



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica

**APLICACIÓN DE AISLANTE TÉRMICO EN SOLDADURA SMAW EN HIERRO FUNDIDO
GRIS, COMO ALTERNATIVA A LOS MÉTODOS CONVENCIONALES DE PRE Y
POSCALENTAMIENTO**

Diego Fernando Toledo Cardenas

Asesorado por el Ing. Carlos Enrique Chicol Cabrera

Guatemala, abril de 2017

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**APLICACIÓN DE AISLANTE TÉRMICO EN SOLDADURA SMAW EN HIERRO FUNDIDO
GRIS, COMO ALTERNATIVA A LOS MÉTODOS CONVENCIONALES DE PRE Y
POSCALENTAMIENTO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

DIEGO FERNANDO TOLEDO CARDENAS
ASESORADO POR EL ING. CARLOS ENRIQUE CHICOL CABRERA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO MECÁNICO

GUATEMALA, ABRIL DE 2017

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 Garcia
VOCAL II	Ing. Pablo Christian De Leon Rodriguez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Jurgen Andoni Ramírez Ramírez
VOCAL V	Br. Oscar Humberto Galicia Nuñez
SECRETARIO	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Angel Roberto Sic García a.i.
EXAMINADOR	Ing. Byron Giovanni Palacios Colindres
EXAMINADOR	Ing. Carlos Enrique Chicol Cabrera
EXAMINADOR	Ing. Roberto Guzmán Ortiz
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

APLICACIÓN DE AISLANTE TÉRMICO EN SOLDADURA SMAW EN HIERRO FUNDIDO GRIS, COMO ALTERNATIVA A LOS MÉTODOS CONVENCIONALES DE PRE Y POSCALENTAMIENTO

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica, con fecha 6 de abril de 2016.

Diego Fernando Toledo Cardenas

Guatemala, noviembre 22 de 2016

Ing. Roberto Guzman Ortiz
Director de Escuela de Ingeniería Mecánica
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

Ingeniero Guzman:

Por este medio le informo que, como asesor del estudiante universitario de la carrera de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, Diego Fernando Toledo Cardenas, carné No. 201020818, he finalizado la revisión del trabajo de graduación con título **APLICACIÓN DE AISLANTE TÉRMICO EN SOLDADURA SMAW EN HIERRO FUNDIDO GRIS, COMO ALTERNATIVA A LOS MÉTODOS CONVENCIONALES DE PRE Y POSCALENTAMIENTO**, el cual apruebo por cumplir con los requerimientos solicitados durante el proceso.

Solicitándole darle trámite respectivo y sin otro particular me es grato suscribirme.

Atentamente,



Ing. Carlos Enrique Chicol Cabrera
Colegiado No. 6965

Ma. Ing. Carlos E. Chicol C.
COL. No. 6965



USAC

TRICENTENARIA

Universidad de San Carlos de Guatemala

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería Mecánica

Ref.E.I.M.328.2016

El Coordinador del Área de Materiales de Ingeniería de la Escuela de Ingeniería Mecánica, luego de conocer el dictamen del Asesor y habiendo revisado en su totalidad el trabajo de graduación titulado: **APLICACIÓN DE AISLANTE TÉRMICO EN SOLDADURA SMAW EN HIERRO FUNDIDO GRIS, COMO ALTERNATIVA A LOS MÉTODOS CONVENCIONALES DE PRE Y POSCALENTAMIENTO**, desarrollado por el estudiante **Diego Fernando Toledo Cárdenas**, carné 201020818, recomienda su aprobación.

"Id y Enseñad a Todos"

Ing. Carlos Humberto Pérez Rodríguez
Coordinador Área de Materiales
Escuela de Ingeniería Mecánica



Guatemala, noviembre 2016

/aej



USAC

TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería Mecánica

Ref.E.I.M.140.2017

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica, de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y con la aprobación del Coordinador del Área de Materiales del trabajo de graduación titulado: **APLICACIÓN DE AISLANTE TÉRMICO EN SOLDADURA SMAW EN HIERRO FUNDIDO GRIS, COMO ALTERNATIVA A LOS MÉTODOS CONVENCIONALES DE PRE Y POSCALENTAMIENTO** del estudiante **Diego Fernando Toledo Cardenas, CUI 1942-15350-0101, Registro Académico No. 201020818** y luego de haberlo revisado en su totalidad, procede a la autorización del mismo.

