5mm, material de aporte: ENiCl fundición nodular.....	55

## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
<b>CE</b>	Carbono equivalente
<b>C</b>	Carbono
<b>°C</b>	Grado Celsius
<b>cm</b>	Centímetro
<b>Cr</b>	Cromo
<b>Cu</b>	Cobre
<b>END</b>	Ensayo no destructivo
<b>°F</b>	Grado Fahrenheit
<b>mm</b>	Milímetro
<b>Mn</b>	Manganeso
<b>Mo</b>	Molibdeno
<b>MPa</b>	Mega pascales
<b>MPSI</b>	Mega PSI (pounds-force per square inch/ Libra-fuerza por pulgada cuadrada)
<b>Ni</b>	Níquel
<b>P</b>	Fosforo



## GLOSARIO

<b>Aleaciones de Monel</b>	Aleaciones níquel- cobre
<b>ASTM</b>	Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (American Society for Testing and Materials)
<b>Austenita</b>	Forma en la que se hace referencia a la estructura cristalina cúbica de caras centradas en las aleaciones hierro-carbono.
<b>AWS</b>	Asociación americana de soldadura (American Welding Society)
<b>Colada</b>	En metalurgia, se denomina así al proceso de vaciado de metales en estado líquido, o fundidos, en moldes especiales, con el fin de obtener del metal formas terminales en estado sólido, para su utilización práctica.
<b>CE</b>	Carbono equivalente. Medida técnica de una aleación hierro-carbono, en la que cierta relación de los otros componentes de la misma, más el contenido específico del carbono, proporciona una cantidad equivalente a un acero al carbono.

<b>DIN</b>	Instituto Aleman de Normalización (Deutsches Institut für Normung)
<b>END</b>	Ensayos no destructivos, o ensayos que se realizan sobre piezas, por ejemplo metálicas, con el fin de encontrar fallas o defectos en las mismas.
<b>Efecto de sobrefusión</b>	Llamado sobrefusión o exceso de fusión, en una soldadura. Consiste en un defecto generado en la zona de unión entre el material de aporte con el metal base, debido al exceso de calor aplicado en los procesos de soldeo. Esto es más significativo, principalmente, en la unión de placas de poco espesor.
<b>Ferrita</b>	Forma en la que se hace referencia a la estructura cristalina cúbica de cuerpo centrado en las aleaciones hierro-carbono.
<b>HB</b>	Escala de medición de dureza en unidades Brinel (Hardness Brinell).
<b>HRC</b>	Escala de medición de dureza en unidades Rockwell (Hardness Rockwell C).
<b>Maquinabilidad</b>	Propiedad de los materiales para ser mecanizados (dándole la forma deseada) por medio de arranque de viruta.

<b>Martensita</b>	Es una estructura inestable de las aleaciones hierro-carbono, de forma acicular, obtenida por la transformación de la fase austenita durante un enfriamiento rápido. Se caracteriza por su alta dureza y gran fragilidad.
<b>NITAL</b>	Solución de alcohol y ácido nítrico, comúnmente utilizado para el ataque químico de los aceros o fundiciones, con el fin de observar su estructura cristalina, por ejemplo: ferrita, cementita, perlita, austenita, martensita, bainita. Etc.
<b>ISO</b>	Organización internacional de normalización (International Organization for Standardization).
<b>AWWA</b>	Asociación de obras acuáticas americana (American Water Works Association).
<b>SAE</b>	Sociedad de Ingenieros Automotrices (Society of Automotive Engineers).
<b>SMAW</b>	Proceso de soldadura al arco con electrodo revestido o protegido (Shield metal arc welding).
<b>Soldeo</b>	Acción de soldar.
<b>Vermiculita</b>	Grupo de minerales hidratados laminares formado por los silicatos de aluminio y hierro-magnesio, con elevado valor de aislamiento térmico, acústico y

capaz de absorber una amplia gama de líquidos; utilizado en productos de construcción, alimentos para animales, horticultura y aplicaciones industriales.

**ZAC**

Zona afectada por el calor, en la inmediata vecindad del cordón de soldadura. En inglés, HAZ (heat affected zone).

**Zona Chill**

Consiste en granos finos que solidifican en la superficie y zona cercana a la misma, de una pieza fundida.

## ANTECEDENTES

En Guatemala, tanto dentro de la industria en general, como en los proyectos de infraestructura y los servicios artesanales a todo nivel de producción, se desarrolla un sinnúmero de procesos empíricos de soldadura para la reparación, recuperación y reconstrucción de elementos de máquinas y estructurales de diversos tipos de metales; como hace mención el Metals Handbook vol. 6 (2005), el 90% de los procesos de reconstrucción se efectúan por medio de soldadura, específicamente el proceso SMAW. El campo más extenso lo ocupa la recuperación y reconstrucción de piezas de acero, en sus diversas características, para lo cual ya se ha logrado proponer una serie de metodologías que coadyuvan a la aplicación efectiva de los procesos referidos, como puede ejemplificarse en la publicación de Chicas R. y Aguilar R. (2013), en el que presentan casos reales de aplicación de soldaduras especiales.

Dentro del “Proyecto de Investigaciones Metalúrgicas” de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la FIUSAC, se han realizado una serie de acciones que tienden a contribuir a la tecnificación de los procesos de soldadura desarrollados en nuestro medio, tal es el caso de las publicaciones referidas en la bibliografía (2), (3), (9), (12), (13), (14). Se han propuesto metodologías de inspección de fallas y defectos con el apoyo de ensayos no destructivos, y la reparación y reconstrucción de las mismas por medio de métodos adecuados de soldadura.

En el presente caso, en lo atinente a la maquinaria y equipo construidos por el proceso de fundición de hierro, no se ha desarrollado ninguna metodología que en nuestro medio coadyuve al resanamiento o reconstrucción

de las mismas, de forma técnica y sistemática, aunque realizando la aplicación de los ensayos no destructivos para la ubicación de las fallas, no se cuenta con información específica para aplicar una técnica de soldadura, para obtener las sollicitaciones mecánicas requeridas en un elemento fabricado con fundición de hierro gris, utilizando el proceso de soldadura por arco protegido (SMAW); con lo anteriormente descrito, se pretende contribuir a la disminución de la importación de piezas (compra de repuestos) y al crecimiento del valor agregado del producto interno bruto del país. De ahí que en el presente caso se investiga sobre el efecto de los parámetros que intervienen en la soldadura y reconstrucción por este proceso de piezas de fundición gris y nodular.

## PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Debido a los inconvenientes que se presentan en la mayoría de las industrias que cuentan con elementos de máquinas fabricados con materiales de los diversos tipos de fundición, (en este caso, fundición gris y nodular), y al diseño, operación, mantenimiento y condiciones ambientales a las que están sometidos, los elementos de máquina presentan problemas de desgaste, fisuras, agrietamientos y fracturas que los inhabilitan parcial o totalmente.

En la mayoría de reacondicionamientos, reparaciones o reconstrucciones de elementos metálicos, se utiliza como solución total o parcial la recuperación por soldadura al arco eléctrico. Debido a la dificultad que las fundiciones presentan durante la aplicación del proceso y complementariamente por malas prácticas de soldadura, se reduce considerablemente el tiempo medio entre fallas, afectando la disponibilidad de las máquinas y generando pérdidas económicas, debido a todos los factores que entran en juego. Se suma la inoperatividad y deterioro del material por el cambio en sus características estructurales y de composición química producidas por el material de aporte y el fenómeno de la segregación (Aguilar, 1989).

Por lo expresado anteriormente, surge la pregunta central de la investigación: ¿Qué método de aplicación de la soldadura al arco eléctrico con electrodo revestido sobre una fundición de hierro gris y/o nodular es el adecuado para mantener las propiedades de comportamiento mecánico similares al material original, especialmente la resistencia a las sollicitaciones mecánicas a que se someten? Es necesario determinar un método adecuado para la reconstrucción de piezas fabricadas con el tipo de materiales en

cuestión, forma de aplicación del material de aporte y condiciones elementales durante la aplicación del proceso.

Antes de realizar cualquier tipo de operación se plantean otras interrogantes: ¿Cuál es el material adecuado para la metalización (material de aporte) para realizar un trabajo de reparación con soldadura de arco eléctrico sobre un material base de fundición de hierro gris? ¿El tipo de aplicación del depósito del material de aporte durante el soldeo sobre una fundición gris y/o nodular influye en la fusión y penetración entre ambos materiales? ¿Cómo influye el control de las variaciones de temperatura durante el reacondicionamiento y presentación final de las piezas?

## JUSTIFICACIÓN

El hierro fundido es un metal muy utilizado dentro de la industria, que constituye uno de los renglones más fuertes del desarrollo socioeconómico nacional, debido a las propiedades que posee, tales como: la resistencia a la compresión, al desgaste, resistencia a la corrosión y temperaturas de operación.

En lo referente a los aspectos básicos de mantenimiento de maquinaria y equipo, el concepto de disponibilidad es uno de sus objetivos primordiales, lo que conlleva a la ejecución de tareas para solventar cualquier tipo de problemas que se presentan, entre ellos la reconstrucción de elementos de máquina, ya sea por emergencia, reducción de costos o difícil adquisición de los elementos dañados.

El problema fundamental es no contar con un estudio específico dirigido o aplicado a la fundición gris empleada en Guatemala, para llevar a cabo actividades de reparación y reconstrucción de piezas. La selección del proceso de soldadura SMAW utilizado en la presente investigación se debe a que estadísticamente el 90% de las reparaciones efectuadas se realizan por el proceso en mención, según el Metals Handbook vol 6 (2005). El proyecto investigativo se desarrolla en las líneas de diseño y metalurgia de la soldadura de la Maestría de Ingeniería del Mantenimiento.

Con la investigación se espera que cualquier técnico o ingeniero tenga la facilidad de efectuar el análisis de los materiales involucrados, el tipo de falla que se presenta, le será posible definir sus características metalúrgicas y

decidir el método de recuperación adecuado, debido a no contarse con un estudio específico dirigido o aplicado a la fundición gris, para llevar a cabo las actividades de mantenimiento según su tipo.

Lo anterior contribuye a la mejora de la economía nacional, incidiendo directamente en la disminución de gastos de operación y en la sustitución de importaciones de piezas de repuesto o equipos completos. Repercute en el crecimiento del valor agregado del producto interno bruto del país, lo que justifica en forma evidente la ejecución de la investigación propuesta.

# OBJETIVOS

## General

Establecer un método apropiado de soldadura por arco eléctrico con electrodo revestido, SMAW, aplicable a la recuperación de piezas y elementos mecánicos de fundición gris y nodular, que han sido dañadas en servicio, y que responda a las solicitaciones mecánicas requeridas, logrando estructuras metalográficas resultantes compatibles mecánicamente con las del material base.

## Específicos

1. Determinar el material de aporte (electrodo), adecuado para la soldadura de piezas dañadas, específicas, de fundición de hierro gris y nodular.
2. Establecer las técnicas de soldeo adecuadas para una buena fusión y penetración entre el material base y el material de aporte en piezas específicas de fundiciones gris y nodular.
3. Determinar las temperaturas adecuadas de trabajo, y/o los tratamientos térmicos necesarios para llevar a cabo la soldadura por arco eléctrico con electrodo revestido, SMAW, en fundiciones de hierro gris y nodular.



## ALCANCES

Las metodologías de reparación y reconstrucción investigadas, se espera que sirvan de fundamento en la práctica diaria de los ingenieros que se dedican al mantenimiento de los diversos tipos de maquinaria y equipo que constituyen el soporte de la industria nacional, incrementando el conocimiento científico-técnico de los mismos y de los trabajadores y operarios calificados que se dedican a la práctica de la soldadura en general, contribuyendo a la mejora de la eficiencia y productividad de las plantas del país.

Por otro lado, se ha contribuido al desarrollo del “Proyecto de Investigaciones Metalúrgicas” de la Escuela de Ingeniería Mecánica y a la aplicación pragmática de los conceptos de soldadura y tratamientos térmicos, propuestos en el pensum de la Maestría en Mantenimiento de la Escuela de Estudios de Postgrado de la FIUSAC.

Con la aplicación de la práctica metalográfica, y de los ensayos mecánicos, se demuestra la mejora de los procedimientos cuando se controlan efectivamente los parámetros que entran en juego durante la aplicación del proceso. De esta manera, se obtienen los siguientes resultados:

- Se determina la soldabilidad de las piezas de fundiciones grises y nodulares, mediante la aplicación de los electrodos revestidos propuestos, y el proceso SMAW.
- Se establece la aplicación y el control de los diversos parámetros que entran en juego durante el proceso de soldeo.

- Se verifica la calidad de los resultados obtenidos, mediante la aplicación de ensayos metalográficos y mecánicos.
- Se propone la metodología adecuada para cada caso en particular.

## RESUMEN DE MARCO METODOLÓGICO

El desarrollo del proyecto se identifica como de tipo cualitativo y se efectúa en tres fases. La primera fase es de carácter descriptiva, compuesta por dos capítulos, en los cuales se detallan generalidades y bases teóricas para el desarrollo de la investigación.

La segunda fase es del tipo explicativa, en ella se indican los detalles del diseño de los parámetros de la soldadura con base en especificaciones y normas internacionales, aplicando el método propuesto por Aguilar Rivas y Celada (2012). La tercera fase es de tipo experimental, desarrollándose por medio de ensayos empíricos, evaluando los resultados por medio de los ensayos descritos, y evaluando la efectividad de los procesos propuestos.

- **Fase I: descriptiva 1: Marco teórico**

Se realiza la investigación de fuentes bibliográficas concernientes al tema de las fundiciones, tales como características y propiedades mecánicas y metalúrgicas de las mismas, lo que constituye el cuerpo del marco teórico, luego se realiza un análisis exhaustivo del material respectivo.

- **Fase I: descriptiva 2: diseño de la investigación**

Posterior a los análisis del material bibliográfico, se efectúa el diseño de la investigación, la cual detalla los procedimientos y consideraciones a seguir para el análisis del material, fabricación de probetas y proceso de soldadura

propuesto, todo basado en normas internacionales y aplicadas a la fundición gris.

- **Fase II: explicativa: proceso experimental**

Durante la fase experimental, se fabricaron probetas representativas de fundición gris y nodular, para la aplicación de soldadura por medio de diferentes métodos de reconstrucción y distintos materiales de aporte. Finalmente, se realiza un análisis comparativo de las propiedades mecánicas y metalográficas resultantes, obtenidas mediante los diferentes procedimientos aplicados.

El análisis metalográfico de cada una de las probetas y la realización de ensayos destructivos, permite seleccionar el procedimiento de reconstrucción más adecuado, principalmente las temperaturas del proceso, esto es, pre durante y post soldadura, así como la selección del material de aporte que debe emplearse para la reconstrucción de piezas de maquinaria y equipo de fundiciones específicas de hierro gris, todo esto para poder cumplir con la sección de los objetivos específicos.

- **Fase III: análisis de resultados**

Los análisis metalográficos, ensayos destructivos y no destructivos se efectúan basados en las normas ASTM E18, A956 y E407 para determinar la resistencia del material pre y post la aplicación del procedimiento propuesto. Para realizar la comparación se determina si es factible realizar ese tipo de procedimiento para la reparación y/o reconstrucción de piezas fabricadas con fundición gris y así dar respuesta a la pregunta principal de la investigación en cuanto a la selección del procedimiento de soldadura adecuado.

## RESUMEN

Se propone una metodología de reparación y/o reconstrucción de piezas de fundición de hierro gris y nodular, por medio de soldadura al arco (SMAW), cuyo objetivo fundamental es coadyuvar al mejoramiento de las técnicas empleadas para el efecto, resaltando los resultados macro y micro estructurales obtenidos por el proceso de unión, en el que actúan tanto los materiales de base, cuanto los de aporte utilizados, así como las técnicas de soldeo implementadas. El análisis de los resultados se llevó a cabo por medio de observaciones metalográficas en probetas representativas de los elementos implicados.

Se realizaron ensayos experimentales de soldadura, empleando como material base residuos representativos de piezas de fundición gris y nodular, así como materiales de aporte existentes en el país. El proceso de soldadura se llevó a cabo, tanto por el método convencional o común, cuanto por la aplicación del método desarrollado por Aguilar Rivas y Celada (2012). Los resultados fueron satisfactorios y se analizaron por medio de ensayos a la chispa, observación macroscópica, metalografía, ensayos de dureza y ensayos no destructivos, específicamente de líquidos penetrantes.

Durante el desarrollo de la investigación, con la aplicación del método propuesto, se logró disminuir en un 17% a 24 % en fundición gris y 8% a 12% en fundición nodular la variación en las propiedades y microestructuras en las zonas afectadas por el calor respecto a los valores pico presentados con temperaturas de precalentamiento menores al óptimo seleccionado, y se evitó que en las áreas adyacentes al cordón de soldadura se produjeran microfisuras,

estructuras martensíticas y zonas de fundición blanca, las cuales poseen mayor dureza, y en consecuencia, mayor fragilidad (Metals Handbook vol. 6 (2005)).

En virtud de lo anterior, se concluye que la metodología propuesta es adecuada para el mejoramiento de los procesos de recuperación de piezas de hierro de fundición gris y nodular, y se contribuye al desarrollo tecnológico nacional con la aplicación de técnicas de reconstrucción en la industria, así como a la sustitución de importaciones de piezas de repuesto, disminuyendo los costos de mantenimiento.

## INTRODUCCIÓN

En la industria, entre los materiales de ingeniería de uso común, o con los que se fabrican gran cantidad de los elementos de máquinas, se encuentran las fundiciones de hierro, que constituyen una gran parte de las aleaciones conocidas como de hierro-carbono. Las fundiciones tienen diferentes características, las cuales son definidas por su contenido de carbono y de los elementos aleantes que lo componen, al mismo tiempo el proceso de elaboración influye en las diferentes propiedades que adquiere. El destino o empleo de cada tipo de aleación, se establece de acuerdo a las propiedades de cada una de ellas. Las fundiciones se clasifican de acuerdo a sus características químicas, físicas y de proceso, en diferentes grados establecidos por las normas ASTM, SAE y DIN, entre otras.

El presente trabajo se desarrolla dentro de las líneas de investigación de diseño y metalurgia de la soldadura de la Maestría en Ingeniería del Mantenimiento, y a la vez, coadyuvando al mejoramiento de los objetivos de investigación de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la FIUSAC, específicamente, dentro del Proyecto de Investigaciones Metalúrgicas. La investigación es de carácter experimental tecnológico, mediante el cual se busca proponer una metodología que colabore al mejoramiento de las técnicas de reparación y/o reconstrucción de piezas de fundición de hierro gris, por medio de soldadura al arco (SMAW), resaltando el efecto post-soldadura por medio de estudios metalográficos en probetas representativas de los elementos implicados. De igual forma, se realizan ensayos básicos de inspección tales como: dureza, líquidos penetrantes y ensayos metalográficos, para observar posibles cambios ocurridos en el material ensayado.

Por otro lado, también como un objetivo fundamental, se pretende con la aplicación de dicho método, contribuir al desarrollo tecnológico nacional, con la aplicación de técnicas de reconstrucción en la industria, disminuyendo la importación de piezas de repuesto y por consiguiente, contribuyendo al mejoramiento del valor agregado del producto interno bruto del país, mediante la sustitución de importaciones, lo cual constituye uno de los problemas fundamentales en cuanto al incremento de costos de mantenimiento de maquinaria y equipo en el área de reconstrucción y/o reparación de piezas.

La investigación se basa en la identificación de fallas mecánicas y/o metalúrgicas en elementos de máquinas fabricadas con fundición de hierro gris, por ello, en el primer capítulo, se realiza una breve descripción de las aleaciones hierro-carbono, específicamente en lo concerniente a las fundiciones de hierro, en la cual se detalla la diferencia entre los diversos tipos existentes de dicho material, características y aplicaciones que comúnmente se presentan en la industria nacional. Al mismo tiempo se enlistan generalidades sobre la soldabilidad que presenta este tipo de aleaciones en particular, efectos, complicaciones y consideraciones a tomar para la aplicación de cordones de soldadura con electrodo revestido (SMAW).

En el segundo capítulo, se describe a detalle las características físicas, químicas y estructurales de la fundición gris y los diferentes tipos, según clasificaciones normalizadas. De igual manera, se desarrolla el tema de soldeo por arco eléctrico protegido en fundición gris, consideraciones a tomar en cuenta, tipos de materiales de aporte adecuados y temperaturas de trabajo pre, durante y post soldadura, para un acabado de la piezas que cumpla con los requisitos necesarios para la maquinación y operación de las mismas.

En el tercer capítulo, se detalla el diseño de la investigación, la cual se desglosa desde la identificación del material base, los procedimientos para el análisis metalográfico, fabricación de probetas para los diferentes ensayos que se efectuarán y los procedimientos de soldadura, basados en la técnica de cordón corrido, propuesta por Aguilar Rivas y Celada (Celada E. y Aguilar R., 2012) en la reparación de ejes de acero AISI 1045 por medio de soldadura al arco (SMAW).

En el cuarto capítulo, se desarrolla el proceso experimental de la investigación, en el cual se ejecuta el proceso de soldadura propuesto, se realizan las diferentes pruebas con ensayos no destructivos (END), ensayos metalográficos y se propone el método adecuado de soldadura para los distintos tipos de fundición gris.

Con la realización de la propuesta anterior, se espera aumentar la disponibilidad de la maquinaria y equipos con los que cuentan las diferentes industrias, cuando se requiere con urgencia la reparación de un elemento de máquina, ya sea para reducir costos en reacondicionamientos, difícil adquisición de las piezas o deterioro del material al ejecutar diversas reparaciones sobre el mismo.

Para solucionar todas las interrogantes la investigación se desarrolla en tres capítulos. El primer capítulo trata sobre las generalidades del hierro fundido, los tipos, sus características y las zonas afectadas por el calor en los procesos de soldadura; el segundo, delimita específicamente a la fundición gris, clasificaciones, soldabilidad, consideraciones a tomar sobre las temperaturas pre, durante y post soldadura de la misma. Se enfatiza la importancia del cuidado del manejo de las temperaturas durante todo el proceso de soldeo, la cual afecta directamente las microestructuras formadas y modificadas en la

pieza tratada, produciendo la aparición de fisuras, fragilidad y posibles futuras fuentes de falla.

El tercer capítulo incluye la fase experimental, a través de ensayos de soldadura sobre diversas probetas, se comprobó, por medio de ensayos metalográficos, la compatibilidad del material de aporte con la fundición gris; los ensayos de dureza proporcionaron la información necesaria para comparar las durezas antes y después del proceso aplicado, lo cual se relaciona directamente con los posibles cambios de la estructura metalúrgica.

El método de soldeo se basa en el método propuesto por Aguilar Rivas y Celada (2012), el cual permite una penetración, fusión y manejo adecuado de las temperaturas de trabajo durante el proceso de soldadura (SMAW), para alcanzar las condiciones de resistencia requeridas en las piezas de fundición de hierro gris trabajadas por medio dicho proceso.

# 1. ALEACIONES HIERRO-CARBONO

Las aleaciones de hierro carbono están constituidas, como su nombre lo indica, por el hierro como material base y el carbono como soluto principal. El hierro, originalmente, es un material dúctil, y al alearse con el carbono adquiere propiedades de dureza y tenacidad en función de la cantidad que se encuentre en solución. Aguilar Rivas (2012), hace la separación de las aleaciones en dos grandes grupos, los aceros, cuyo contenido de carbono puede ser desde 0.02 hasta el 1.7 o 2% de carbono, y las fundiciones que van desde el 2 hasta el 6.7% de dicho elemento; también se les conoce como hierro colado. Sin embargo, las fundiciones comunes de uso industrial, se encuentran, en su mayoría, entre un mínimo de 2.5 % y un máximo de 4.3 % de carbono. Las aleaciones arriba del 3.5% de carbono son muy escasas.

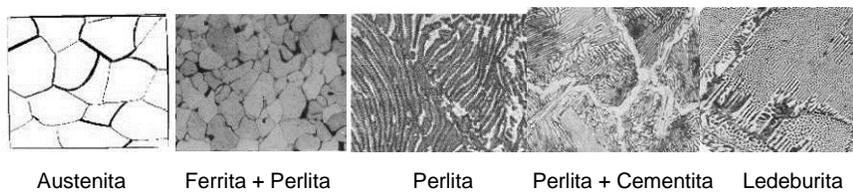
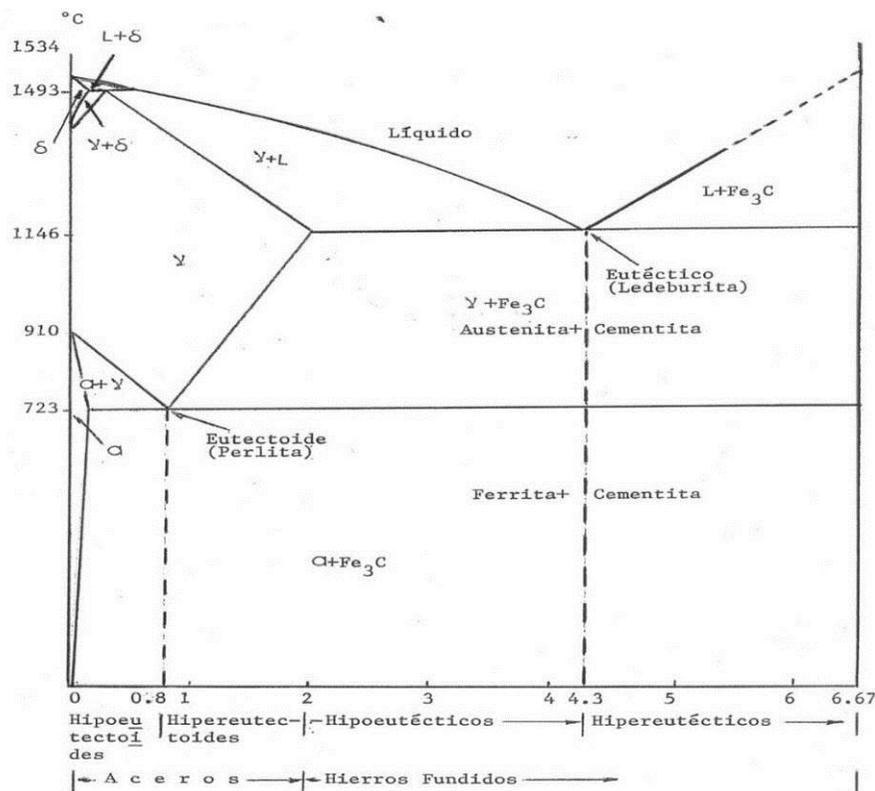
Las subdivisiones de los grupos son muy amplias dependiendo de una serie de variables químicas y estructurales. En adelante, debido al objetivo fundamental de la presente investigación, nos referiremos únicamente a las fundiciones.

## 1.1. Características de los hierros fundidos

La ductilidad de los hierros fundidos es muy baja comparada con la de los aceros con menor contenido de carbono y no puede laminarse, estirarse o trabajarse en frío o en caliente; llamados fundiciones, las cuales son ampliamente utilizadas en la industria para propósitos generales. Según Kiser (2005), contienen aproximadamente entre 2,0 a 4,5% de carbono, silicio de 1 a 3% y manganeso.

Pueden contener o añadirseles otros elementos para proporcionar propiedades deseadas tales como resistencia, dureza, templabilidad, o resistencia a la corrosión para aplicaciones específicas, los elementos comunes para dicho fin son el cromo, cobre, molibdeno y níquel. La figura 1, muestra el diagrama de equilibrio Hierro- Carburo de hierro, en el cual se aprecia la división de los dos grupos referidos.

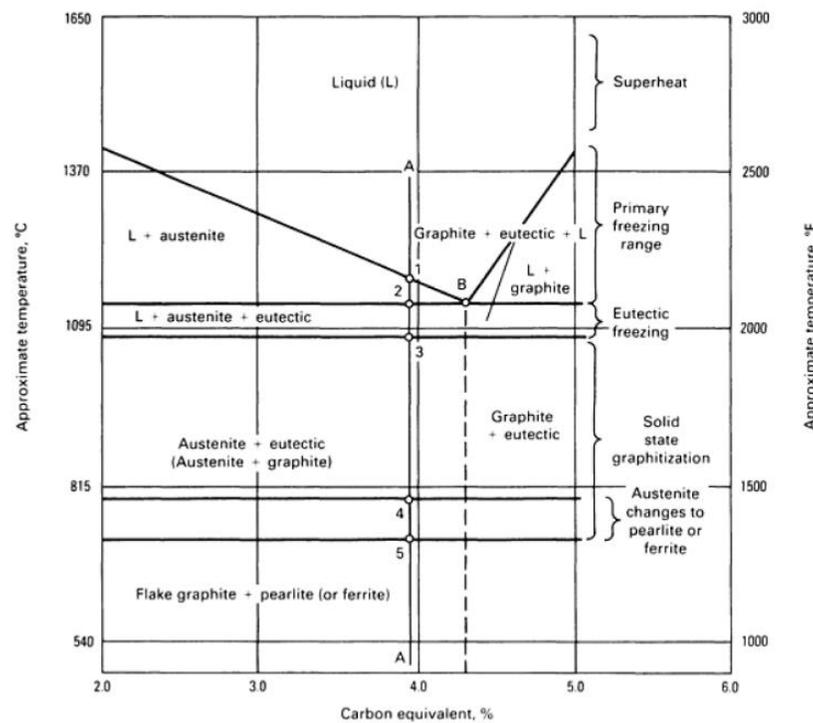
Figura 1. Diagrama de equilibrio Fe-Fe<sub>3</sub>C



Fuente: Aguilar Rivas, Introducción a la Metalurgia. 2012. 138 pág.

En la figura 2, se observa claramente lo referente al diagrama de equilibrio Fe-Fe<sub>3</sub>C, específicamente en la parte correspondiente a las fundiciones. Nótese la importancia que juega el aparecimiento del grafito que, como se verá más adelante, se manifiesta de varias formas dependiendo del proceso realizado.

Figura 2. Gráfica fundiciones-carbuo de hierro



Fuente: Metals Handbook Vol.1. 2005

## 1.2. Fundiciones o hierro fundido

Barrientos G. (2009), señala que se consideran hierros fundidos todos aquellos metales contemplados en el diagrama de equilibrio hierro-carbono, o Fe-Fe<sub>3</sub>C, que contienen más carbono que el necesario para saturar la austenita

a la temperatura eutéctica. Son las aleaciones hierro-carbono las consideradas dentro de un contenido del 2 al 6.67% de carbono, cuya característica la define la forma en la que se encuentran incrustados cristales de carbono separado en forma de grafito.

Las fundiciones están clasificadas en cuatro grupos importantes:

- Fundición gris
- Fundición blanca
- Fundición maleable
- Fundición nodular

### **1.2.1. Fundición gris**

Aguilar Rivas (2012), describe la fundición gris como la forma más común de hierro fundido, sumado a esto, es la única fundición que se produce en nuestro país en forma artesanal. Su principal característica metalúrgica, es que el exceso de carbono solidifica en forma de escamas de grafito. Sus características mecánicas más importantes son su resistencia moderada, una excelente capacidad de amortiguación y maquinabilidad, pero pobre ductilidad.

Los hierros fundidos grises contienen carbono combinado en la matriz en forma de ferrita, cementita, perlita o su mezcla, y escamas de grafito. Son poco dúctiles debido a la formas de escamas del grafito, lo cual permite identificarlos a través de su superficie fracturada.

La fundición gris contiene aproximadamente un 2.6 a 3.8% de carbono en la aleación, y se caracteriza por la forma en la que éste se encuentra dentro de la fundición formando hojuelas de grafito, las cuales varían en cantidad

dependiendo el contenido de silicio y manganeso. Según Aguilar (2012), el silicio proporciona a la fundición mayor cantidad y mayor tamaño de hojuelas, mientras el manganeso, menor cantidad y menor tamaño de hojuelas de grafito.

La fundición se caracteriza por su color grisáceo, dureza y falta de maleabilidad. Es utilizada en gran parte de elementos de máquina tales como: bloques de motor, tuberías, tambores de freno, entre otros, los cuales, por sus características permiten ser maquinados con mayor facilidad respecto a otros tipos de fundición.

#### **1.2.1.1. Composición química de la fundición gris**

La descripción de las propiedades mencionadas en los siguientes párrafos se basan, según la clasificación de la norma ASTM A 48; la fundición gris contiene generalmente 2,5-4,0% de carbono; 1.4 a 2.5% de silicio; 0,4-1,0% de manganeso; 0,05-1,0% de fósforo y 0,06 a 0,15% de azufre.

#### **1.2.1.2. Propiedades de la fundición gris**

Por su conformación, estructura, alto contenido de carbono, disposición y forma de las hojuelas, la fundición gris presenta propiedades distintas a las de los aceros, tales como el aumento de dureza, maquinabilidad, aspecto, resistencia química, entre otros, lo cual además de ser un material cómodo económicamente hablando y común, cumple con especificaciones para la fabricación de gran cantidad de elementos de máquina y elementos metálicos para la industria.

- **Aspecto**

La superficie de la fundición es gris oscuro, mientras en la fractura es de color gris claro con asperezas, de allí su nombre característico. Es un material resistente a la corrosión, por lo tanto el proceso de oxidación se produce en forma lenta, cubriéndose la superficie de herrumbre color rojo pardo y penetrando lentamente al interior de la estructura.

- **Dureza**

La dureza de la fundición gris es relativamente elevada, la cual varía en promedio entre 130 a 300 Brinell. Es de fácil maquinabilidad, debido a la disposición de las hojas de grafito, las cuales le brindan dureza, pero a la vez maquinabilidad por el lubricante sólido (grafito) en las virutas que se forman durante el corte del mismo.

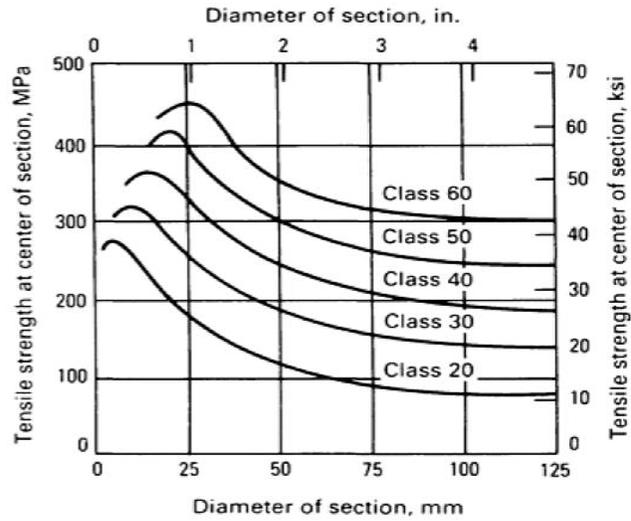
- **Resistencia química**

Debido a su alta resistencia a los ácidos, oxidación y temperatura es ideal para la fabricación de elementos de máquina, instalaciones químicas y térmicas.

- **Resistencia a la tracción**

En la figura 3, se representan las curvas que muestran en escala las fundiciones, realizando la comparación entre tracción y la clase de las mismas, según la norma ASTM 48. Esta propiedad aumenta según disminuye el porcentaje de contenido de carbono y silicio en su estructura. Esto se verifica al combinar los valores de la figura 3 con la tabla I.

Figura 3. **Diámetro vs. resistencia a la tracción de grados de fundición gris**



Fuente: Metals Handbook Vol. 15 (2005)

Los grados de fundición gris se clasifican según el contenido de carbono y silicio que estos posean en su estructura, según se muestra en la Tabla I.

Tabla I. **Clasificación de grados de fundición gris**

Tipo de hierro	Carbono total %	Silicio %
Clase 20	3.40-3.60	2.30-2.50
Clase 30	3.10-3.30	2.10-2.30
Clase 40	2.95-3.15	1.70-2.00
Clase 50	2.70-3.00	1.70-2.00
Clase 60	2.50-2.85	1.90-2.10

Fuente: Metals Handbook Vol. 15 (2005)

Las estructuras tipo A formadas durante la solidificación de la fundición de hierro gris, según Metals Handbook V.15 (2005), tiene mejores características anti-desgaste debido a su disposición aleatoria.

Las características de las fundiciones varían no solo basado en el porcentaje de contenido de carbono, sino en la disposición, tamaño y forma en la que se encuentra distribuido dentro de la fundición.

### **1.2.1.3. Tipos de fundición gris**

La fundición gris se clasifica en tres grupos principales según la ASM (2005), la fundición gris perlítica, fundición gris ferrítica y la fundición gris ferrito-perlítica.

- **Fundición gris perlítica**

La fundición gris perlítica, como su nombre lo dice, se caracteriza por contener una estructura perlítica, conteniendo un promedio de 0.8% de carbono, más incrustaciones de grafito en forma de vetas pequeñas.

- **Fundición gris ferrítica**

La fundición gris tiene una matriz de ferrita y el resto de la fundición gris se encuentra distribuido en forma de grafito.

- **Fundición gris ferrito-perlítica**

La fundición gris se encuentra en medio de los dos tipos citados de estructura; cuenta con parte de perlita, parte de ferrita y el carbono se encuentra como inclusiones de grafito.

Figura 4. **Tipos de fundición gris**



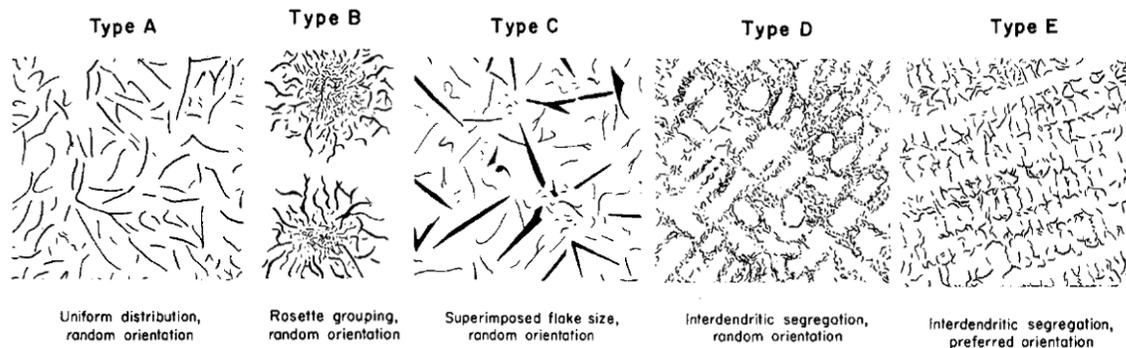
**Figura 1.1. Microestructura de la fundición gris: a) fundición perlítica, tomada a 200 aumentos; b) fundición ferrito - perlítica, tomada a 100 aumentos; c) fundición ferrítica, tomada a 100 aumentos<sup>1</sup>.**

Fuente: Bravo, F. (2005). Tratamientos Térmicos a Fundiciones Grises de la Región Grau Fabricadas en Horno de Cubilote. Pág 7.

#### **1.2.1.4. Tipos de fundición gris según dimensiones de grafito**

Las normas ASTM clasifican las fundiciones grises, según forma y dimensiones de las hojuelas de carbono distribuidos en la matriz de la fundición. En la norma A247 se muestran cinco tipos, A, B, C, D y E con diferentes tipos de hojuelas:

Figura 5. Tipos de fundición gris según la ASTM A247



Fuente: Metals Handbook vol 1 (2005). Pág 36.

Con relación a los siguientes tipos de fundiciones de hierro, no se hace un análisis tan exhaustivo como en el caso de las fundiciones grises, ya que el objetivo de la presente investigación lo constituye principalmente la soldabilidad de la fundición gris.

### 1.2.2. Fundición blanca

Según la ASM (2005), la fundición blanca se caracteriza por su color blanco; el color se debe a la ausencia total o parcial de hojuelas de grafito, ya sea por el poco contenido de silicio o gran contenido de manganeso, los cuales son cruciales en la formación del grafito en la fundición. En general se caracterizan por su alto contenido de cementita, y se obtienen por enfriamiento rápido de la colada.

El campo de aplicación de las fundiciones blancas abarca el sector pesado, en lo que se refiere a cargas que este debe soportar. Debido a esas características, muestra una dureza mayor, comparada con la fundición gris, lo cual permite su utilización en la fabricación de elementos de mayor dureza tales

como: cilindros de laminación, ruedas de ferrocarril y blindajes, entre otras aplicaciones. Su maquinabilidad es nula.

### **1.2.3. Fundición maleable**

La fundición maleable, se obtiene por medio de la aplicación de tratamientos térmicos a una fundición blanca. Aguilar Rivas (2005), indica que la fundición maleable se produce por la precipitación del grafito en forma equiaxial (crecimiento igual de granos en todas direcciones), diferente a la precipitación normal en forma de hojuelas. Las características de este tipo de fundición son similares a las del acero, permitiendo ser maquinado como uno de ellos por sus propiedades dúctiles. Sin embargo, su producción ha disminuido, habiendo sido sustituida por la fundición nodular cuya obtención resulta más ágil y económica.

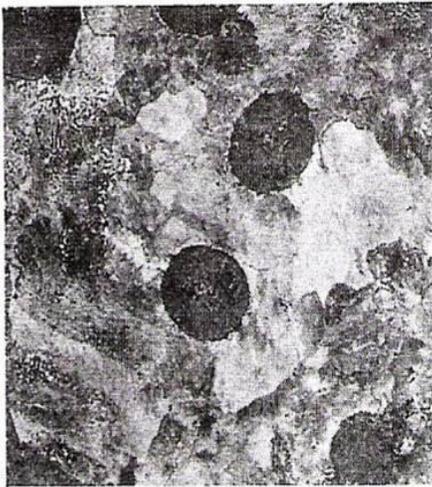
### **1.2.4. Fundición nodular**

Para Kiser & Northey (2005), la fundición maleable se caracteriza por la forma de nódulos completos o circulares de estructuras de grafito, por este motivo son conocidas como globular o esferoidal. La formación de nódulos se debe a concentraciones de magnesio y cerio que son inoculados durante la colada en forma de ferroaleaciones, ya sea de ferro-magnesio, ferro-cerio o ferro-magnesio-cerio.

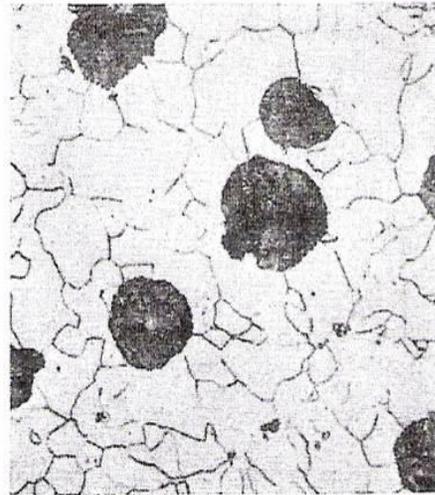
Las estructuras gráficas se muestran metalográficamente, generalmente sobre una matriz de ferrita y perlita, proporcionando a la fundición propiedades de alta ductilidad y tenacidad, así como de fácil maquinado, por lo que son

utilizadas en piezas de alto compromiso como ejes de levas y cigüeñales. La figura 6, muestra dos versiones de dicha fundición.

Figura 6. **Fundición nodular**



—Fundición nodular bruta de colada ( $\times 250$ ).

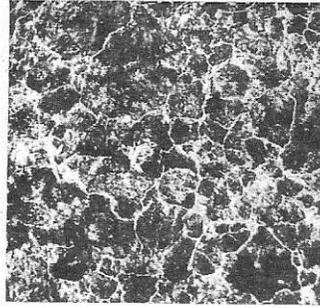


—Fundición nodular recocida ( $\times 250$ ).

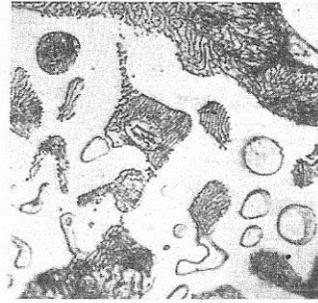
Fuente: Aguilar R. Introducción a la Metalurgia. 2012. 20 pág.

En la figura 7, se puede observar las diferencias entre la fundición gris, la maleable y la blanca, comparadas con una estructura metalográfica general del acero fundido.