"Id y Enseñad a Todos"


Ing. Roberto Guzmán Ortiz
Director
Escuela de Ingeniería Mecánica



Guatemala, abril de 2017
/aej

Universidad de San Carlos
de Guatemala

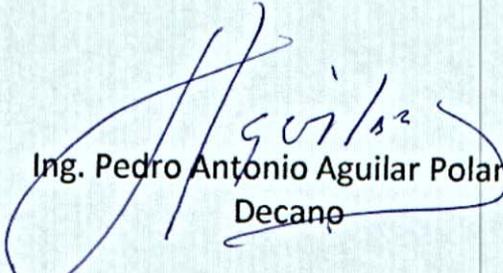


Facultad de Ingeniería
Decanato

DTG. 174.2017

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 Ingeniería Mecánica, al Trabajo de Graduación titulado: **APLICACIÓN DE AISLANTE TÉRMICO EN SOLDADURA SMAW EN HIERRO FUNDIDO GRIS, COMO ALTERNATIVA A LOS MÉTODOS CONVENCIONALES DE PRE Y POSCALENTAMIENTO**, presentado por el estudiante universitario: **Diego Fernando Toledo Cardenas**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:


Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Decano

Guatemala, abril de 2017

/gdech



ACTO QUE DEDICO A:

Mi padre	Oscar Orlando Toledo por el apoyo y esfuerzo brindado para cursar la carrera, y por ser mi ejemplo como profesional.
Mi madre	Carolina Cardenas por el inmenso amor y sacrificio brindado durante mi vida.
Mis hermanos	Oscar Toledo y Valeria Toledo por compartir conmigo los buenos y malos momentos.
Mi familia	A todos mis tíos y tías, primos y primas, por las palabras de motivación y consejos ofrecidos.
Mis amigos de la Facultad	Por la infinidad de anécdotas vividas en la facultad, Manolo Tocay, Alfredo Cortez, Eduardo Abac, Javier del Cid, Marisol Marroquín, Julio Beltrán, Darlineth Alonzo, Mario Lau, Berny Yach, Juan Coronado, José García Pérez, entre otros.
Mi amiga	Esther Moncada por haber estado a mi lado y por todos los buenos momentos vividos.

Mi novia

Maria Renè Poggio por el apoyo brindado durante el proceso de elaboración del trabajo de graduación.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por haberme brindado la oportunidad de ser un estudiante de tan prestigioso establecimiento.
Facultad de Ingeniería	Por la exigencia constante durante la carrera para la formación de buenos profesionales.
Catedráticos	Por haber brindado sus conocimientos y experiencias vividas en el ámbito laboral.
INTECAP CG2	Por todos los conocimientos brindados por personal especialista de diferentes áreas.
Mi asesor	Ing. Carlos Chicol Cabrera por el apoyo ofrecido en la realización del trabajo de graduación.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	IV
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO	XI
RESUMEN.....	XV
OBJETIVOS.....	XVII
INTRODUCCIÓN	XIX
1. CONCEPTOS GENERALES.....	1
1.1. Hierro fundido	1
1.1.1. Fundición gris	2
1.1.2. Fundición nodular	3
1.1.3. Fundición maleable.....	4
1.1.4. Fundiciones aleadas.....	4
1.2. Soldadura	5
1.2.1. Soldadura por arco eléctrico	6
2. EVALUACIÓN DE RESISTENCIA DE MATERIALES	9
2.1. Ensayos destructivos.....	9
2.1.1. Ensayo de tracción	10
2.1.1.1. Esfuerzo de cedencia	10
2.1.1.2. Resistencia a la tensión.....	11
2.1.1.3. Módulo de elasticidad	12
2.1.1.4. Módulo de resistencia.....	12
2.1.1.5. Ductilidad.....	12
2.1.2. Ensayo de dureza.....	13
2.1.2.1. Dureza Brinell	13
2.1.2.2. Dureza Rockwell C y Rockwell B.....	14

	2.1.2.3.	Dureza Vickers	15
2.2.		Ensayos no destructivos	15
	2.2.1.	Inspección visual	16
	2.2.2.	Radiografía.....	17
	2.2.3.	Ensayo metalográfico.....	17
3.		METALURGIA Y METALOGRAFÍA DEL HIERRO FUNDIDO	21
	3.1.	Metalurgia de la soldadura	21
	3.2.	Solidificación	23
	3.3.	Relevado de esfuerzos.....	25
	3.3.1.	Recuperación	27
	3.3.2.	Relajamiento	27
	3.3.3.	Revenido	29
	3.3.4.	Recristalización	32
	3.3.5.	Esferoidizado.....	33
	3.4.	Metalografía	35
	3.4.1.	Microestructura de la fundición blanca	35
	3.4.2.	Microestructura de la fundición maleable	38
	3.4.3.	Microestructura de la fundición gris.....	45
	3.4.4.	Microestructura de la fundición nodular.....	49
4.		AISLANTE TÉRMICO	51
	4.1.	Materiales aislantes térmicos	51
	4.2.	Resistencia térmica	52
	4.3.	Fibra de vidrio	54
	4.4.	Resistencia de calefacción.....	56
5.		SOLDADURA SMAW DEL HIERRO FUNDIDO	59
	5.1.	Material de aporte	59
	5.2.	Material base.....	61
	5.3.	Efectos del calor en la soldadura del hierro fundido.....	63
	5.4.	Fisuras y grietas	66