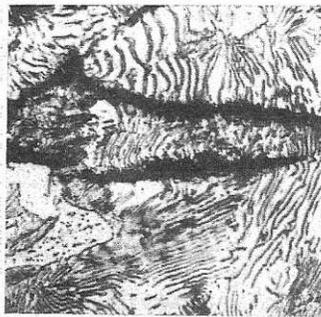
Figura 7. Fundiciones de acero, blanca, gris y maleable



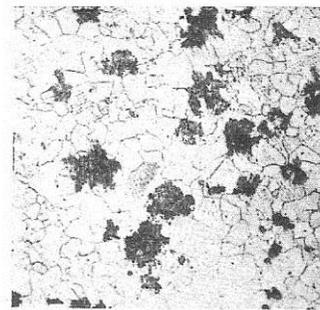
—Acero con 1,35 por 100 de carbono ( $\times 100$ ). (Cortesía de C. H. Kain y T. W. Ruffle.)



—Fundición blanca con 3,4 por 100 de carbono. Las zonas claras son las masas de carburo (cementita) ( $\times 500$ ).



—Fundición gris con 3,2 por 100 de carbono, las fajas negras corresponden al grafito ( $\times 500$ ).



—Fundición maleable de núcleo negro ( $\times 50$ ). (Proc. I.B.F.)

Fuente: Aguilar R. Introducción a la Metalurgia. 2012. 21 pág.

### 1.3. Soldabilidad del hierro fundido

Durante la presente investigación, se trabaja específicamente con el proceso de soldadura eléctrica (SMAW), o al arco protegido, ya que este constituye uno de los procesos de soldadura más habituales que se ejecutan en nuestra región, en la mayor parte de elementos metálicos de la industria en general.

Según el Metals Handbook vol 6 (2005), más del 90% de toda la soldadura industrial se realiza por soldadura al arco. Este tipo de soldadura tiene una entrada de calor más baja que la soldadura de gas oxiacetil, ya que su velocidad de avance es mayor, al igual que la tasa de deposición. La soldadura por arco puede alcanzar temperaturas superiores a 5000° C (9000° F) en el arco; el intenso calor permite la fusión necesaria mientras se calienta sólo una pequeña parte de la unión soldada, que a la vez produce velocidades mayores de enfriamiento, lo cual sin un correcto procedimiento puede llegar a ser perjudicial.

La selección del material de aporte para cualquier tipo de trabajo se considera según los requisitos de soldadura y condiciones económicas para cada aplicación.

A grandes rasgos, la mayoría de elementos metálicos de fundición de hierro pueden ser trabajados por medio de soldadura de arco eléctrico. Sin embargo, la soldabilidad de las fundiciones se relaciona directamente con el tipo de estructura que ésta presente. A pesar de que todas las fundiciones se consideran soldables, (a excepción de la fundición blanca, debido a su tipo de estructura, contenido, distribución y disposición de carbono), se requieren procedimientos especiales de soldadura, debido a los cambios de estructuras formadas en el proceso por la aplicación de calor. Los cambios alotrópicos pueden ser perjudiciales, si no se cuenta con el cuidado y control de cambios de temperaturas (pre, durante y post soldadura) en cualquier tipo de elemento.

### **1.3.1. Problemas comunes en soldadura de fundiciones de hierro**

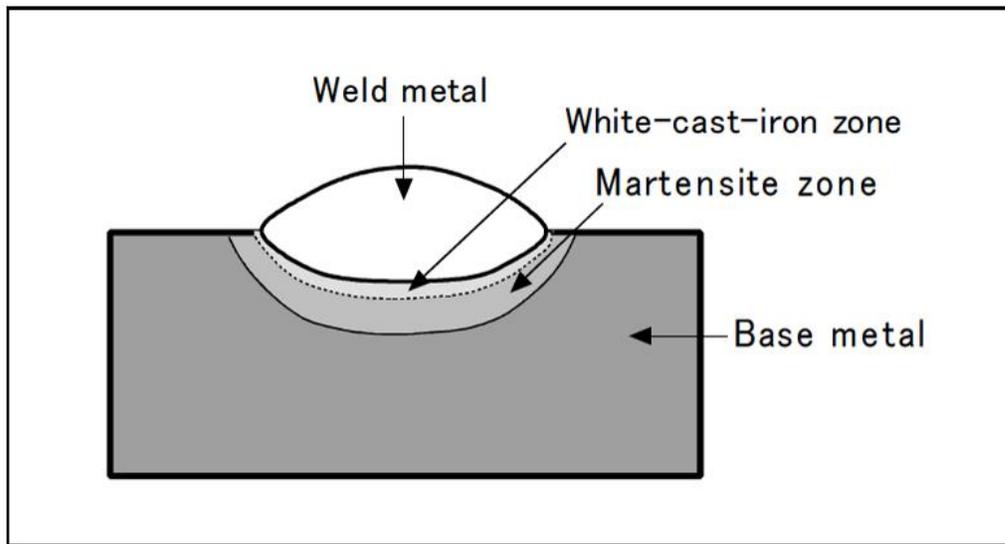
Según lo menciona la Kobe Steel (2011), entre los problemas comunes que afectan las soldaduras de fundiciones de hierro pueden mencionarse:

- Contenido de carbono
- Baja ductilidad
- Alto contenido de fósforo, azufre y oxígeno
- Defectos diversos durante la fundición

Las temperaturas de fusión del material durante el proceso de soldadura son de vital importancia, ya que dependiendo el proceso, en este caso (SMAW), se tiene la característica que la temperatura es alcanzada instantáneamente, pero el tiempo de enfriamiento del mismo, por ser de poca penetración, es relativamente corto.

Debido a que las fundiciones por lo general tienen un bajo punto de fusión, aproximadamente 1200 °C en promedio a 1500 ° C, se crea instantáneamente la piscina de fundición y al reducirse significativamente la temperatura en un corto tiempo, la estructura de las zonas afectadas por el calor (ZAC), prácticamente entran en un proceso de temple, lo cual transforma la estructura interna de esas zonas, convirtiéndolas en una fundición blanca, fragilizando la zona trabajada permitiendo una posible fisuración de la soldadura o fractura de la misma al producirse la contracción del fluido durante su solidificación, como se muestra en la figura 8.

Figura 8. Representación microestructural de la (ZAC) en soldadura de fundición de hierro



Fuente: Kobe Steel. Arc welding cast iron. Canada. 2005. 4 pág.

Puede mencionarse que las diferentes estructuras de las fundiciones permiten distintos grados de expansión del material a una misma temperatura, provocando defectos en la soldadura o posibles futuras fallas al momento de la solidificación de los elementos al enfriarse. Se atribuye también a la creación de tensiones residuales de origen térmico durante el proceso.

Como lo menciona Aguilar Rivas (2011), la solidificación de los metales se inicia a partir de las paredes del molde o segmento que contiene la fundición, en este caso, al aplicar el proceso de soldadura el electrodo forma una piscina de fundición líquida en conjunto con el metal base fusionada, sobre la cual se solidifica la fundición. El proceso se produce instantáneamente y varía dependiendo de la velocidad de aplicación del cordón de soldadura, lo que produce una solidificación hacia el centro del cordón en dirección del depósito

de soldadura. Al existir diferentes estructuras cristalinas por las diferencias de temperatura, se hace necesaria la permanencia de calor en la zona afectada para evitar la formación de estructuras frágiles y velocidades de enfriamiento similares en las áreas trabajadas. Según la Kobe Steel (2011), entre mayor sea la temperatura de precalentamiento, se obtendrán mejores resultados, estructuralmente hablando, de la zona trabajada, reduciendo significativamente zonas con alta dureza.

### **1.3.2. Efectos del carbono en la soldadura**

Como problema elemental en las fundiciones de hierro, se tiene el efecto que el carbono produce en la soldadura. Debido a que las fundiciones de hierro contienen un mayor porcentaje de carbono que las demás aleaciones de hierro-carbono, se dificulta dicho proceso por la reacción que cada elemento que se encuentra en la matriz de la fundición produce al aplicarse una temperatura específica. La ASM (2005), menciona que se reduce significativamente la capacidad de manejar las tensiones internas, la expansión y contracción del material, debido a que el carbono disminuye su temperatura mucho más rápido que la fundición misma.

Al mismo tiempo, adquiere significancia no solo la cantidad de carbono presente, sino la forma y disposición de éste, facilitando la soldadura en algunos casos. Por ejemplo, se puede comparar la fundición maleable con la fundición gris; la maleable posee el carbono incrustado en pequeñas formas esferoidales, mientras que en la fundición gris se manifiesta en forma de hojuelas.

Las formas esferoidales facilitan la distribución de calor en todo el material permitiendo mayor ductilidad y disminuyendo el efecto que el carbono

proporciona, mientras que en una fundición gris se distribuye el calor en formas distintas a lo largo de las hojuelas de carbono, lo cual influye significativamente en el comportamiento del material con las diferencias de temperatura aplicadas, lo que repercute en los procesos de soldadura, produciendo fisuras o fracturas en el proceso de solidificación.

#### **1.4. Zona afectada por el calor (ZAC)**

Es la zona en la inmediata vecindad del cordón, afectada durante cualquier proceso de soldadura, por su naturaleza se caracteriza por un rápido enfriamiento en comparación con un procedimiento de colada. Aguilar Rivas (2012), menciona que durante la soldadura, el carbono puede difundirse en la austenita y durante el enfriamiento, la austenita se transforma en martensita, convirtiendo la estructura en frágil y susceptible a agrietarse. La cantidad de martensita formada depende de la composición química y tipo de hierro fundido.

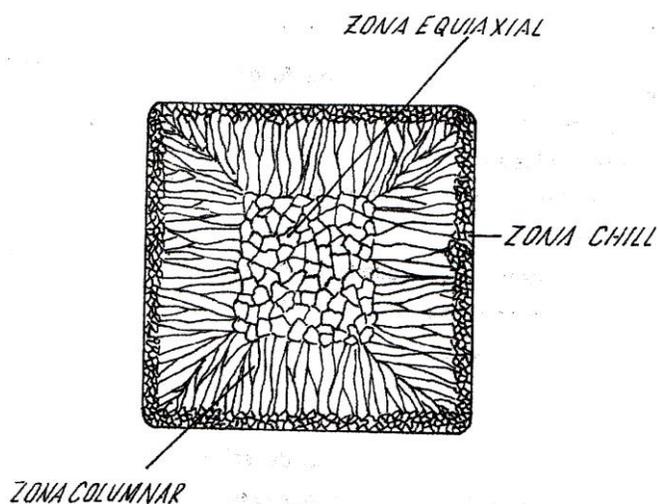
Las nuevas estructuras formadas pueden modificarse mediante al manejo adecuado de la temperatura pre, durante y post soldadura; también la técnica utilizada influye considerablemente al aplicarla de una manera no adecuada puede producir sobrecalentamiento, afectando la pieza. La ZAC, cerca de la línea de fusión, al enfriarse bruscamente se transforma en parte en una forma similar a una fundición blanca, lo cual puede evitarse modificando las velocidades de enfriamiento.

“La región es muy compleja y puede contener diferentes tipos de microestructuras. Si la cantidad de grafito disuelto durante la soldadura es lo suficientemente alta y forma una matriz fundida continua, es probable que la red de carburos también será continua, dando lugar a problemas, debido a que la

región parcialmente fundida contiene una gran proporción de productos duros, que es la zona más dura de la soldadura” (Metals Handbook vol 6, 2005).

En el uso de metal de relleno (material de aporte), debe considerarse también el punto de fusión del mismo; con el control de la temperatura puede evitarse la formación de martensita y evitar tensiones residuales. Como ocurre en la mayoría de trabajos con cierto grado de responsabilidad, independientemente de cuales sean, en ocasiones es necesaria la aplicación de pruebas de procedimiento de ensayo y error para poder obtener una soldadura exitosa. En la figura 9, se muestra la representación de una solidificación común en metales, donde la zona Chill corresponde a una zona de enfriamiento rápido; la zona columnar inicia desde los granos de las paredes (zona chill) hacia el centro de la fundición o sección en proceso de solidificación, el cordón de soldadura, y la zona central está compuesta por granos equiaxiales, la cual surge mediante un enfriamiento lento.

Figura 9. **Solidificación de metales**



Fuente: Aguilar R. Introducción a la Metalurgia. 2012. 156 pág.



## 2. SOLDABILIDAD DE LA FUNDICIÓN GRIS

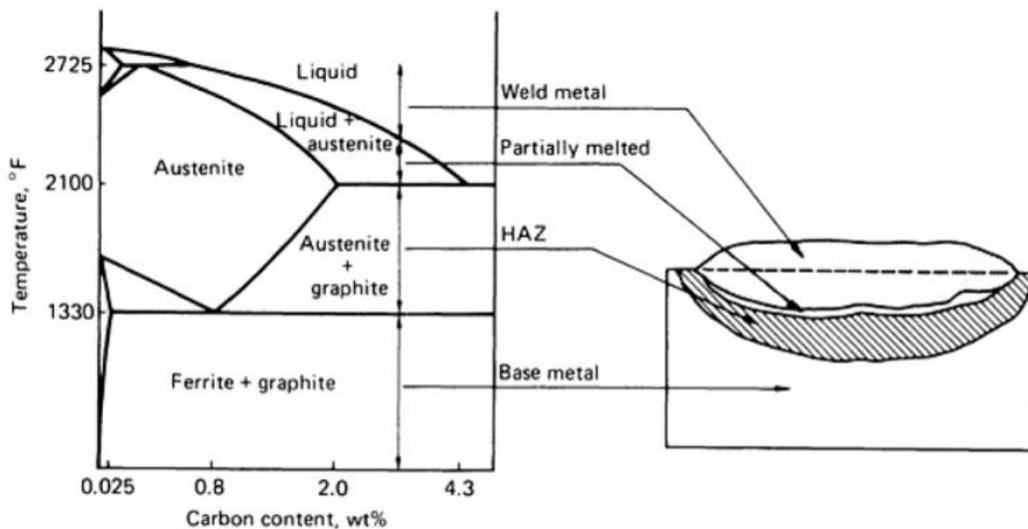
En las fundiciones, la soldadura es metalúrgicamente más compleja que en los aceros. Durante la solidificación se pueden producir variaciones locales tanto de la composición química cuanto microestructural. El concepto de soldabilidad, en general fue discutido por Celada & Aguilar Rivas (2013), siendo los fundamentos básicos expuestos en la publicación válidos en el caso del hierro fundido. Indican que “La soldabilidad de los metales no es más que la capacidad de los mismos de facilitar su unión o la reconstrucción de partes dañadas, por el proceso de soldadura, obteniéndose juntas sanas y totalmente homogéneas. La soldabilidad de un material está regida por las características químicas y metalúrgicas del material base y el material de aporte, así como de la aplicación de los procesos termodinámicos adecuados para su realización”. Debe agregarse el concepto de la fluidez del metal de aporte y los parámetros que la gobiernan (Aguilar Rivas 2011).

Específicamente, como lo menciona la ASM (2005), la fundición gris tiene la particularidad de tener un grado mayor de dificultad que las otras fundiciones debido a la longitud y distribución de las hojuelas de grafito, siendo necesario el control de la temperatura, ya que necesita una mayor temperatura de aplicación comparada a las demás fundiciones para evitar la formación de fundición blanca, zonas de martensita y mantener propiedades similares al metal base posterior a su intervención.

La forma que toma el exceso de carbono se determina por la velocidad de enfriamiento; si el enfriamiento es rápido, el carbono se solidifica como carburo de hierro; si el enfriamiento es lento, el carbono se solidifica en forma de grafito.

El tipo de carbono presente y su forma determinará el tipo y las propiedades del hierro fundido. Las propiedades son de suma importancia cuando se considera el procedimiento de soldadura a ser utilizado.

Figura 10. **Esquema de temperaturas y zonas en fundición gris típica**



Fuente: Metals Handbook Vol. 6 (2005). Pag 1749

## 2.1. Electrodo para el proceso SMAW

Generalmente, la composición química del material de aporte utilizado en las fundiciones de hierro es diferente a la del metal base, lo que describe Aguilar Rivas (2012), como soldaduras heterogéneas. La selección del material de aporte para las fundiciones puede ir desde el acero hasta el níquel, incluyendo aleaciones de monel (70% Ni- 30%Cu) y los aceros inoxidable (Cr-Ni), pero por las características que el níquel aporta durante la soldadura lo hace un material adecuado para el proceso.

Las especificaciones AWS 5.15 reconocen cuatro tipos de electrodos para la soldadura de hierros fundidos, según la Tabla II.

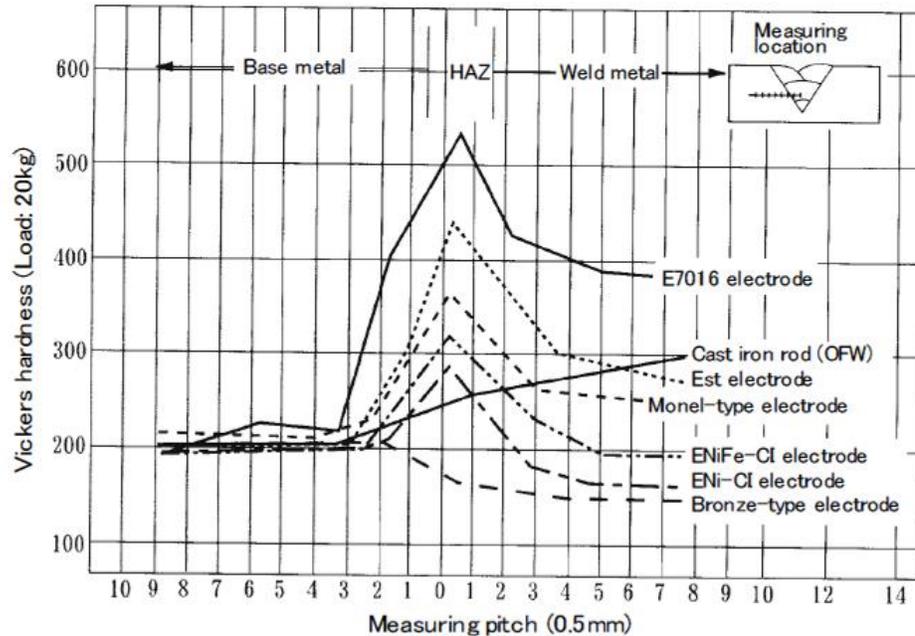
**Tabla II. Electrodos para soldadura de hierros fundidos**

<b>TIPO AWS</b>	<b>C %</b>	<b>Mn %</b>	<b>Si %</b>	<b>Fe %</b>	<b>Ni %</b>	<b>Cu %</b>	<b>Otros</b>
<b>ENi-CI</b>	2.00max	2.5 max	4.00max	8.00max	85.00 min	2.5max	1.00max
<b>ENiFe-CI</b>	2.00max	2.5 max	4.00 max	9.5/45 max	45/60 min	2.5 max	1.00 max
<b>ENiCu-A</b>	0.35/0.55 max	2.55 max	0.75 max	3.0/6.0 max	50/60 min	35/45 max	1.00 max
<b>ENiCu-B</b>	0.35/0.55 max	2.55 max	0.75max	3.0/6.0max	60/70 min	25/35max	1.00max

Fuente: OXGASA. *Manual del soldador*, INFRA. El Salvador. pág 28. Sin fecha especificada. Consulta: mayo de 2013

Según AWS (2006), los electrodos recomendados para efectuar soldaduras en fundiciones de hierro en general, (fundición gris, fundición maleable, fundición dúctil) son los electrodos de níquel ENi-CI, este variará dependiendo de los niveles de dureza del elemento, tipo de elemento y función que éste desempeñe, ya que variará según el porcentaje de níquel y otros elementos agregados para cada caso en específico. A continuación se muestra en la figura 11, las diferentes durezas producidas por la utilización de diferentes tipos de electrodos aplicados en fundiciones, en la cual se visualiza que el material que muestra menores rangos de dureza posterior al proceso de soldadura en una fundición es el electrodo de níquel.

Figura 11. Dureza de materiales de aporte en soldadura de fundiciones



Fuente: Kobe Steel, Arc Welding of Specific Cast Irons (2011). p. 4-10

Las características que el níquel presenta en los procesos de soldadura de fundiciones de hierro son:

- Evita la fisuración por la aparición de fases duras y frágiles
- Alta elongación (dilatación y contracción)
- Maquinabilidad
- Menor entrada de calor

## 2.2. Temperaturas para el proceso de soldeo

Como se hizo referencia en incisos anteriores, la temperatura pre, durante y post soldadura es de vital importancia para un acabado, el cual cumpla con los requisitos

mínimos de soldadura en una fundición, ya que es un factor del cual depende el comportamiento del material finalizado el proceso.

### **2.3. Temperatura de precalentamiento**

Para determinar de una forma más certera la temperatura de precalentamiento, se debe tener principalmente el conocimiento de las características específicas del material, es necesario obtener el valor del carbono equivalente para determinar los niveles de temperatura y así evitar la aparición de fisuras en la soldadura por choques térmicos ocurridos en el proceso. El carbono equivalente se determina, según la composición química del material base, y se obtiene generalmente por la aplicación de la siguiente fórmula (1), según el Metals Handbook vol. 6 (2005):

$$CE = C + 0.31Si + 0.33P + 0.45S - 0.028Mn + Mo + Cr - 0.02Ni - 0.01Cu \quad (1)$$

CE= Carbono equivalente

C= Carbono

P=Fosforo

Mn= Manganeseo

Mo= Molibdeno

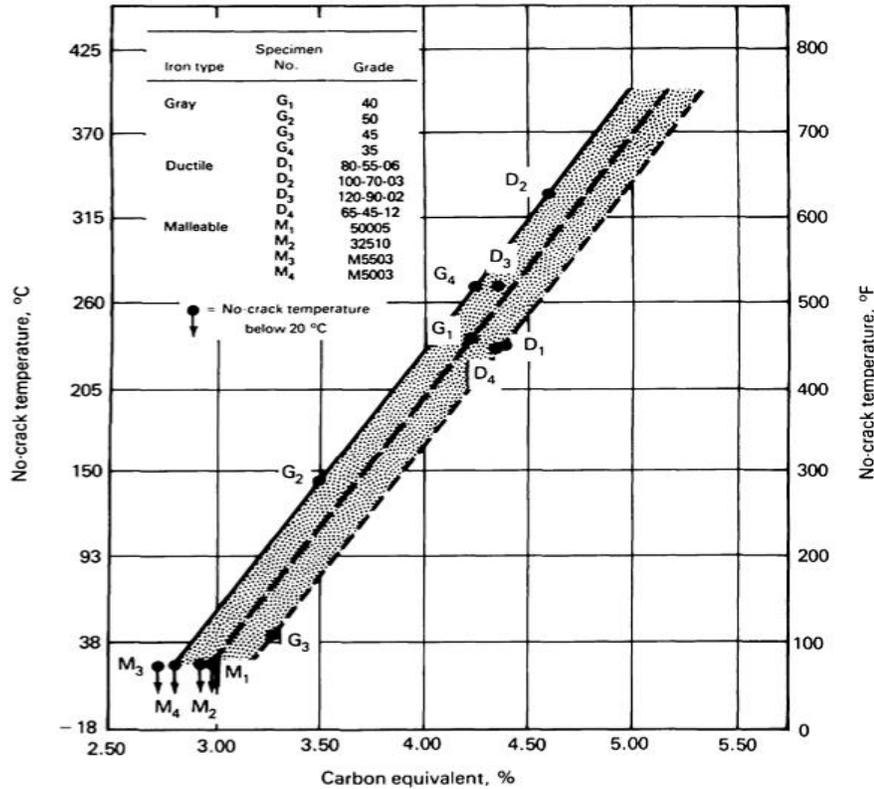
Ni= Níquel

Cr= Cromo

Cu= Cobre

A continuación se muestra en la figura 12 algunas fundiciones clasificadas por grados, la cual puede utilizarse como referencia al tener el conocimiento exacto del grado de fundición gris con la que se pretende trabajar. Se pueden visualizar las temperaturas de precalentamiento para evitar fisuras en el material por medio del conocimiento del carbono equivalente:

Figura 12. Efecto del carbono equivalente en temperatura de no fractura para grados distintos de fundiciones



Fuente: Metals Handbook Vol. 6 (2005). p. 1751

En la figura 12 puede observarse que la mayor parte de fundiciones grises y fundiciones dúctiles evaluadas, que poseen un mayor contenido de carbono, se concentran en un rango de temperaturas entre los 230 °C y 330 °C aproximadamente, confirmando la necesidad del aumento de la temperatura en los procesos de soldadura.

Según la ASM (2005), el precalentamiento a temperaturas superiores a 315 °C (600 °F) disminuye la velocidad de enfriamiento hasta el punto de que la

formación de martensita se minimiza, reduciendo la tendencia del hierro fundido a agrietarse. El enfriamiento lento también ayuda a minimizar las tensiones residuales. El precalentamiento debe aplicarse de manera que la junta de soldadura esté en compresión, no en tensión; puede requerir precalentamiento de toda la estructura y la zona a soldar debe ser llevada a una temperatura aún mayor si es necesario, luego de la soldadura, toda la pieza debe enfriarse lenta y gradualmente.

Los diferentes tipos de juntas o preparación de la pieza para agregar el material de aporte, dependerán de la complejidad de la pieza, dimensiones, espesor y penetración que se necesita. Todo va relacionado con las condiciones del servicio que la pieza presta.

#### **2.4. Tratamiento térmico post-soldadura**

“El nivel de estrés definitivo de una pieza de fundición soldada se ve afectada por la velocidad a la que la pieza fundida se enfría después de la soldadura” (Aguilar Rivas, 2012). Las piezas deben dejarse enfriar lentamente para minimizar las tensiones residuales. Para regular la velocidad de enfriamiento de la pieza, pueden tomarse en consideración distintos métodos como los que se numeran a continuación:

- Enterrar la pieza en arena o vermiculita
- Post-calentamiento de la pieza con una antorcha, luego enfriar lentamente.
- Post-calentamiento por medio de hornos. Enfriamiento lento controlado.
- Cubrir la fundición con una manta aislante, por ejemplo lana mineral.
- Enterrar la pieza en cal (es un método artesanal muy común en Guatemala).

Los beneficios obtenidos después de aplicar un tratamiento térmico post-soldadura pueden resumirse en lo siguiente:

- Mejorar la ductilidad de la ZAC
- Mejorar la mecanización de la soldadura y ZAC
- Transformar la martensita formada durante la soldadura a una fase menos frágil (martensita revenida).
- Aliviar las tensiones residuales en la fundición

Según la ASM (2005), los tratamientos térmicos en las fundiciones de hierro gris se efectúan a partir de los 700°C, y las velocidades de enfriamiento dependerán del tipo de procedimiento que desee efectuarse.

## **3. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN**

### **3.1 Identificación del material base**

Para el diseño de la investigación deben contemplarse diferentes aspectos tales como: el análisis del material base para determinar propiedades iniciales, material de aporte a utilizar y selección de temperaturas a manejar durante el proceso.

Para analizar el material base, se utiliza generalmente, como técnica habitual el ensayo a la chispa para distinguir el tipo de material seleccionado para los ensayos.

Para la presente investigación, se inició con la recopilación de muestras de fundición de hierro, seleccionando dos piezas metálicas diferentes para ser ensayadas. Se seccionó el block de un motor de combustión interna y una tubería de hierro fundido para traslado de agua potable de 8" de diámetro por 1/4" de espesor para la elaboración de probetas.

Durante todo el proceso se realizaron ensayos paralelos con las dos muestras seleccionadas, para evaluar patrones distintivos en cada tipo de material en los procesos de soldadura.

#### **3.1.1. Ensayo de chispa**

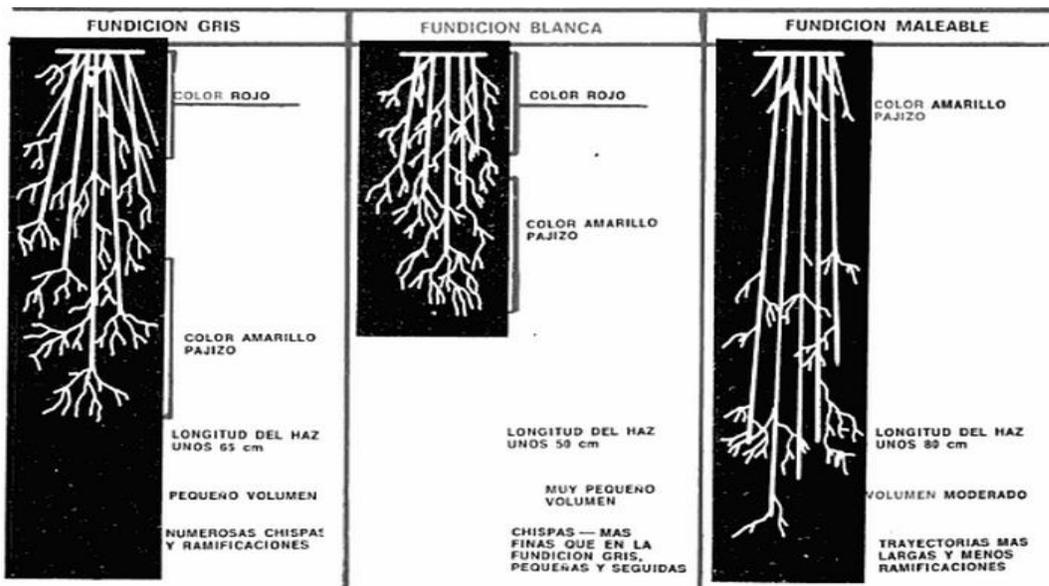
Para identificar el material base, se utilizó el ensayo a la chispa. Técnica muy utilizada para determinar el tipo de material metálico y cantidad aproximada de carbono que éste posee. Consiste en generar chispas del

material utilizando una piedra de esmeril, la cual gira a altas revoluciones; al momento de entrar en contacto, generarán fricción y desgaste por desprendimiento de viruta. Debido a la velocidad y temperatura que se genera, probocando chispas y explosiones con características específicas por los compuestos de la pieza.

Según Joseph W. (2007), las fundiciones de hierro presentan una chispa opaca rojiza por la gran cantidad de carbono que poseen. La longitud del haz de la chispa es de aproximadamente 50 a 80 cm, relativamente corta en comparación a las demás aleaciones hierro- carbono; presenta un color rojo en la base y amarillo rojizo en el extremo de la chispa.

En la figura 13, se pueden contemplar los patrones característicos de los haces de las chispas de las fundiciones de hierro.

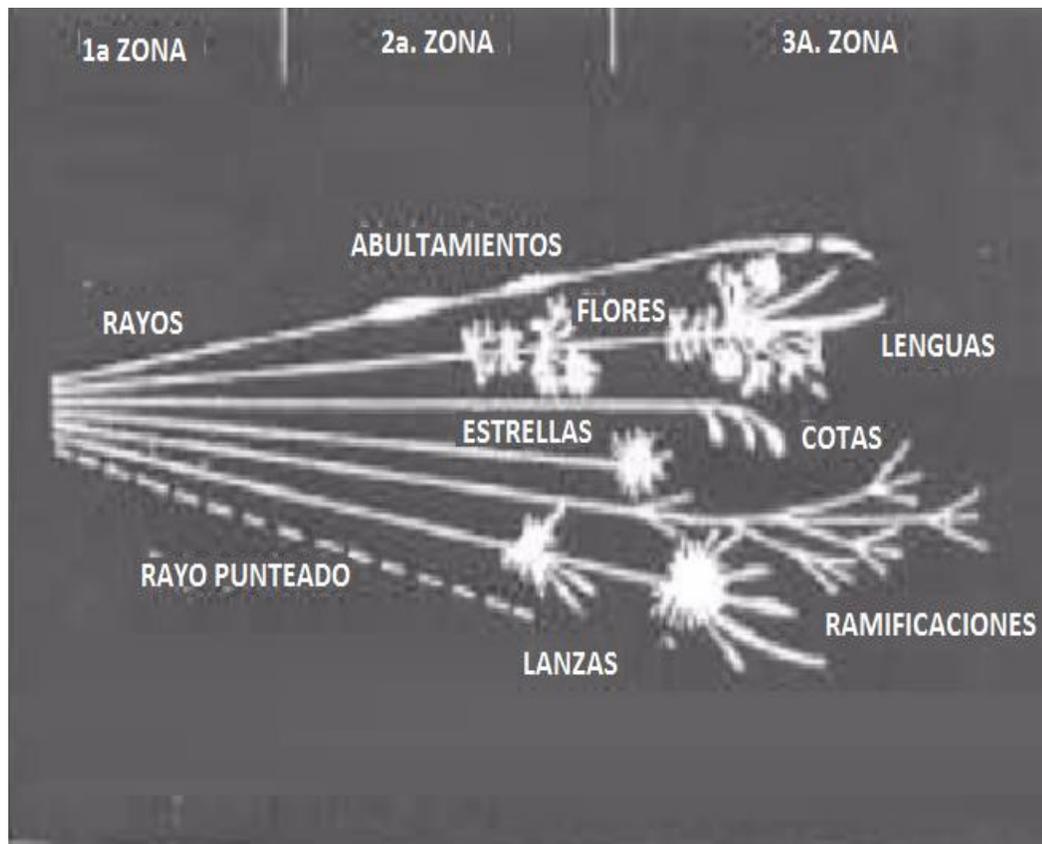
Figura 13. Diferentes tipos de fundición



Fuente: Joseph W. Giachino. Welding Skills and Practices. 2007. P. 28

En la figura 14, se visualiza la comparación de patrones y dimensiones entre las chispas de aleaciones de hierro-carbono más comunes.

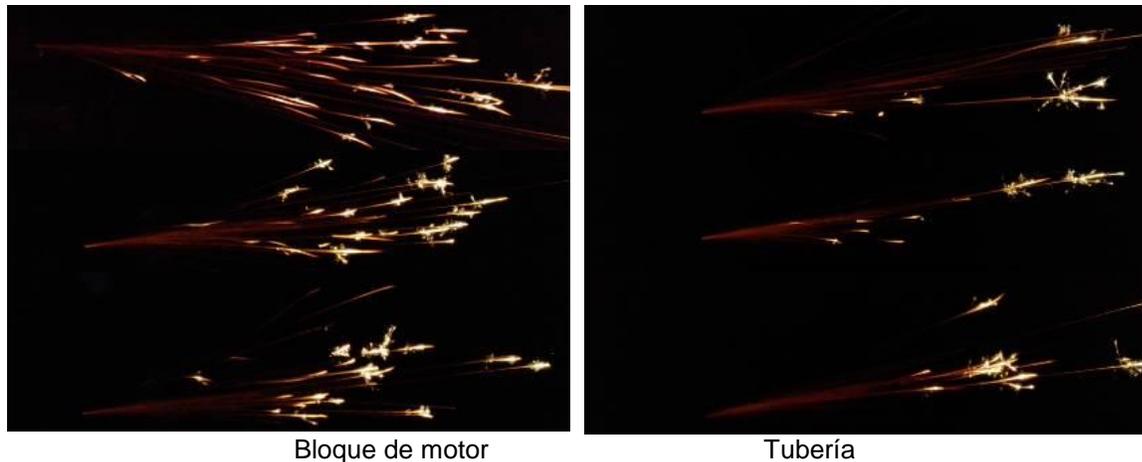
Figura 14. **Comparación haz de chispas**



Fuente: Ciencia de los Materiales. Manual de Laboratorios. Universidad de don bosco. 2014

Según lo menciona Bholer T. (2011), los rasgos característicos de la chispa de una fundición de hierro se describen como líneas cortas con muchas emisiones de color rojo cerca de la rueda y se tornan de un color amarillo- anaranjado a medida que se alejan.

Figura 15. **Ensayo de chispa**



Fuente: elaboración propia.

Como se puede observar, por la longitud de haz, color y conformación característica de la chispa, se puede concluir que en ambas piezas ensayadas se tratan de fundiciones de hierro. Es necesaria la realización de ensayos diversos de identificación y análisis de los materiales, según el tipo de función que efectúan las piezas fabricadas. La mayoría de ocasiones se dificulta diferenciar las chispas entre los distintos tipos de fundición; en las imágenes puede visualizarse un leve porcentaje en el incremento de la longitud de haz y menor porcentaje de explosiones correspondientes a la probeta de la tubería (fundición nodular) con respecto a la del bloque de motor (fundición gris), con chispas de características similares. Para un tipo de identificación como la propuesta, se necesita experiencia tanto por parte del soldador, como por parte del ingeniero responsable.

Por consiguiente, basado en las características físicas presentadas en los materiales utilizados para análisis (materiales base), de las cuales se fabricaron las probetas para la presente investigación, los motores de combustión interna

generalmente son fabricados de fundición gris, motivo de selección; mientras que en el caso de la tubería, (recubrimiento interno de mortero de cemento y capa externa de pintura bituminosa) y requerimientos especiales que deben cumplir las tuberías de conducción de agua y alcantarillado, tales como son: las altas presiones de transporte, resistencia a la corrosión, seguridad contra fallas de mantenimiento, movimientos de tierra, esfuerzos residuales, entre otras propiedades, generalmente, se trata de una fundición dúctil por su avanzada metalurgia y tecnología. La muestra extraída corresponde a una tubería de fundición dúctil o nodular, fabricada a partir de la norma ISO 2531- ISO 4179, AWWA C151/A21.51. Para determinar con exactitud el tipo de fundición de hierro es necesario efectuar ensayos metalográficos. Las emisiones producidas entre los diferentes tipos de fundiciones nodulares y tratadas térmicamente son muy similares por la cantidad de carbono que poseen en sus estructuras, mas no se puede verificar la forma exacta del grafito contenido; mismo que determina las características mecánicas del material, Aguilar Rivas. (2012).

### **3.1.2. Ensayo metalográfico**

El ensayo metalográfico se efectuó antes y después de realizar el proceso de soldadura, para determinar las propiedades y distribución del carbono del hierro fundido. Con el análisis posterior al proceso de soldadura se observan los cambios micro-estructurales de la fundición por la fusión con el material de aporte y la zona afectada por el calor, se visualiza el efecto de la temperatura ensayada de trabajo y la difusión del material de aporte empleado para cada caso específico.

Se toma al azar una muestra del material base de cada una de las piezas seleccionadas y se efectúa un proceso de pulido con lijas de diferentes tamaños

de grano hasta obtener una superficie tipo espejo; luego se ataca la superficie de la muestra con Nital al 5% para revelar las microestructuras de la pieza.

### **3.1.2.1. Fundición gris**

En la figura 16, el ensayo revela que el material es fundición gris, y por la distribución y forma de las hojuelas de grafito, se trata de una fundición gris tipo (A) según la clasificación ASTM A247 y según lo indica el Metals handbook vol. 15 (2005), que según la clasificación de la ASTM A48, una fundición grado 30 a 35, se utilizan en la industria automotriz comúnmente para la fabricación de bloques de motores de combustión interna; por consiguiente la muestra posee aproximadamente de 4.29 a 4.43% de carbono equivalente, según la mismas tablas descritas.

### **3.1.2.2. Fundición nodular**

La figura 17 muestra que el espécimen extraído de la tubería coincide con una fundición nodular o dúctil. La conformación del grafito se presenta en forma esferoidal o nodular sobre una matriz ferrítica muy característico de las fundiciones del tipo nodular. La muestra corresponde a una fundición de aproximadamente a la clasificación 65-45-12 por las propiedades no sólo físicas sino a las requeridas para la fabricación de dichas tuberías. Se menciona “clasificación aproximada” debido a que existen variaciones en cuanto a las propiedades mecánicas que poseen las fundiciones nodulares, ya sea por tratamientos térmicos o composición química.

La nomenclatura de dichas clasificaciones se descompone de la siguiente manera:

- Resistencia a la tracción en PSI (min)
- Limite elástico en PSI (min)
- Elongación (%)

Para la clasificación 65-45-12 corresponde:

- Resistencia a la tracción en PSI (min)                      65 KPSI    (448 MPa)
- Limite elástico en PSI (min)                                      45 KPSI    (310 MPa)
- Elongación (%)    12%

Dichas clasificaciones principales se muestran a continuación en la tabla III según la clasificación de la ASTM A-536-77.

**Tabla III. Clasificaciones de fundición dúctil según ASTM A-536-77**

GRADO	Resistencia a la tracción		Límite elástico		Elongación (%)	Dureza aproximada HB	Matriz de microestructura
	KPSI	MPa	KPSI	MPa			
60-40-18	60	414	40	276	18	149-187	Ferrita
65-45-12	65	448	45	310	12	170-207	Ferrita-Perlita
80-55-06	80	552	55	379	6	197-255	Perlita-Ferrita
100-70-03	100	690	70	483	3	217-269	Perlita
120-90-02	120	828	90	621	2	240-300	Martensita revenida

Fuente: <http://slideplayer.com.br/slide/364081/>. Consulta: Septiembre de 2014.

Figura 16. **Micrografía del metal base, fundición gris, aumento de 100X.**



Fuente: elaboración propia.

Como se puede observar en la imagen anterior, la micrografía de la fundición gris presenta una matriz de ferrita y perlita con incrustaciones de grafito en forma de hojuelas dispersas sin patrón definido en toda la matriz.

Figura 17. **Micrografía del metal base, fundición nodular, aumento de 100X.**

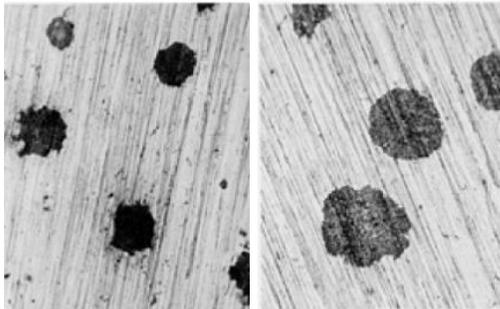


Fuente: elaboración propia.

En la imagen anterior, se observan conformaciones de grafito esferoidales con algunas secciones difuminadas en una matriz de ferrita. Existe cierta apariencia en algunas secciones con la fundición maleable debido a los bordes difuminados que presenta; según el Metals Handbook vol. 9 (2005), dicho efecto es producido durante el proceso de pulido en húmedo generando cierto

desprendimiento del grafito que se deposita alrededor dando una apariencia al grafito como una fundición maleable. En el caso del pulido en seco no ocurre tal desprendimiento, dicho efecto se muestra en la figura 18.

Figura 18. **Efectos del pulido en húmedo**



Fuente: Metals Handbook Vol. 9, 2005, p 442.

### **3.1.3. Ensayo de dureza**

Para el ensayo de dureza, se utilizó un durómetro marca Rockwell Hardness Tester modelo HR-150A en el caso de la fundición nodular y para la fundición gris se utilizó un durómetro con escala de dureza Vickers (HV).

#### **3.1.3.1. Fundición gris**

El rango de dureza obtenida para la fundición gris fue de 143 - 202 HV, la cual se encuentra dentro de las fundiciones grado 30-35 según la norma ASTM A48.

### **3.1.3.2. Fundición nodular**

Se determinó que el rango de dureza de las probetas ensayadas se encuentra en un rango de 21-26 HRC, 235 a 262 HB, lo cual indica que el material posee tratamientos térmicos o posee variantes en su composición química, como puede observarse en la tabla IV referente a la clasificación ASTM 536-77, la dureza obtenida por el ensayo supera la indicada, según la microestructura que posee la fundición nodular típica.

## **3.2. Procedimientos de muestreo y preparación de probetas para el análisis de la fundición de hierro**

### **3.2.1. Fundición gris**

Para la fabricación de probetas se seccionó el block de motor en fragmentos de aproximadamente 8 x 8 cm, por la forma irregular en los componentes del block, fue necesaria su fragmentación (quebrado) con la ayuda de almádana; luego se procedió a efectuar una limpieza exhaustiva en la superficie de cada probeta para depositar el cordón de soldadura dentro de la misma pieza, suponiendo un “calzado” sobre el material base; algunos fragmentos obtenidos del bloque de motor se visualizan en la figura 19.

Figura 19. **Probetas de fundición gris**



Fuente: elaboración propia.

### 3.2.2. **Fundición nodular**

Para la fabricación de probetas se fraccionó la tubería en secciones de 10 x 5 cm para un tamaño final de 10 x 10 cm por probeta. En la figura 20, se visualiza una probeta previa a la realización de los ensayos de soldadura.

Figura 20. **Dimensiones de probeta fundición nodular**



Fuente: elaboración propia.

Las dimensiones en los dos tipos de probeta se seleccionaron de dicha manera para una fácil manipulación, secciones más planas, longitudes máximas recomendadas de cada cordón aplicado y para abarcar el inicio y fin de las zonas afectadas por el calor a partir del cordón de soldadura.

En el caso de las probetas de fundición nodular, para la preparación de las probetas se efectúa limpieza exhaustiva y se realiza biselado en la cara que apuntaba hacia el interior de la tubería, con el propósito de realizar las probetas con secciones planas, lo cual facilita la aplicación del cordón de soldadura, y brinda una mejor apariencia y apreciación de las muestras. El bisel puede ser efectuado en “U” o a 60° con un talón de 1/16 a 1/8” y una luz entre secciones entre 1/16” a 1/8” según lo recomendado por el Metals Handbook vol. 6 (2005), como se muestra en la figura 21, con el fin de distribuir las tensiones internas que se generan durante el proceso de soldadura.

Figura 21. **Biselado de probeta**



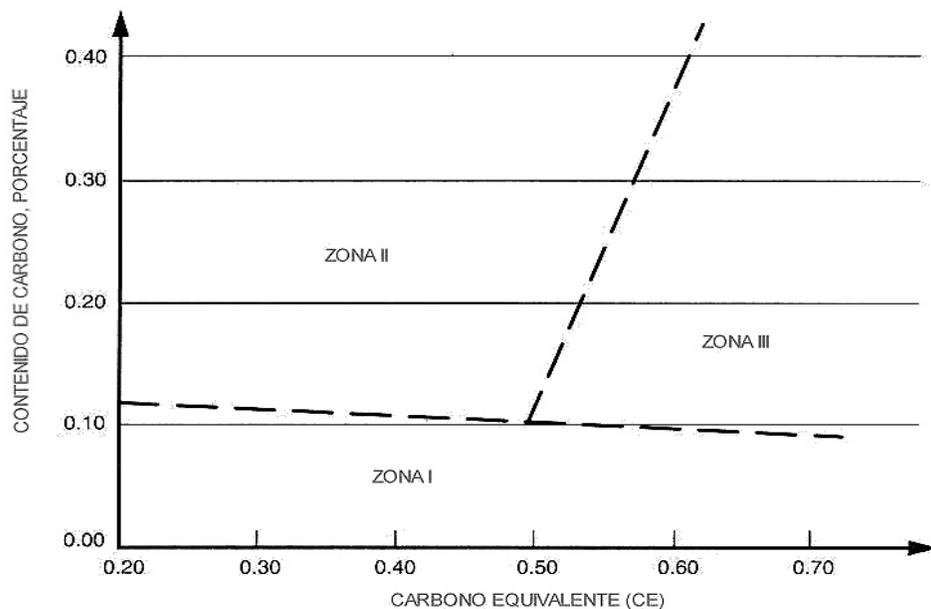
Fuente: elaboración propia.

### 3.3. Procedimientos estudiados de soldadura en fundiciones de hierro

El énfasis de la investigación se genera por la dificultad que presentan las aleaciones hierro-carbono dentro de los procesos de soldadura. Como puede tomarse de referencia, el diagrama de Graville permite evaluar a grandes rasgos la susceptibilidad que presentan dichas aleaciones a la fisuración.

Como puede observarse en la figura 22, se tomó como referencia los valores de carbono equivalente y porcentaje de carbono que las muestras seleccionadas poseen, automáticamente se ubican en la zona III de la gráfica (baja soldabilidad) indicativo que debe aplicarse tratamientos térmicos pre y post soldadura, resaltando la importancia de determinar los valores de temperatura que implican un buen proceso de soldadura.

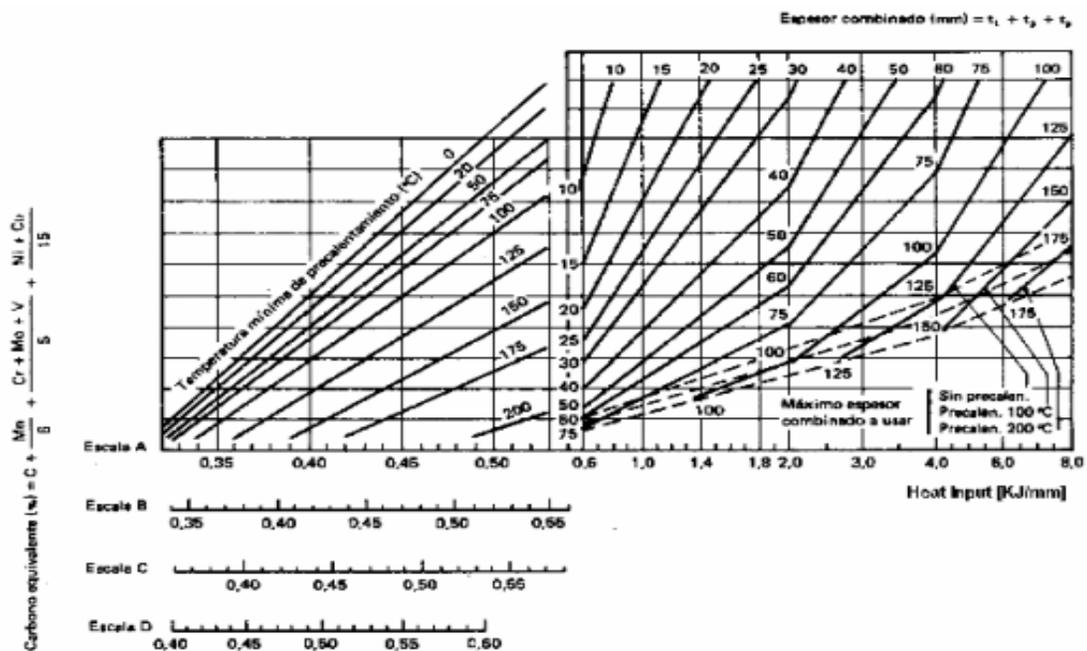
Figura 22. Diagrama de Graville



Fuente: Asta, E. *Fundamentos de la soldadura por arco eléctrico*. (2006). p. 17.

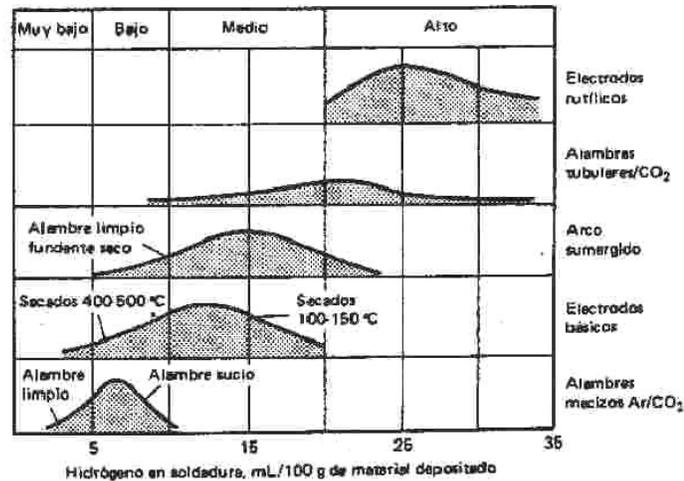
El nomograma de Coe estudiado principalmente en aleaciones hierro-manganeso, indica a grandes rasgos las temperaturas de precalentamiento mínimas que debe poseer dicha aleación para efectuar un proceso de soldadura, el cual puede tomarse como una referencia rápida en una aleación hierro-carbono, la cual incorpora tanto el carbono equivalente, el espesor combinado de la pieza a trabajar en milímetros y la energía producida por el proceso, todo correspondiente a la clasificación por características normadas del material de aporte a utilizar (A, B, C o D). Efectuando un análisis de los materiales ensayados y apoyándose en los diagramas referidos se obtiene que la temperatura mínima de precalentamiento para ambos materiales supera los 200° C de temperatura, siendo necesario comparar con ensayos prácticos la temperatura adecuada para obtener resultados aceptables en los procesos de soldadura.

Figura 23. Nomograma de Coe



Continúa figura 23...

...Continuación de figura 23



Fuente: <http://content.yudu.com/Library/Ar5r/TemperaturaPreHOT/resources/6.htm>.

Consultado: noviembre de 2014

### 3.3.1. Método convencional

El método convencional o común para las fundiciones de hierro consiste en precalentar la pieza a una temperatura considerable, o realizarlo por corto tiempo (conocido también como: sin precalentamiento) y luego efectuar la soldadura. Posterior a efectuada la soldadura, se deja enfriar lentamente inmersa generalmente en cal para que la temperatura disminuya gradualmente y evitar agrietamientos, fractura o debilitamiento de la pieza.

### 3.3.2. Método propuesto

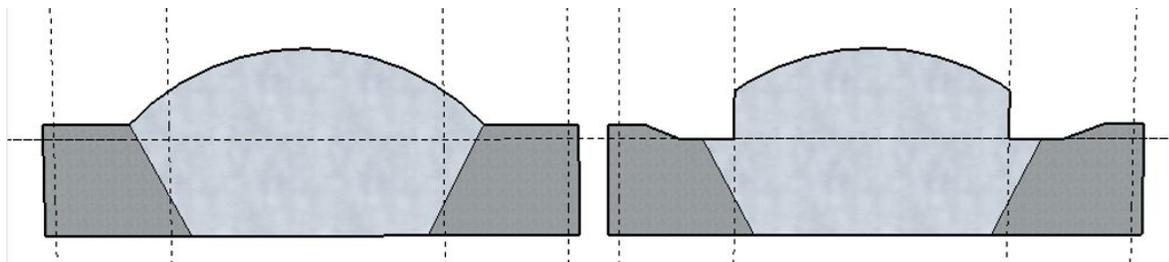
Dichas pruebas se aplican tanto a la fundición gris como a la fundición nodular. De la misma manera que en el método convencional se efectúa la preparación de la pieza, con la única diferencia que el control de las temperaturas es la variante a evaluar.

La aplicación de los cordones de soldadura se efectúa, según la técnica utilizada por Aguilar Rivas (2012), la cual garantiza buena apariencia del proceso final, ausencia de incrustaciones de escoria y porosidades, uniformidad de durezas en la zona trabajada, disminución del aporte térmico y ahorro de material de aporte.

Posterior a la deposición del material de aporte y en caso de ser necesaria la aplicación de más de un cordón de soldadura, se remueven los bordes con pulidora utilizando disco de corte con el propósito de eliminar las secciones irregulares del cordón, poros, incrustaciones y escoria que puedan encontrarse en dichas zonas, y limpieza exhaustiva de la sección a trabajada.

El pulido se efectúa sobre ambos bordes del cordón, realizando dicho proceso hasta eliminar la raíz de los bordes, finalizando con un cordón con sección rectangular como se muestra en la figura 24.

**Figura 24. Preparación de bordes del cordón de soldadura**



Fuente: elaboración propia.

Luego de realizado el procedimiento se procede a efectuar el siguiente paso (cordón), aplicándolo con un 50% de traslape sobre el cordón anterior, teniendo siempre en consideración el aporte térmico que se obtiene durante la deposición del material de aporte, siendo necesaria la aplicación de cordones en forma dispersa u opuesta, según la morfología de la pieza, para evitar curvaturas o deformaciones que comúnmente se generan en el metal base luego de efectuar el procedimiento de soldadura al arco.

Para la realización de pruebas se tomaron en cuenta cuatro temperaturas:

- 200°C de precalentamiento
- 300°C de precalentamiento
- 500°C de precalentamiento
- 300°C con temperatura constante o recalentamiento

Según la tabla I y la figura 12, se observa que a mayor grado de fundición, menor porcentaje de carbono presente; donde se visualiza una variación notable en cuanto a la resistencia del material en función de la temperatura de “no fractura” aplicada a los diferentes grados de fundición, por consiguiente, a mayor contenido de carbono, mayor debe ser la temperatura aplicada a la fundición previo a su intervención en los procesos de soldadura para disminuir la probabilidad de formación de zonas martensíticas y fundición blanca.

Según el Metals Handbook vol. 6 (2005) se menciona que a mayor temperatura de trabajo se obtienen mejores resultados en la pieza.

El rango de variación al seleccionar las temperaturas listadas con anterioridad fue con el propósito de:

- Verificar si existe una diferencia significativa en el resultado final de las piezas al elevar la temperatura durante el precalentamiento (de 200 a 500°C).
- Verificar diferencia entre el rango mínimo de temperatura seleccionado versus temperaturas aleatorias tomadas en el método convencional (sin precalentamiento).
- Verificar si existe variantes en los resultados entre efectuar un precalentamiento a una temperatura elevada y efectuar un precalentamiento a temperatura media pero manteniendo la temperatura a lo largo del proceso.

Los resultados de los incisos anteriores coadyuvan en la evaluación de la reducción de costos representados en el consumo de combustibles o energía eléctrica, para elevar la temperatura al momento de efectuar el proceso de precalentamiento de las piezas.

Al sobrepasar las temperaturas de trabajo arriba de los 723°C, tal como se aprecia en el diagrama de equilibrio Fe-CFe<sub>3</sub>, se ingresa en el rango de temperaturas utilizadas para la realización de tratamientos térmicos en las fundiciones de hierro, tales como: el recocido, normalizado, temple, entre otros; los cuales afectan directamente las propiedades de dureza y modificaciones micro-estructurales de las fundiciones. Por otro lado, lo anterior implica que se debe ejercer un control estricto sobre los niveles de temperatura y velocidad de enfriamiento de la pieza tratada, para no producir cambios estructurales indeseados.

## **4. PROCESO EXPERIMENTAL**

### **4.1. Ensayos de soldadura**

Se efectuaron ensayos con electrodos de níquel y electrodos de níquel-hierro, considerando que son los más comúnmente utilizados y que se encuentran con más facilidad en la industria guatemalteca. Por las propiedades mecánicas finales que presentan dichos electrodos, son los más apegados a la del material base (hierro fundido) como puede identificarse en la figura 11, respecto a niveles de dureza adquiridos.

Dependiendo de la función que realiza cada elemento metálico fabricado con hierro fundido, debe considerarse tanto los acabados como propiedades mecánicas deseadas; Por otro lado, pueden ser utilizados otros tipos de electrodos como por ejemplo el de acero inoxidable, donde se requiera niveles de dureza superiores y propiedades como la tenacidad, tal es el caso en la reparación de dientes de engranajes.

En mecanismos donde existan superficies en contacto y el material base (hierro fundido como elemento secundario) sea de menor dureza que el otro elemento de máquina (elemento principal o crítico en un mecanismo específico), es necesario que el material de aporte luego de aplicado presente propiedades similares a las presentadas inicialmente por el material base. Caso contrario, la reparación efectuada al hierro fundido puede generar desgaste al elemento principal por los picos de dureza, tanto del cordón de soldadura como en las zonas afectadas por el calor.

Por ejemplo, puede mencionarse una tuerca fija (como elemento secundario) y un tornillo sin fin (como elemento principal). Al efectuar reparaciones donde el elemento secundario (hierro fundido) presente una dureza superior a la que poseía inicialmente, seguramente el tornillo sin fin será el que requiera una reconstrucción por el desgaste que la tuerca pueda ocasionarle.

Para la realización de los ensayos de soldadura, se utilizó la siguiente herramienta y materiales:

- 3 lb de electrodo ENiCl (níquel al 99%) y 3 lb ENiFeCl (níquel al 60%) de 1/8"
- Soldadora de arco eléctrico
- Termómetro industrial
- Prensa de banco
- Picador
- Cepillo de alambre
- Equipo oxiacetilénico con boquilla para calentamiento
- 1 saco de cal hidratada
- Sierra eléctrica tipo vaivén

Para la realización de los ensayos de soldadura a diferentes grados de temperatura se tomaron las siguientes consideraciones:

- Para las probetas de 200°C, 300°C y 500°C:
  - Pre calentamiento de la pieza hasta la temperatura indicada
  - Realización del cordón de soldadura

- Limpieza y remoción de escoria, preparación (limpieza) y deposición del segundo cordón de soldadura
  - Cubrir pieza inmediatamente con cal para enfriamiento lento
- Para las probetas de 300°C con recalentamiento (o control de temperatura constante a lo largo del proceso) se tomaron las siguientes consideraciones:
    - Precalentamiento de la pieza hasta la temperatura indicada (300°C)
    - Realización del cordón de soldadura
    - Primer control de temperatura (300°C); efectuar calentamiento en caso de ser necesario
    - Limpieza y remoción de escoria y preparación de la pieza
    - Segundo control de temperatura (300°C); efectuar calentamiento en caso de ser necesario
    - Deposición del segundo cordón de soldadura
    - Cubrir pieza inmediatamente con cal para enfriamiento lento

#### **4.2. Ensayos de dureza**

Para la realización de los ensayos, tanto de dureza como metalográficos, se efectuó el corte de la sección de cada probeta con una sierra eléctrica, tipo vaivén de bajas revoluciones para evitar el aumento de la temperatura de las probetas durante el proceso de corte y evitar la acritud producida por el trabajo mecánico, para evitar el cambio en la microestructura del metal y modificación en los niveles de dureza de los resultados originales.



## 5. RESULTADOS

### 5.1. Fundición gris

Los resultados de dureza obtenidos en las probetas de fundición gris (bloque de motor) se representan en las tablas IV y V, donde se observan los promedios obtenidos en cada uno de los puntos ensayados (columna izquierda) por cada una de las cuatro temperaturas seleccionadas, tanto con electrodo (ENiFeCl), como con electrodo (ENiCl); de igual forma se visualiza la curvas generadas en las figuras 25 y 26, donde se evidencia la variación de los picos de dureza a medida que se modifican las temperaturas de precalentamiento:

Tabla IV. Ensayos de dureza; material de aporte: ENiFeCl fundición gris

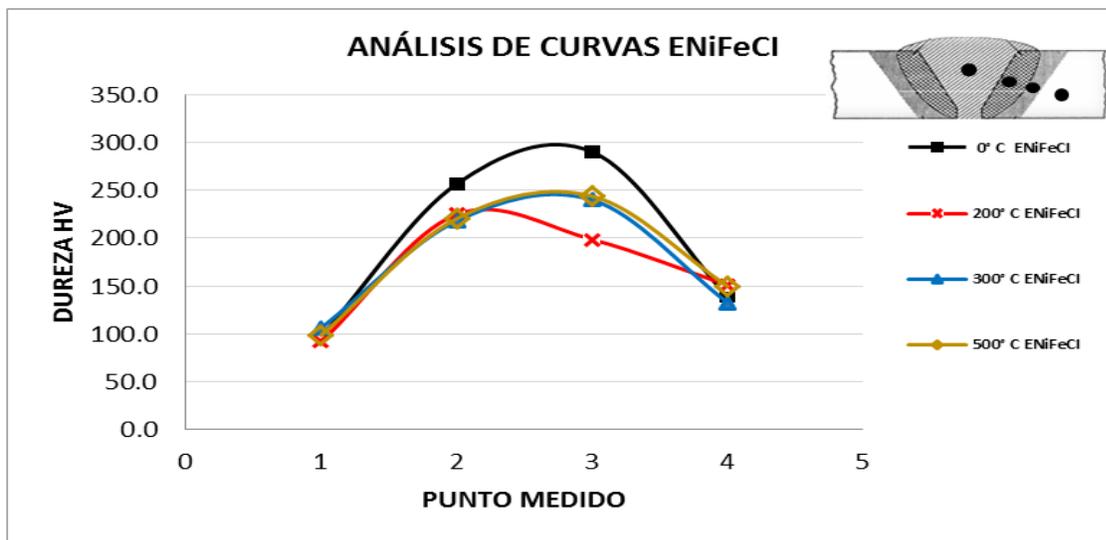
PUNTO	Probetas a 0° C con ENiFeCl				Probetas a 200° C con ENiFeCl				Probetas a 300° C con ENiFeCl				Probetas a 500° C con ENiFeCl			
	A (HV)	B (HV)	C (HV)	0° C ENiFeCl	A (HV)	B (HV)	C (HV)	200° C ENiFeCl	A (HV)	B (HV)	C (HV)	300° C ENiFeCl	A (HV)	B (HV)	C (HV)	500° C ENiFeCl
1 CORDÓN	90	97	104	97	92	95	88	92	105	111	102	106	93	88	115	99
2 FUSIÓN	262	268	240	257	221	262	192	225	215	224	215	218	229	207	225	220
3 ZAC	265	281	325	290	185	196	215	199	265	204	251	240	251	239	242	244
4 BASE	90	97	104	97	92	95	88	92	105	111	102	106	93	88	115	99

Fuente: elaboración propia.

Las columnas A, B y C representan cada una de las probetas realizadas con las temperaturas elegidas. Los puntos seleccionados medidos en la fundición gris difieren con los puntos medidos en la fundición nodular debido a la variación en la forma que el grafito se encuentra disuelto en cada tipo de fundición, presentando notables variaciones de dureza al aplicar mediciones sobre una hojuela de grafito, comparado con mediciones sobre los nódulos en

el otro tipo de fundición, facilitando efectuar medidas en superficies puntuales y más cercanas sobre una fundición nodular que en una fundición gris.

Figura 25. Curvas de dureza fundición gris con ENiFeCl



Fuente: elaboración propia.

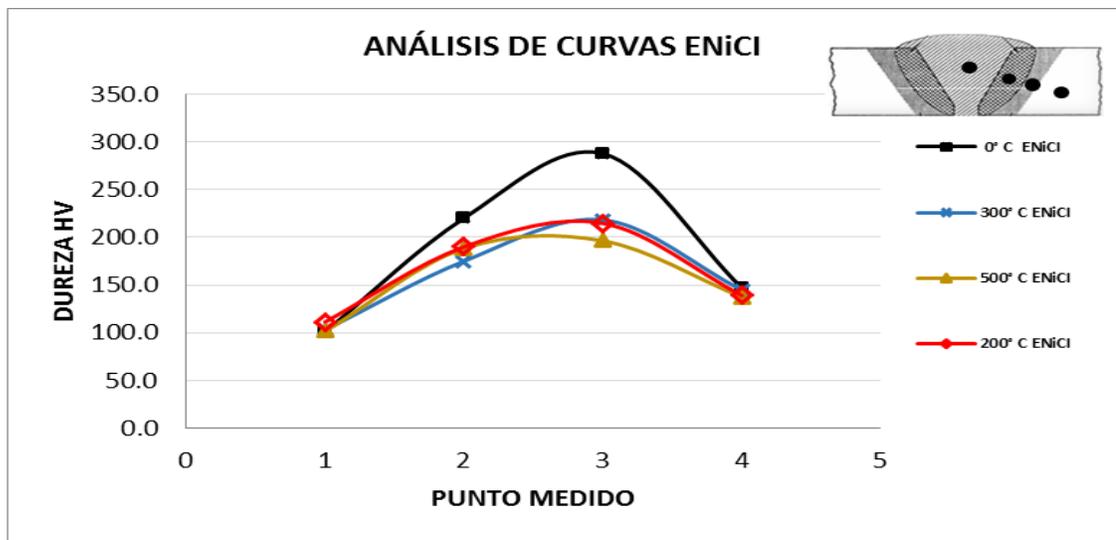
Cada uno de los puntos, (Cordón, Fusión, ZAC y Base), trazan la tendencia de cada resultado al aplicar las temperaturas de precalentamiento seleccionadas, identificándose en la columna derecha con la figura y temperatura correspondiente. El análisis de resultados de cada una de las curvas se realiza en el capítulo 6 del documento.

Tabla V. Ensayos de dureza; material de aporte: ENiCl fundición gris

PUNTO	Probetas a 0° C con ENiCl				Probetas a 200° C con ENiCl				Probetas a 300° C con ENiCl				Probetas a 500° C con ENiCl			
	A (HV)	B (HV)	C (HV)	0° C ENiCl	A (HV)	B (HV)	C (HV)	200° C ENiCl	A (HV)	B (HV)	C (HV)	300° C ENiCl	A (HV)	B (HV)	C (HV)	500° C ENiCl
1 CORDÓN	108	93	102	101	110	92	132	111	92	111	106	103	101	102	102	102
2 FUSIÓN	196	269	195	220	198	195	177	190	138	239	148	175	136	192	237	188
3 ZAC	321	273	269	288	253	215	176	215	224	238	193	218	181	190	218	196
4 BASE	179	127	135	147	157	107	153	139	133	110	191	145	159	100	153	137

Fuente: elaboración propia.

Figura 26. Curvas de dureza fundición gris con ENiCl



Fuente: elaboración propia.

## 5.2. Fundición nodular

Los resultados de dureza obtenidos en las probetas de fundición nodular (tubería) se plasman en las tablas VI y VII, las curvas características representadas en las figuras 27 y 28, efectuados con ambos tipos de electrodo (Níquel y Níquel-Hierro) e iguales temperaturas de precalentamiento

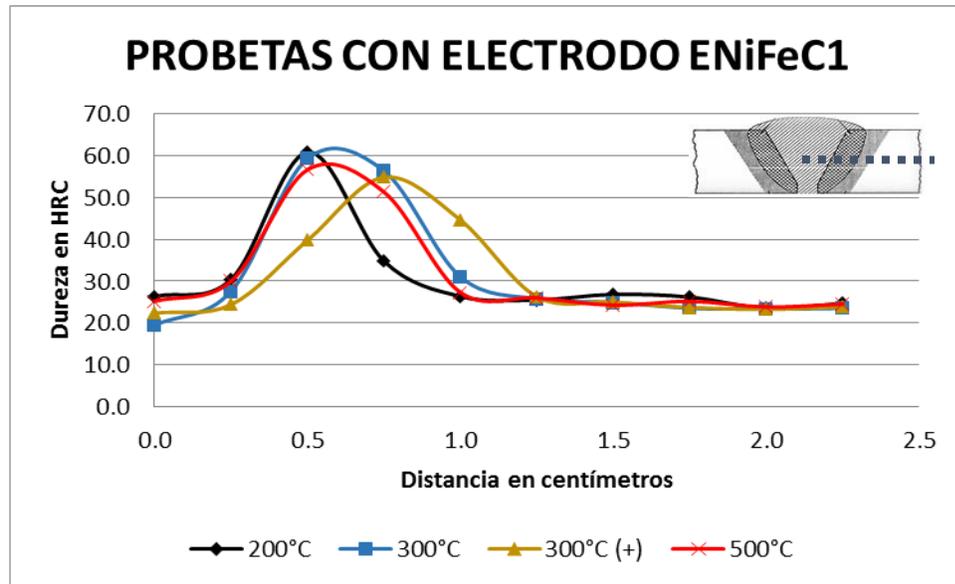
seleccionadas en el caso de las probetas de fundición gris. Los puntos medidos (columna izquierda), se efectuaron a partir del centro del cordón de soldadura en dirección al material base a (0.25 cm) entre cada punto, para poder observar el comportamiento del material a medida que se aleja del centro del cordón de soldadura. La temperatura de 300° C (+) representa un precalentamiento de 300° C constante a lo largo de todo el proceso.

**Tabla VI. Ensayos de dureza a partir del cordón de soldadura; distancia: 2.5mm, material de aporte: ENiFeCI fundición nodular**

D (cm)	Probetas a 200° C con ENiFe				Probetas a 300° C con ENiFe				Probetas a 500° C con ENiFe				Probetas 300° C con ENiFe doble calentamiento			
	A (HRC)	B (HRC)	C (HRC)	PROM	A (HRC)	B (HRC)	C (HRC)	PROM	A (HRC)	B (HRC)	C (HRC)	PROM	A (HRC)	B (HRC)	C (HRC)	PROM
0.0	23.0	32.0	24.0	26.3	22.5	16.0	20.0	19.5	25.5	24.0	23.0	24.2	25.0	21.1	27.0	22.3
0.25	25.3	33.8	32.3	30.4	28.8	25.0	29.0	27.6	23.8	26.8	25.0	25.2	48.3	23.8	47.3	24.4
0.5	60.0	60.0	62.5	60.8	59.0	59.0	60.0	59.3	35.0	27.8	27.3	30.0	58.0	51.0	55.5	39.8
0.75	32.8	34.5	37.0	34.8	58.0	56.0	55.0	56.3	57.5	56.5	56.0	56.7	44.5	44.3	45.0	54.8
1.0	27.0	27.0	25.0	26.3	29.0	33.3	30.8	31.0	60.8	43.4	49.8	51.3	30.0	23.0	25.8	44.6
1.25	31.0	25.5	20.0	25.5	27.8	24.5	25.0	25.8	30.0	24.6	27.3	27.3	28.0	23.3	23.8	26.3
1.5	27.8	30.3	22.5	26.8	24.5	24.8	25.5	24.9	26.5	26.5	25.0	26.0	26.0	21.0	24.0	25.0
1.75	27.5	31.5	19.5	26.2	20.0	26.6	24.0	23.5	26.0	23.8	23.0	24.3	22.5	24.3	23.0	23.7
2.0	27.0	25.5	18.0	23.5	21.5	25.2	23.3	23.3	26.5	23.5	25.5	25.2	25.0	23.3	23.3	23.3
2.25	25.0	26.0	23.0	24.7	22.0	24.0	24.5	23.5	23.7	23.8	24.0	23.8	23	25	25.5	24.5

Fuente: elaboración propia.

Figura 27. Curvas de dureza a partir del cordón de soldadura ENiFeCl fundición nodular



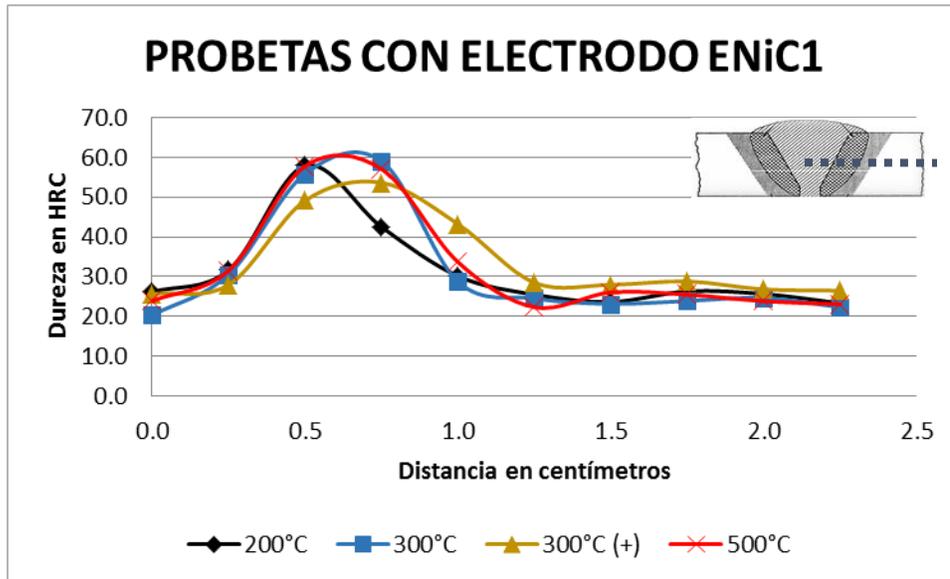
Fuente: elaboración propia.

Tabla VII. Ensayos de dureza a partir del cordón de soldadura; distancia: 2.5mm, material de aporte: ENiCl fundición nodular

D (cm)	Probetas a 200° C con ENiCl				Probetas a 300° C con ENiCl				Probetas a 500° C con ENiCl				Probetas a 300° C con ENiCl doble calentamiento			
	A (HRC)	B (HRC)	C (HRC)	PROM	A (HRC)	B (HRC)	C (HRC)	PROM	A (HRC)	B (HRC)	C (HRC)	PROM	A (HRC)	B (HRC)	C (HRC)	PROM
0.0	31.0	24.5	23.0	26.2	21.5	20.5	19.0	20.3	24.0	26.8	21.0	23.9	30.0	30.0	17.0	25.7
0.25	35.0	31.0	29.0	31.7	27.5	34.5	29.8	30.6	30.8	41.0	23.0	31.6	36.0	28.0	20.0	28.0
0.5	61.0	53.0	59.8	57.9	54.3	56.5	57.0	55.9	60.5	57.0	56.0	57.8	57.5	61.0	29.0	49.2
0.75	47.5	37.0	43.0	42.5	57.8	59.5	60.0	59.1	56.3	58.5	56.5	57.1	55.0	58.0	48.0	53.7
1.0	35.5	23.5	31.5	30.2	26.8	30.0	29.5	28.8	32.3	36.8	32.0	33.7	38.8	45.0	46.0	43.3
1.25	27.5	23.0	26.0	25.5	22.0	26.0	25.5	24.5	21.0	18.0	28.0	22.3	32.0	30.0	23.5	28.5
1.5	24.0	24.0	23.0	23.7	23.0	24.3	22.3	23.2	20.5	30.8	27.0	26.1	30.0	29.0	25.0	28.0
1.75	27.0	27.0	25.0	26.3	25.3	21.5	25.0	23.9	22.5	27.0	27.0	25.5	31.0	28.5	27.0	28.8
2.0	27.0	24.0	26.0	25.7	28.0	19.0	27.0	24.7	17.5	25.0	29.0	23.8	29.5	27.0	24.0	26.8
2.25	23.0	23.0	24.0	23.3	19.0	23.0	25.0	22.3	18.8	23.0	27.5	23.1	29.0	25.0	25.5	26.5

Fuente: elaboración propia.

Figura 28. Curvas de dureza a partir del cordón de soldadura ENiCl fundición nodular



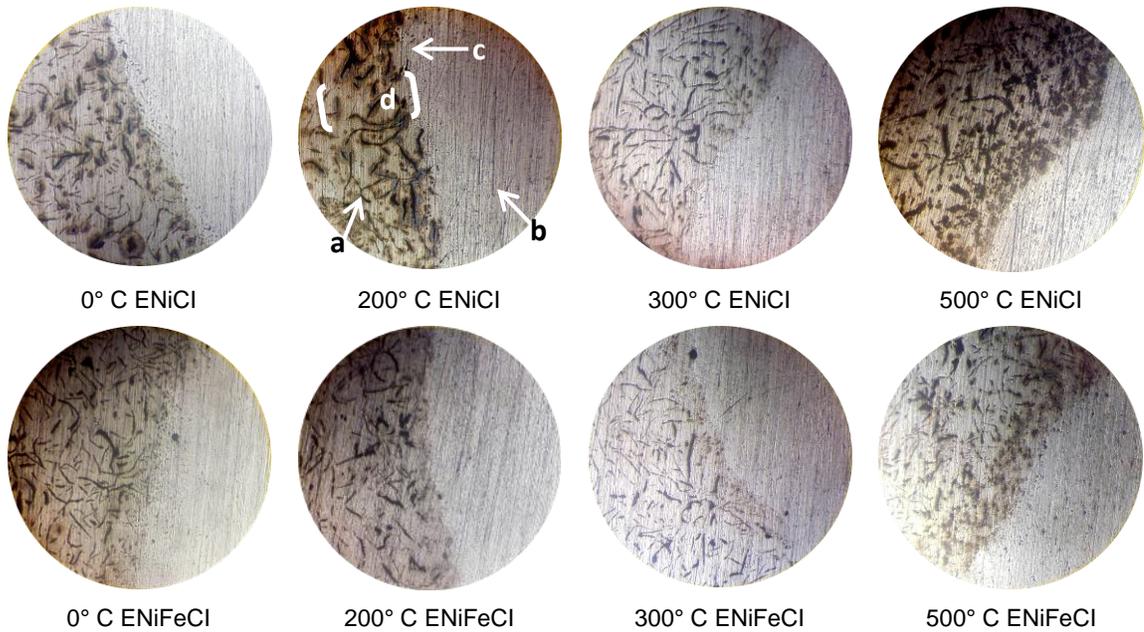
Fuente: elaboración propia.

### 5.3. Ensayos metalográficos

Los ensayos metalográficos fueron efectuados principalmente en la zona conformada por:

- Cordón de soldadura (Material de aporte)
- Zona de fusión del material base con el material de aporte
- Zona afectada por el calor

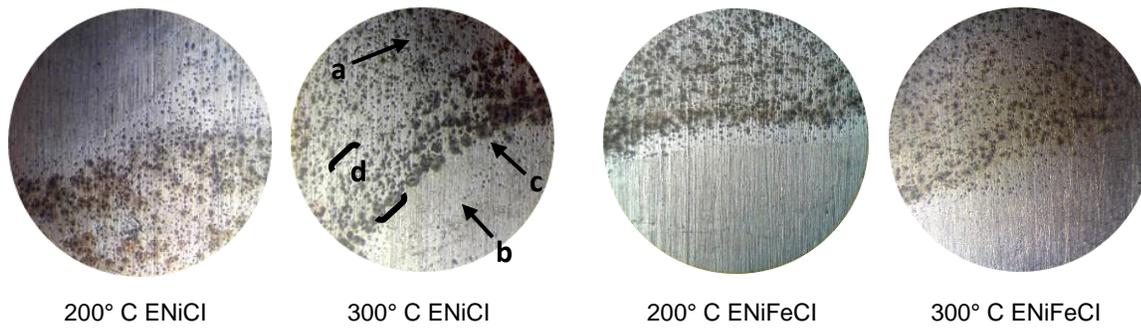
Figura 29. Micrografía de resultados fundición gris aumento de x100



- Material Base (fundición gris)
- Material de Aporte (electrodo)
- Zona de fusión
- Zona afectada por el calor (ZAC)

Fuente: elaboración propia.

Figura 30. **Micrografía de resultados fundición nodular aumento de x100**



- Material Base (fundición nodular)
- Material de Aporte (electrodo)
- Zona de fusión
- Zona afectada por el calor (ZAC)

Fuente: elaboración propia.

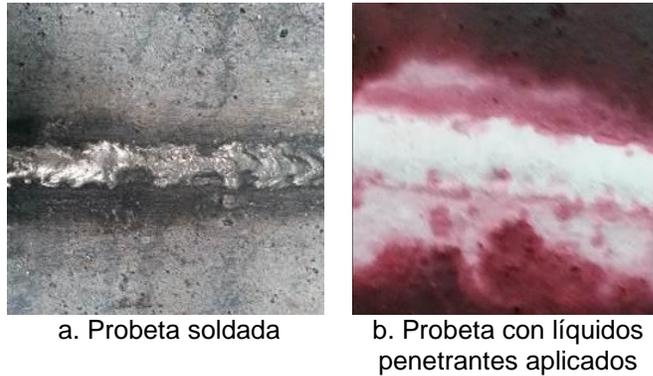
En las figuras 29 y 30, se observa un cambio en la microestructura de las probetas a medida que se aumenta la temperatura de precalentamiento del proceso, y el comportamiento de los materiales al momento de fusionarse (material base y material de aporte) según las temperaturas estudiadas para el proceso de soldadura. A medida que aumenta la temperatura de precalentamiento puede notarse mayor dispersión del grafito (según su disposición y forma) en la zona de fusión, mientras que a temperaturas de precalentamiento menores se hace evidente cierta división existente entre ambos materiales.

## 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Basado en los resultados de dureza obtenidos, micrografías realizadas, incidentes ocurridos y condiciones presentadas durante la realización de los ensayos de soldadura plasmados en el capítulo 5, se efectúa una serie de análisis expuestos a continuación, clasificados por tipo de electrodo utilizado y temperaturas de trabajo:

Durante la realización de los ensayos de soldadura se presentó el defecto de sobrefusión o exceso de fusión, en la mayoría de las probetas sin precalentamiento o precalentadas a 200° C de temperatura al momento de la deposición del material de aporte, el material requería menor velocidad de avance para efectuar una penetración y fusión apropiada del material debido que el electrodo no se fundía adecuadamente, por consiguiente el material base no soportaba la temperatura generada en el proceso desfundando el talón y mostrando poros, los cuales revelan una mala presentación pero no son significativos para el rechazo del cordón de soldadura, al momento de realizar ensayos de líquidos penetrantes, como se muestra en la figura 31.

Figura 31. **Efectos de baja temperatura de precalentamiento ( $\leq 200^{\circ}\text{C}$ )**



Fuente: elaboración propia.

Los ensayos efectuados a partir de los  $300^{\circ}\text{C}$  de temperatura, representados en la figura 32, mostraron una mejora en la presentación y facilidad al momento de la deposición del material de aporte; sin embargo, aumenta el riesgo de desfundarse el talón del bisel durante la realización del cordón por exceso de temperatura aplicado, como ocurrió en algunas de las probetas.

Figura 32. **Efectos de temperaturas de precalentamiento mayores a los  $300^{\circ}\text{C}$**



Fuente: elaboración propia.

Durante la aplicación de los cordones de soldadura a temperatura constante de 300° C, a lo largo del proceso no se presentó ninguna complicación, no obstante en el momento de efectuar las mediciones de temperatura en los períodos indicados, se verificó que la velocidad de enfriamiento de la pieza inmediatamente terminado el primer cordón de soldadura fue significativa disminuyendo hasta los 150° C, siendo necesario efectuar un segundo calentamiento para elevar la temperatura al rango establecido.

- En cuanto al proceso se puede mencionar lo siguiente:

Durante el proceso de soldadura se presentó una mala soldabilidad en las probetas con precalentamiento a 200° C, difícil manejo del electrodo, dificultad en la fusión, formación de poros, mala apariencia de los cordones de soldadura y desfunde de talón por el aumento de temperatura debido a la necesidad de reducir la velocidad de avance durante la deposición del material de aporte.

Los ensayos efectuados con precalentamientos a 300° C manifestaron mejor soldabilidad, facilidad en cuanto al manejo del electrodo durante su deposición, y mejor presentación.

Con respecto a las probetas con temperaturas de precalentamiento a 500° C, se comportaron de manera similar a las probetas precalentadas a 300° C, con el único inconveniente de aumento del riesgo en cuanto al desfunde del talón del bisel por las altas temperaturas iniciales, aumento de las mismas por el aporte térmico durante la deposición y reducción de la velocidad de avance de manera inconsciente; ocurría dicho inconveniente especialmente con el electrodo ENiCl.

En cuanto a las probetas que se trabajaron con una temperatura constante a lo largo de todo el proceso de soldadura (300° C), pudo comprobarse que la temperatura total generada disminuía a un ritmo considerablemente alto, por lo que era necesario calentar nuevamente la pieza para elevar a los rangos de temperatura establecidos. Se confirma, con dichas mediciones de temperatura efectuadas durante todo el proceso, que a mayor volumen de la pieza trabajada, mayor rapidez de enfriamiento por balance de temperaturas internas.

En cuanto a las probetas trabajadas con temperatura constante de 300° C, se obtuvieron los mismos resultados en cuanto al manejo y resultados que las probetas precalentadas a 300° y 500° C, con la única diferencia que las probetas trabajadas con electrodo ENiCl revelaron incrustaciones de escoria superficiales dispersas y de poca profundidad debido al exceso de temperatura acumulada, mas no relevantes, sobre el cordón de soldadura, posiblemente causantes de las variaciones en los resultados de dureza, presentando así una curva característica, mas no uniforme con respecto a las demás curvas de dureza efectuadas, como se indica a continuación en los análisis de resultados de dureza.

Los efectos del exceso de temperatura por el aporte térmico producido al aplicar cordones de soldadura largos (mayores a 5 cm) y efectuados a una temperatura constante (con el apoyo de una antorcha o multiflama), se muestran en la figura 33, donde la piscina de metal fundido no solidifica instantáneamente, si no se contempla la velocidad de aumento en la temperatura.

Figura 33. **Superficies de cordón de soldadura generadas con electrodo ENiCl con exceso de temperatura >300° C**



Irregularidades sobre cordón de soldadura

Fuente: elaboración propia.

Puede observarse en la figura 33 una superficie irregular no definida del cordón de soldadura (cráteres), producido por la dispersión de los residuos e impurezas de escoria generados durante el proceso de soldadura, que al no solidificar instantáneamente la piscina de fundición, se presentan flotando sobre el cordón y debajo de la capa de escoria generada, plasmando las formas irregulares de las mismas como un troquelado.

- En el caso de los ensayos de dureza efectuados se presentan las características observadas en las siguientes comparaciones:

Figura 34. **Curvas características con las diferentes temperaturas de trabajo (fundición gris)**

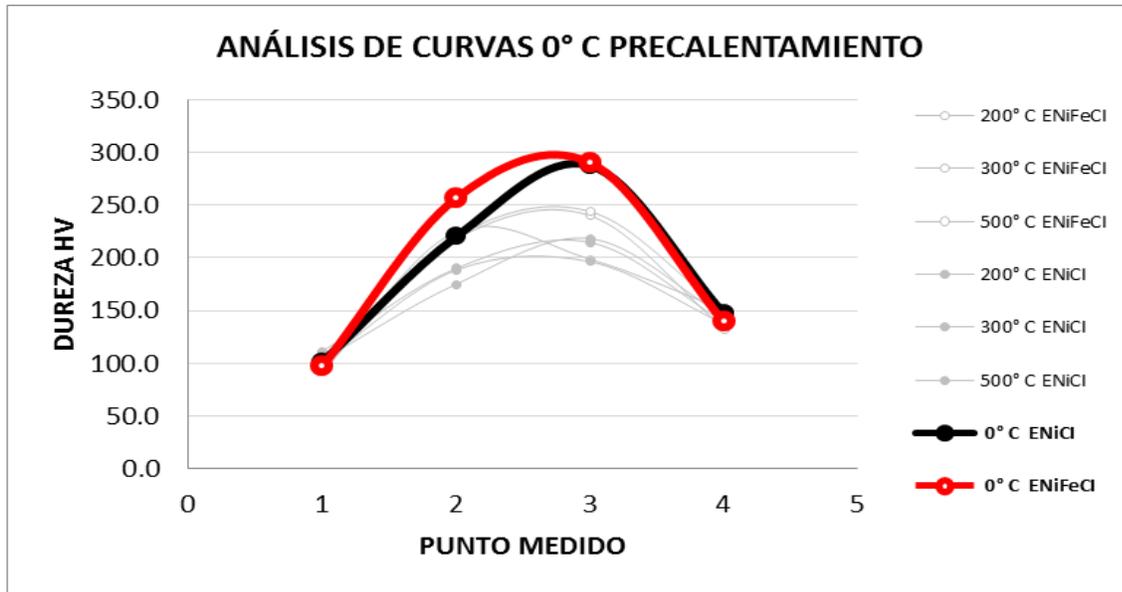


Figura 34.1

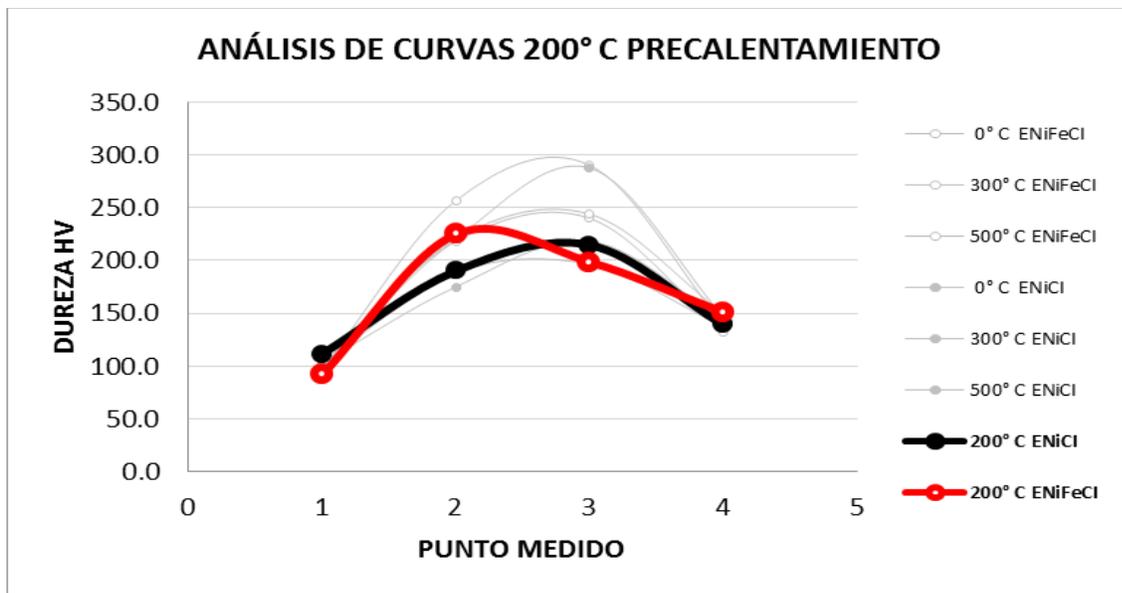


Figura 34.2

Continúa figura 34...

...Continuacion de figura 34.

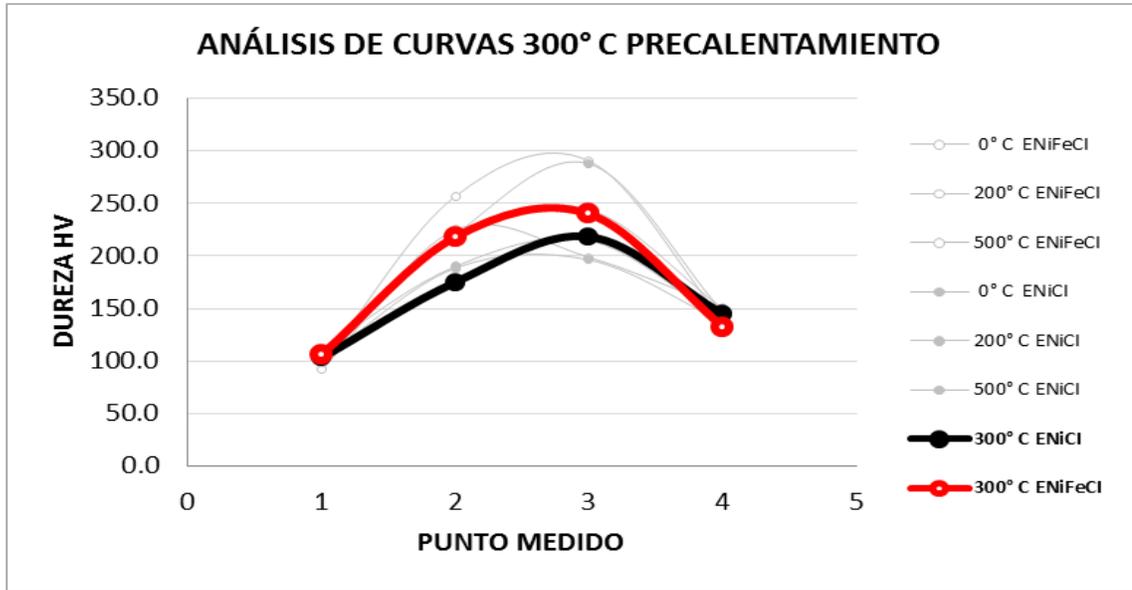


Figura 34.3

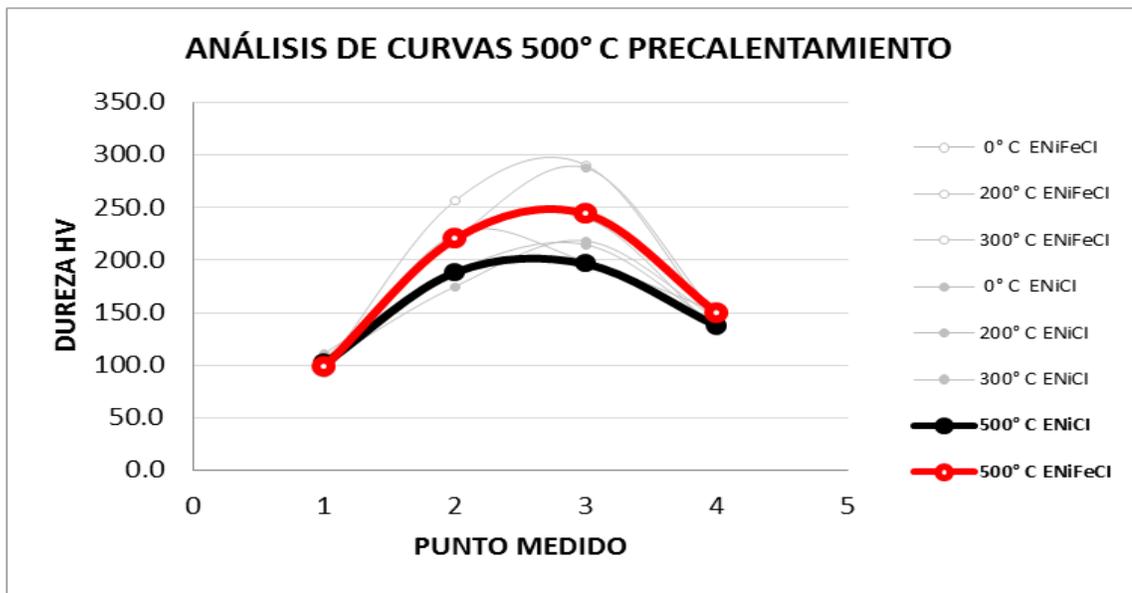


Figura 34.4

Fuente: elaboración propia.

Figura 35. Curvas características con las diferentes temperaturas de trabajo (fundición nodular)

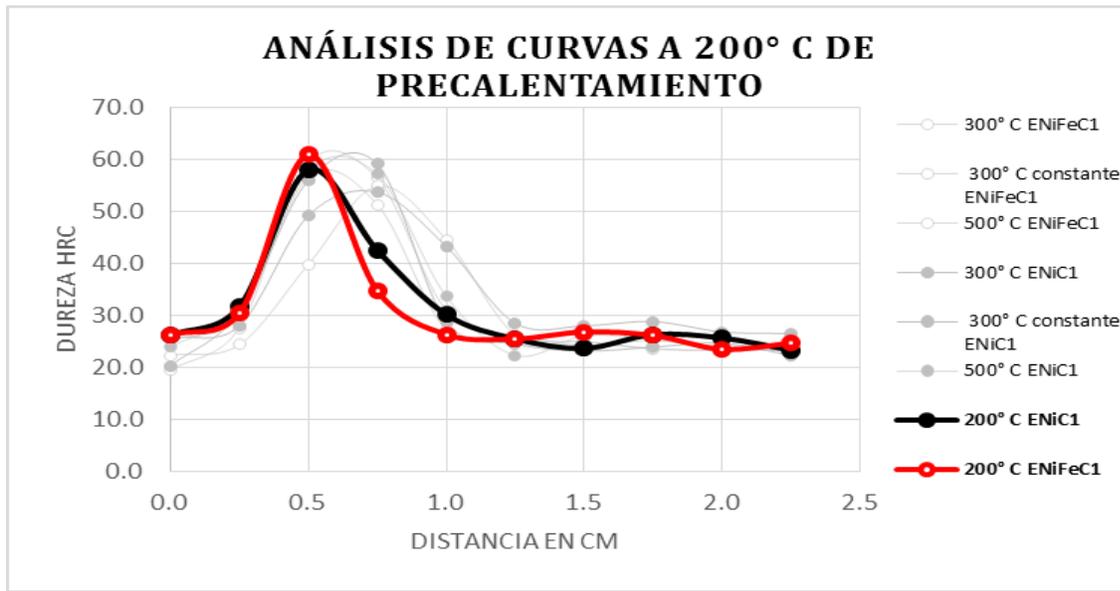


Figura 35.1

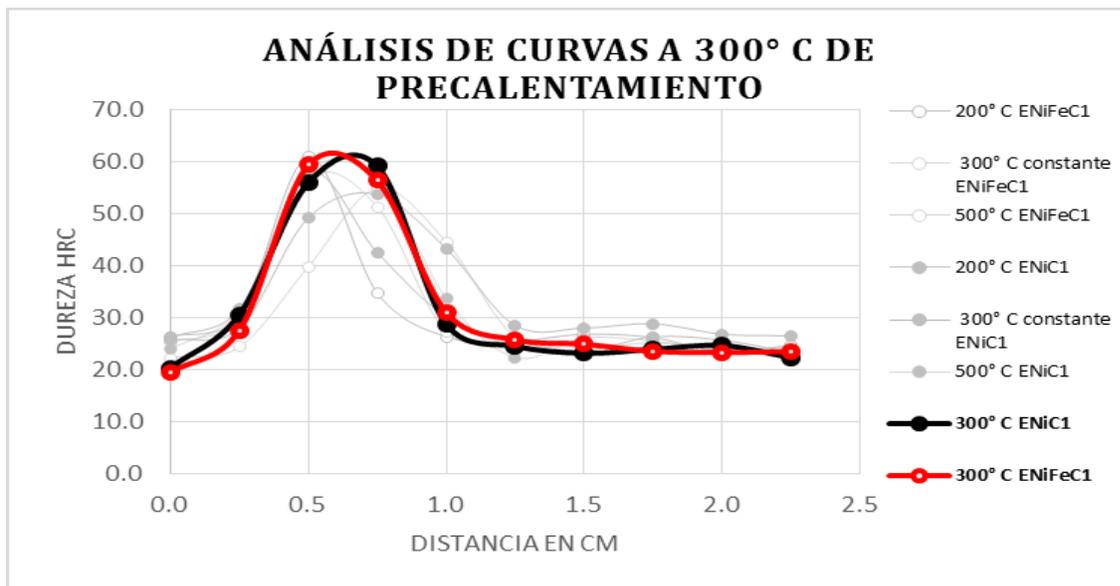


Figura 35.2

Continúa figura 35...

...Continuacion de figura 35.

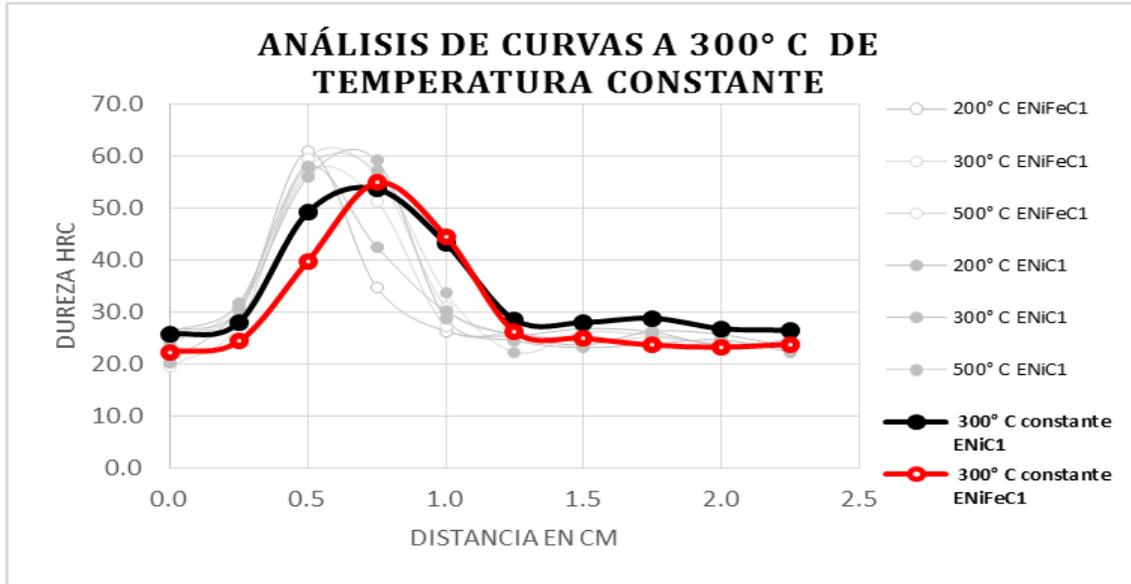


Figura 35.3

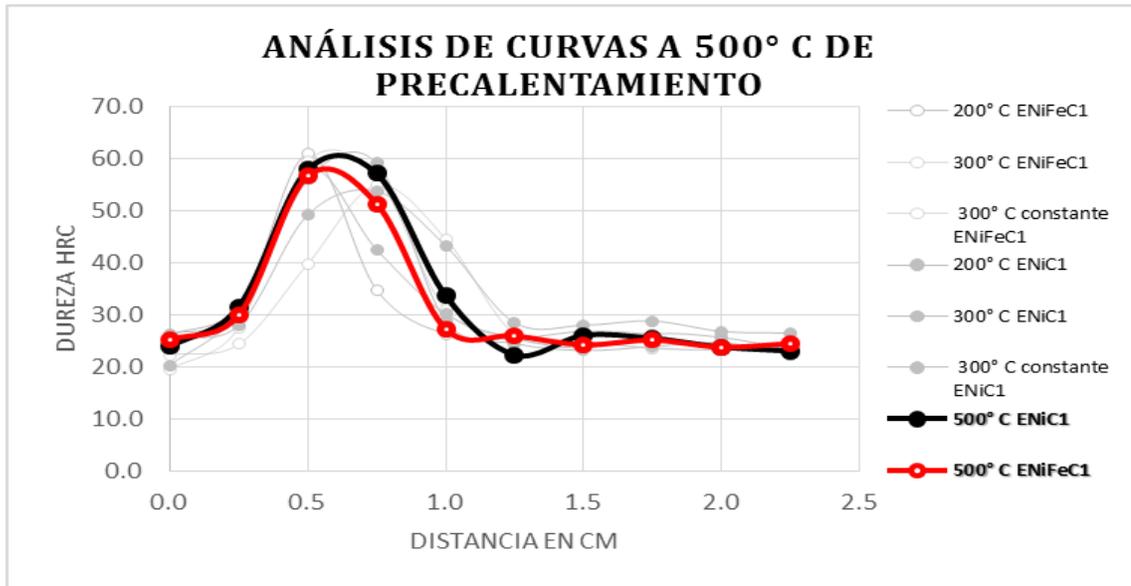


Figura 35.4

Fuente: elaboración propia.

Las curvas que se visualizan en las gráficas de las **figuras 34 y 35**, muestran patrones de comportamiento similares entre sí en cuanto a forma y dureza, en el caso de cada temperatura evaluada con diferente tipo de electrodo en ambos tipos de material base (fundición gris y fundición nodular). Puede observarse la variación que presenta cada tipo de fundición representadas en el conjunto de curvas plasmadas en contraste de las curvas seleccionadas en cada una de las figuras, marcadas con negrilla para su realce, facilitar su identificación, análisis y material de aporte utilizado.

- Las diferencias que pueden notarse con las distintas temperaturas de precalentamiento y con electrodo ENiFeCl son:

Las zonas máximas de dureza se concentran sobre el tercer punto efectuado, el cual corresponde a la región de fusión del material de aporte con el material base, lo que comprueba la formación de zonas duras debajo del cordón de soldadura.

Las campanas de dureza se originan a partir del punto (2) de la gráfica a partir del centro del cordón de soldadura y previo a la zona de fusión de los materiales.

La dureza máxima presentada corresponde a las piezas tratadas con precalentamiento a 200° C, y la campana finaliza bruscamente entre el punto (2) y el punto (4) de la gráfica. Se puede observar que existe una disminución de la dureza máxima (ocurrida en probetas con precalentamiento a 200° C) o pico a medida que aumenta la temperatura de precalentamiento aplicada.

Ocurre un desplazamiento y distribución de dureza, la cual no se muestra de manera puntual, como se visualiza en los ensayos con precalentamiento a

200° C, sino que se desplaza levemente sobre la zona afectada por el calor (ZAC) y el material base; tales casos ocurren a partir de los 300° C de temperatura, abarcando la zona de dureza hasta el punto (5) de la gráfica.

Entre las curvas de 300° C y 500° C, el patrón de inicio y fin de zona de dureza, concuerdan en ambas temperaturas; aunque no es de gran significancia, los picos de dureza disminuyen gradualmente al aumentar la temperatura.

En relación al aumento y disminución de durezas, las tratadas a temperatura constante de 300° C presenta el pico más bajo del resto de curvas y mayor distribución y uniformidad en cuanto a la forma de la campana producida con pendientes menores, abarcando una mayor zona y dureza hasta el punto (6) de la gráfica.

- Resultados del empleo de distintas temperaturas de precalentamiento con electrodo ENiCl:

Las características presentadas por las probetas trabajadas con electrodo ENiCl presentan patrones similares a las probetas trabajadas con ENiFeCl, con la única diferencia de los picos de dureza mostrados.

Las probetas tratadas a 200° C y con electrodo ENiCl presentan una menor dureza que las trabajadas con electrodo ENiFeCl, aunque misma distribución de la curva aumentando el área como las probetas trabajadas a 300° C con electrodo ENiFeCl.

En cuanto a comparaciones entre picos de durezas de ambas gráficas se visualiza que el pico de las probetas trabajadas con ambos tipos de electrodo a

300° C de precalentamiento, poseen la misma dureza, mientras que con las probetas tratadas a 500° C poseen menor dureza las trabajadas con electrodo ENiFeCl. Un punto importante que también se contempla es que los picos de dureza de probetas tratadas a 500° C con electrodo ENiCl y a 300° C con electrodo ENiFeCl presentan las mismas características, no solo en cuanto a dureza, sino a la distribución de las curvas.

A pesar que ambos tipos de electrodo ensayados se mantienen en un rango muy apegado a la fundición de hierro gris, su selección se debe basar según los resultados y acabados finales esperados. Dependiendo de los requerimientos en cuanto a propiedades mecánicas de las piezas a trabajar, será el tipo de material de aporte a utilizar, ya sea que se precise un acabado que requiera niveles de maquinación y, aunque mínima, cierta ductilidad; si es necesaria una mayor dureza en la superficie, o requiera la utilización de ambos tipos de electrodo. Los resultados dependerán de las temperaturas de trabajo, y asumiendo que las temperaturas utilizadas son las ideales, los electrodos de níquel (ENiCl) presentan una mayor ductilidad que el electrodo níquel-hierro (ENiFeCl).

En cuanto a la distribución sobre las áreas afectadas, las probetas trabajadas con electrodo ENiCl, se observa una leve tendencia en cuanto al aumento del área que las curvas trazan. Dichos resultados coinciden con lo descrito por Cembrero y Pascual (1999), donde presentan los resultados de soldabilidad en fundiciones de hierro nodular con electrodo níquel al 58% y níquel al 94%, indicando patrones de fractura en zonas del cordón de soldadura y poco ángulo de doblez sin efectuar precalentamientos; desplazamiento de la fractura a la zona afectada por el calor y mayor ángulo de doblez al aplicar precalentamientos; puede reiterarse en los resultados obtenidos en la presente investigación, que a mayor temperatura de trabajo, menores valores en los

picos de dureza y desplazamiento de las curvas de dureza de la zona de fusión a la zona afectada por el calor.

Los resultados finales en una reconstrucción o reparación de piezas por medio de procesos de soldadura, específicamente al arco “SMAW”, sobre una pieza de fundición gris (propiedades y cambios microestructurales) se reflejarán directamente en la aplicación de tratamientos térmicos adecuados (pre, durante y posterior al proceso de soldadura) y con la utilización de la temperatura adecuada ( $300\text{ }^{\circ}\text{C} \leq T\text{ }^{\circ}\text{C} < 400\text{ }^{\circ}\text{C}$  de forma constante) según se observa en los resultados plasmados en el capítulo 5 y el método referido en el capítulo 3.

Puede concluirse también con dichos análisis que, a pesar que se obtienen resultados con mayor ductilidad con el electrodo ENiCl que con el electrodo ENiFeCl, ocurren al realizarlos a menores rangos de temperatura, de lo contrario aumenta la dureza a los niveles que presenta el electrodo ENiFeCl, culminando en resultados similares a los electrodos tratados a menor temperatura. Al trabajarlos en el rango de temperaturas de  $300^{\circ}\text{C}$  a  $400^{\circ}\text{C}$  se obtienen similares resultados de dureza en ambos tipos de electrodo, aunque la dureza abarca una mayor zona con el electrodo ENiCl.

Los resultados satisfactorios en cuanto a las sollicitaciones mecánicas requeridas en un trabajo con soldadura al arco eléctrico sobre una pieza de fundición gris, se verá reflejado no solamente con el tipo de material de aporte utilizado y la temperatura contemplada para el proceso, sino considerando al mismo tiempo las condiciones ambientales en torno al mismo, rapidez de avance (por el comportamiento del electrodo al fundirse), longitudes y orden de realización de los cordones de soldadura efectuados. Se requieren ambientes secos, sin humedad ni ráfagas de viento; aunque se obtienen mejores resultados a temperaturas relativamente altas, el exceso de temperaturas

perjudicará la continuidad del proceso, siendo necesario el efectuar cordones de soldadura cortos (entre 5 a 8 cm), a partir de los 5 cm, se manifiesta visualmente los aumentos de temperatura excesivos por el aporte térmico; y finalmente aplicando la técnica de soldeo mencionada en el Capítulo 3, inciso 3.3.2, figura 24, especialmente si se necesita más volumen de material de aporte o donde exista traslape entre cordones de soldadura.

## 7. CONSIDERACIONES PARA LA SELECCIÓN DEL MÉTODO

Según las consideraciones observadas en el análisis de resultados podemos tomar una referencia del comportamiento de ambos materiales (material base: fundición gris - material de aporte: electrodos para hierro fundido), para definir un procedimiento que se apegue a las características iniciales que presenta el material base previo a su intervención. A continuación se mencionan tres consideraciones principales:

- Resultados finales basado en la temperatura de trabajo
- Forma de deposición del cordón de soldadura
- Resultados obtenidos con los materiales de aporte evaluados

### 7.1. Temperatura

Como dato importante para iniciar el proceso de soldadura en una fundición gris como en otras fundiciones, la temperatura de precalentamiento es vital para el manejo adecuado y deposición del material de aporte, ya que influye directamente tanto sobre el acabado del cordón de soldadura, como las propiedades mecánicas finales. Se puede observar que la temperatura de precalentamiento óptima, según los ensayos realizados, se encuentra en un rango de  $300\text{ °C} \leq T\text{ °C} < 500\text{ °C}$ , aunque se puede observar que no es necesario un aumento excesivo en la temperatura ya que se presentan resultados similares a los obtenidos utilizando una temperatura de  $300\text{ °C}$ .

El análisis de resultados demuestra que las probetas trabajadas a temperatura constante obtuvieron un mejor resultado, incluso sobre las

probetas trabajadas únicamente con precalentamientos a temperaturas mayores.

Como se menciona anteriormente, es necesario mantener la temperatura señalada a lo largo de todo el proceso de soldadura, sin descuidar en ningún momento la temperatura de las secciones recién soldadas (ya sea que requieran o no de más pasos de cordones de soldadura) debido a la velocidad de enfriamiento respecto a las demás áreas trabajadas; en algunas ocasiones será necesario efectuar un aporte térmico extra en zonas donde disminuya la temperatura respecto de la del proceso.

Debe considerarse el volumen del elemento a reparar (metal base), por la tendencia natural de los elementos a buscar el equilibrio térmico, definido por la ley cero de la termodinámica, absorberá el calor generado en el proceso y lo distribuirá en el resto del cuerpo, pudiendo perjudicar el resultado final por un enfriamiento rápido.

## **7.2. Material de aporte**

En cuanto al material de aporte utilizado, según los ensayos efectuados, la variación en las propiedades finales se relaciona con las temperaturas utilizadas durante el proceso. Tanto los electrodos de ENiCl como los de ENiFeCl presentan resultados positivos al aumento de temperatura del proceso en general, brindando características similares entre ambos tipos de electrodo, tanto en el acabado final, como el manejo y forma de deposición del material de aporte.

Se puede visualizar en las figura 32 y la figura 33, ambas efectuadas a una temperatura constante de 300° C, que existe una variación mínima en

cuanto al aumento del área bajo la curva de durezas de los cordones efectuados con electrodos ENiCl en el rango de las temperaturas óptimas indicadas para los ensayos, lo cual indica que respecto a los electrodos ENiFeCl, poseen una leve distribución de durezas presentadas en la zona afectada por el calor, disminuyendo el riesgo de producir durezas pico puntuales o localizadas en una misma área.

La selección entre ambos tipos de electrodo dependerá del tipo de acabado y proceso posterior que se requiera; si se necesita una fácil maquinabilidad se utiliza el electrodo ENiCl, mientras que si es necesaria una reconstrucción o soldadura que requiera un nivel de dureza un poco mayor, se utiliza el electrodo ENiFeCl.

### **7.3. Forma de aplicación**

Es conveniente la deposición del material de aporte con ondulaciones, debido que la piscina de fundición no se solidifica instantáneamente, siendo necesario darle forma al cordón generado, al mismo tiempo que se realiza el proceso, al disiparse lentamente la temperatura del cordón de soldadura se desborda o toma formas irregulares. Es por eso que los cordones de soldadura efectuados con precalentamientos iguales o mayores a los 300°C presentan una superficie con textura alisada, mientras que los precalentados a temperaturas menores a los 300°C muestran las betas típicas de un cordón de soldadura por su leve aumento en la velocidad de enfriamiento.

De manera tal que aplicar un cordón corrido dificulta la uniformidad del mismo presentando poros e incrustaciones de escoria a lo largo del proceso, debido a que la temperatura de fusión del hierro fundido es menor que la del níquel (véase el diagrama de equilibrio para cada composición particular). De la

misma manera, la velocidad de enfriamiento del níquel es inferior, debido a un coeficiente de transferencia calórica menor a la de una fundición, según lo demuestra Metals handbook vol. 1 (2005). Al mismo tiempo, por lo anteriormente descrito, es necesario considerar un enfriamiento lento de la pieza trabajada para compensar la diferencia de los coeficientes de dilatación de ambos materiales. Debido a estas diferencias termodinámicas y al efecto de la diferencia de coeficientes, surge la necesidad de precalentar la pieza (material base) en consideración a su volumen.

Aunque al aumentar la temperatura del proceso se obtienen mejores resultados, no es conveniente permitir exceso de temperatura en el precalentamiento aunándolo al aporte térmico generado en el proceso de soldadura, especialmente en procesos de unión de piezas, por lo descrito anteriormente en cuanto a velocidades de enfriamiento, la piscina de fundición tiende a desfundarse; en tal caso, efectuar cordones cortos de no más de 5 cm para evitar dicho fenómeno.

## 8. METODOLOGÍA SELECCIONADA PARA LA SOLDADURA EN FUNDICIONES DE HIERRO, POR MEDIO DE SOLDADURA AL ARCO (SMAW)

Dicha metodología, aunque al aplicada específicamente a una fundición gris, se observa un comportamiento y resultados similares en cuanto a la fundición nodular que fue trabajada paralelamente, no obstante, es necesario efectuar evaluaciones con otros tipos de fundición, aplicando los mismos parámetros utilizados para determinar y comparar si existe alguna variante en las propiedades de los metales en cuanto al uso de las diferentes temperaturas de trabajo y resultados satisfactorios obtenidos en la presente investigación. Por consiguiente y con base en las diferentes características y patrones presentados en los ensayos y análisis efectuados, se describe la siguiente metodología:

**Paso 1:** Es necesario asegurarse que el material base sea una fundición de hierro gris, de lo contrario es pertinente efectuar un análisis del metal base o pieza a trabajar; en el caso de poder extraerse una muestra del mismo, efectuar análisis metalográficos o de componentes; de no poder extraer muestras, proceder a efectuar análisis de chispa y verificar con tablas de comparación de chispa para estimar que se trate de una fundición de hierro, por ser la misma forma de aplicación del proceso.

**Paso 2:** Ubicarse en un área libre de humedad y corrientes de aire para evitar al máximo pérdidas de temperatura o cambios bruscos al momento de efectuar el proceso, disminuyendo al mismo tiempo consumo de energía durante el proceso de precalentamiento.

- Paso 3:** Preparar la zona a trabajar, efectuando una limpieza exhaustiva del material base. Al momento de realizar biseles, efectuarlos aproximadamente a 60°, con un talón de 1/16" a 1/8".
- Paso 4:** Verificar que los electrodos se encuentren totalmente secos, de lo contrario colocarlos en equipo diseñado para dicho fin o ubicarlos en un sitio adecuado para su secado. En caso de encontrarse los electrodos en óptimas condiciones proceder a efectuar ensayos previos sobre otra superficie para graduar el amperaje a utilizar en el proceso, el cual dependerá del espesor de chapa y diámetro del electrodo, o puede efectuarse cálculo teórico.
- Paso 5:** Efectuar precalentamiento de la sección a trabajar en un rango de  $300^{\circ}\text{C} \leq T^{\circ}\text{C} < 400^{\circ}\text{C}$  de temperatura, tomando en cuenta el volumen total de la pieza, pudiendo ser necesario el calentamiento total de la misma. Para el precalentamiento puede utilizarse desde antorcha o llama neutra (con acetileno), un horno, cobertores especiales con resistencias térmicas, entre otros métodos, según sea la situación o equipo disponible. Tomar en cuenta que la temperatura debe mantenerse constante a lo largo de todo el proceso de soldadura.
- Paso 6:** Iniciar con la deposición del material de aporte efectuando oscilaciones para darle forma al cordón de soldadura evitando la permanencia del electrodo en un mismo punto para impedir elevar excesivamente la temperatura, avanzando en cordones de 5 a 8 cm de longitud. Efectuar la limpieza correspondiente removiendo la escoria, cepillando la sección, verificando simultáneamente que no descienda la temperatura de la pieza. Pulir los bordes del cordón de soldadura hasta la raíz con disco de corte para eliminar

imperfecciones, evitar incrustaciones de escoria, poros, entre otros defectos, en caso de ser necesaria la aplicación de otro cordón de soldadura. Generalmente en procesos de soldadura, independientemente de la morfología de la pieza, existe una deformación de la misma (dilataciones y contracciones), por la variación de temperaturas, siendo necesario no aplicar los cordones en un mismo punto, sino distribuirlos de una forma dispersa pero ordenada, hasta completar los cordones de soldadura necesarios, para evitar que la concentración de tensiones internas afecte la forma de la pieza al trabajar en un solo punto.

**Paso 7:** Finalizado el proceso de soldadura, cubrir en su totalidad la pieza inmediatamente con cal hidratada, arena, o cubrirla con lana mineral, para obtener un enfriamiento lo más lento posible. Es pertinente efectuar el proceso de soldadura de inicio a fin, sin realizar paros durante el proceso para obtener resultados satisfactorios; contrario a esto, es posible que presente inconvenientes tales como fisuraciones, elevación de niveles de dureza y fragilización de la zona trabajada por enfriamientos bruscos de la pieza, siendo necesario remover las secciones dañadas para iniciar nuevamente el proceso, dificultando al mismo tiempo su posterior mecanización por su extrema dureza.



## CONCLUSIONES

1. En función de los resultados obtenidos, se concluye en que la metodología propuesta proporciona resultados satisfactorios, al utilizar las consideraciones plasmadas en el capítulo 8.
2. Selección del material de aporte, según los resultados y acabados finales esperados. A pesar que los electrodos de níquel (ENiCl) presentan una mayor ductilidad que el electrodo níquel-hierro (ENiFeCl), los resultados de dureza dependerán de las temperaturas de trabajo aplicadas; en caso de malas prácticas de soldadura, aumentando niveles de dureza.
3. Para la aplicación del método se requiere ambientes secos, sin humedad ni ráfagas de viento (protección de la pieza), considerar la rapidez de avance (por el comportamiento del electrodo al fundirse), cordones de soldadura entre 5 a 8 cm y el orden de realización de los cordones de soldadura, según morfología de la pieza.
4. La temperatura adecuada para el proceso es de  $300\text{ °C} \leq T\text{ °C} < 400\text{ °C}$  de forma constante, según se observa en los resultados plasmados en el capítulo 5 y el método referido en el capítulo 3. Los resultados finales se reflejarán directamente en la aplicación de tratamientos térmicos adecuados (pre, durante y posterior al proceso de soldadura).



## **RECOMENDACIONES**

Considerando la sección de recomendaciones, se presenta una clasificación según los objetivos y conclusiones para un mejor ordenamiento y explicación de las mismas, detallándose de la siguiente manera:

### **EN CUANTO AL MATERIAL DE APORTE**

1. Se mencionó que la selección entre ambos tipos de electrodo dependerá del tipo de acabado y proceso posterior que se requiera, pero, de no considerarse las temperaturas de trabajo recomendadas, ambos tipos de electrodo aumentarán considerablemente sus niveles de dureza dificultando su maquinabilidad y presentando los fenómenos mencionados por malos procesos de soldadura.

Se sugiere utilizar electrodos de diámetro pequeño, para reducir el amperaje, y por lo tanto, el aporte de calor durante el proceso.

### **EN CUANTO AL MÉTODO**

2. Es aconsejable efectuar el proceso de soldadura de inicio a fin, sin realizar paros durante el mismo, para obtener resultados satisfactorios.
3. Depositar el material de aporte con pequeñas ondulaciones; aunque son dos procesos totalmente distintos, la deposición del material de aporte se asemeja a la realizada con soldadura oxiacetilénica, por la apariencia superficial que se presenta al momento de la aplicación. Es por esto que

aplicar un cordón corrido dificulta la uniformidad del mismo presentando poros e incrustaciones de escoria a lo largo del proceso.

4. Se obtienen mejores resultados y ahorro de consumibles, al pulir los bordes de los cordones de soldadura donde se requiera la deposición de más cordones, y efectuarlos traslapados, abarcando aproximadamente un 50% sobre el cordón efectuado con anterioridad, tal como se describe en la explicación del método propuesto.

En la mayoría de procesos de reparación donde existen fisuras, se recomienda taladrar los extremos de la fisura, para evitar que se siga expandiendo (matafisuras).

## **FACTORES DE TEMPERATURA**

5. Para todos los procesos de soldadura donde las temperaturas de trabajo sean críticas en los resultados finales, se recomienda realizar las mediciones de temperatura por medio de una pistola laser o medidores de temperatura precisos para una mayor confiabilidad.
6. Evitar el reducir excesivamente la velocidad de avance o efectuar cordones de soldadura largos, no solamente pueden producirse desfundes, sino también incrustaciones de escoria o poros superficiales producidos por partículas en suspensión sobre la piscina de fundición y su lenta solidificación por aumentos excesivos de temperatura.
7. Estar pendientes del descenso de temperaturas sobre el cordón de soldadura, las mismas herramientas utilizadas para sujetar las piezas, forman parte de los cuerpos en los que se distribuirá y generará el balance

térmico, reduciendo el calor proporcionado para el precalentamiento o la temperatura posterior a la finalización del cordón de soldadura.

- 8.** Mantener la temperatura a lo largo del proceso puesto que el análisis de resultados demuestra que las probetas trabajadas a temperatura constante obtuvieron un mejor resultado, incluso sobre las probetas trabajadas únicamente con precalentamientos a temperaturas mayores.
- 9.** Efectuar un revenido final, para liberar tensiones internas surgidas por el proceso.
- 10.** Para continuar con las líneas de investigación del área de Diseño y Metalurgia de la Soldadura, se deberán efectuar ensayos de soldadura considerando los diferentes tipos de fundición, tanto la gris (clases 20, 40, 60, etc., o tipos B, C, D y E), como en otros tipos de fundición para verificar si los resultados son similares o difieren, basándose tanto en la metodología propuesta, como en otros procesos de soldadura.



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Aguilar, R. (1989). *Introducción a la inspección de soldaduras*. Proyecto Regional de Ensayos No Destructivos para América Latina y el Caribe. NU, RLA-82-T01. Guatemala, 61 p.
2. Aguilar, R. (2011). *Solidificación de Metales y Aleaciones y el Mecanismo de Cierre de la Ventana Fluida Durante los Ensayos de Fluidez (Ensayo Metodológico)*. Proyecto de investigaciones metalúrgicas. EMI, FIUSAC. Guatemala.72 p.
3. Aguilar, R. (2012). *Introducción a la Metalurgia, Curso Básico para Ingenieros. Proyecto de investigaciones metalúrgicas*. EMI, FIUSAC. Guatemala.192 p.
4. Apraiz, B. (1984). *Tratamientos Térmicos de los Aceros*. Octava Edición. Editorial Dossat, S.A. España.
5. ASM International. (2005). *Properties and Selection: Irons Steels, and High Performance Alloys*Section.Handbook, vol. 1. Metals Park. ASM International. Ohio.1618 p.
6. ASM International. (2005). *Welding Brazing and soldering*. Metals Handbook, vol. 6. Metals Park. ASM International. Ohio.2873 p.
7. ASM International. (2005). *Metallography and Microstructures*. Metals Handbook, vol 9. Metals Park. ASM International. Ohio.1627 p.

8. ASM International. (2005). *Failure analysis and Prevention*. Metals Handbook, vol 11. Metals Park. ASM International. Ohio. 2909 p.
9. Asta, E. (2006). *Fundamentos de la soldadura por arco eléctrico*. Fundación Latinoamericana de Soldadura. Buenos Aires Argentina. 32 p.
10. Barrientos G. (2009). *Guía de Prácticas para Observación en el Microscopio Electrónico, en el Laboratorio de Metalografía*. Trabajo de Graduación de Ingeniería Mecánica. Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala. 142 p.
11. Bravo, F. (2005). *Tratamientos Térmicos a Fundiciones Grises de la Región Grau Fabricadas en Horno de cubilote*. Facultad de Ingeniería, Universidad de Piura. Perú. 137 p.
12. Celada, E. (2012). *Metodología para el reacondicionamiento de Ejes de acero al carbono, AISI 1045, por medio de soldadura*. Trabajo de graduación de Ingeniería Mecánica. Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala. 82 p.
13. Celada E. y Aguilar R. (2013). *Soldabilidad del acero AISI 1045 con electrodos E8018B2 y E9018B3*. Proyecto de Investigaciones Metalúrgicas, EIM, FIUSAC. Guatemala. 7 p. (Presentado a la revista Científica del CII)
14. Chicas R. Y Aguilar Rivas R. A. (2013). *Fallas características en soldaduras especiales. origen y prevención (casos reales)*. Proyecto

de Investigaciones Metalúrgicas, EIM, FIUSAC. Guatemala. 7 p.  
(Presentado a la revista Científica del CII)

15. Coronado, L. (2005). *Aspectos técnicos de la soldadura para el curso Procesos de Manufactura II*. (Tesis de pregrado). Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala. 102 p.
16. Díaz, F. (2007). *Hierros Fundidos. Lecturas de Ingeniería*. Laboratorio de Tecnología de Materiales. Departamento de Ingeniería. Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán. Cuautitlán Izcalli. 29 p.
17. Mena, E. (2012). *Análisis de falla de discos de freno automotrices derivado del proyecto de investigación SIP 20090785*. (Tesis de Pregrado). Escuela superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Unidad Profesional Azcapotzalco. México. 99 p.
18. INDURA S.A. (marzo 2007). *Manual de soldadura*. Industria y Comercio. Recuperado de:  
[http://www.indura.com.pe/doc/peru/manua\\_de\\_procesos\\_y\\_productos\\_de\\_soldadura\\_indura.pdf](http://www.indura.com.pe/doc/peru/manua_de_procesos_y_productos_de_soldadura_indura.pdf)Kiser, S. & Northey, M. (2005). *Welding Cast Iron*. Canadian Welding Association. Canada. 4 p.
19. Kobe Steel, LDT. (2011). *Arc Welding of Specific Steel sand Castlrons*. Fourth Edition. Kita-Shinagawa, Shinagawa-Ku, Tokyo. Japan. 169 p.
20. Leal, H. (2011). *Selección de Materiales*. Universidad Politécnica de Puerto Cabello. Ingeniería en Materiales Industriales. 43 p.

21. Mauricio I., Eduardo Ñ. & José H. (2010). *Manual para la recuperación y protección antidesgaste de piezas*. INDURA S.A. Industria y Comercio. Cerrillos. Chile. 60 p.
22. Norma ASTM A 48/A 48M– 03 (2008). *Standard Specification for Gray Iron Castings*.
23. Norma ASTM E 407 – 99 (2007). *Standard practice for microetching metals and alloys*.
24. Norma ASTM A956 (2006). *Standard test Method for Leeb Hardness Testing of Steel Products*.
25. Norma ASTM E 18 (2007). *Ensayo de dureza Rockwell de materiales metálicos*.
26. Norma AWS 5.15-90 (2006). *Specification for Welding Electrodes and Rods for Cast Iron*.
27. OXGASA. *Manual del soldador*, INFRA. El Salvador. Consultada el 26 de mayo de 2013, recuperado de:  
[www.oxgasa.com/attachments/article/45/manual%20del%20soldador.pdf](http://www.oxgasa.com/attachments/article/45/manual%20del%20soldador.pdf)
28. Ortúzar R. (1997). *Desgaste y Recuperación*. Revista de Marina. Recuperado de: [www.revistamarina.cl/revistas/1997/4/ortuzar.pdf](http://www.revistamarina.cl/revistas/1997/4/ortuzar.pdf)