5.5.	Procedimiento de soldadura	69
6.	COMPARACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS APLICANDO DIFERENTES PROCEDIMIENTOS DE SOLDADURA DEL HIERRO FUNDIDO	77
6.1.	Caso 1: Proceso incorrecto de soldadura.....	77
6.1.1.	Ensayo de tensión	78
6.1.2.	Ensayo de dureza.....	79
6.1.3.	Radiografía	81
6.1.4.	Ensayo metalográfico	82
6.2.	Caso 2: Procedimiento empírico tradicional en la soldadura del hierro fundido.....	84
6.2.1.	Ensayo de tensión	85
6.2.2.	Ensayo de dureza.....	86
6.2.3.	Radiografía	87
6.2.4.	Ensayo metalográfico	88
6.3.	Caso 3: Procedimiento correcto de soldadura.....	90
6.3.1.	Ensayo de tensión	90
6.3.2.	Ensayo de dureza.....	91
6.3.3.	Radiografía	93
6.3.4.	Ensayo metalográfico	94
6.4.	Recopilación de propiedades	96
	CONCLUSIONES.....	99
	RECOMENDACIONES.....	101
	BIBLIOGRAFÍA.....	103
	ANEXOS.....	105

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Esfuerzo de cedencia en fundición gris y acero al carbono	11
2.	Tipos de penetradores para ensayos de dureza	15
3.	Solidificación en soldadura y tipos de grano en la ZAT.....	21
4.	Solidificación del material de aporte.....	22
5.	Reducción de esfuerzos internos a diferentes temperaturas	28
6.	Reducción de dureza en relación al tiempo de permanencia a diferentes temperaturas	31
7.	Diagrama Hierro-Fe ₃ C de fundición blanca al 2.5 por ciento de carbono	37
8.	Fundición blanca a 20x y 250x.....	38
9.	Estructura del hierro maleable, sin ataque químico (a) y con ataque químico (b)	40
10.	Estructura del hierro perlítico maleable a 500x atacado químicamente.....	42
11.	Estructura “ojo de buey” de carbono revenido rodeado por ferrita	43
12.	Estructura de hierro perlítico maleable luego de un revenido	44
13.	Estructura de la fundición gris perlítica con aumento de 100x y 500x..	46
14.	Resistencia a la tensión para una fundición según su contenido de carbono y silicio.....	47
15.	Resistencia térmica para diferentes materiales.....	54
16.	Resistencia de 900 watts que alcanza los 400° C.....	57
17.	Fibra de vidrio empleada en prueba.....	58
18.	Liberación de esfuerzo residual en la fundición gris respecto del tiempo y temperatura.	65
19.	Tipos de fisuras en soldaduras	68

20.	Fractura de fundición gris	70
21.	Máquina para soldadura SMAW	71
22.	Electrodo E-NiFeCl	73
23.	Medidas teóricas de probeta.....	78
24.	Probeta soldada con superficie pulida	79
25.	Medición de dureza con máquina Rockwell Hardness Tester modelo HR-150A	80
26.	Indentaciones de ensayo de dureza	80
27.	Preparación de pieza , izquierda probeta pulida, derecha atacada químicamente	83
28.	Microestructura en línea de aleación, izquierda a 100x derecha a 200x .Caso 1.....	83
29.	Microestructura en ZAT, izquierda a 100x derecha a 200x. Caso 1	84
30.	Microestructura en línea de aleación a 100x .Caso 2.	89
31.	Microestructura en ZAT, izquierda a 100x derecha a 200x. Caso 2.	89
32.	Microestructura en línea de aleación, izquierda a 100x y derecha a 200x. Caso 3.....	95
33.	Microestructura en ZAT, izquierda a 100x derecha a 200x. Caso 3.	95
34.	Esfuerzo de tensión obtenido en cada caso	97
35.	Tendencia de dureza desde cordón hasta 2mm de la ZAT	97

TABLAS

I.	Composición química de la fundición gris.....	62
II.	Resultados de ensayo de dureza del Caso 1	81
III.	Resultados de radiografía en probeta No. 1	81
IV.	Resultados del ensayo de dureza del Caso 2.....	87
V.	Resultados de radiografía en probeta No. 2	87
VI.	Resultados del ensayo de dureza del Caso 3.....	92

VII.	Resultados de radiografía en probeta No. 3.....	93
VIII.	Resumen de resultados obtenidos de ensayos.....	96

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
AFS	<i>American Foundrymen's Society</i>
ASTM	<i>American Society for Testing Materials.</i>
CDPD	Corriente directa polaridad directa
CDPI	Corriente directa polaridad invertida
CO	Monóxido de carbono.
CO₂	Dióxido de carbono.
cm	Centímetro
E-NiCl:	Electrodo de Ni = Niquel y Cl = <i>Cast Iron</i> .
E-NiFeCl	Electrodo de Ni = Niquel Fe = Hierro Cl = <i>Cast Iron</i> .
E-ST	Steel, electrodo de Acero.
Fe₃C	Carburo de hierro o cementita
Fe₃P	Fosfuro de hierro
FeS	Sulfuro de hierro
GMAW	<i>Gas Metal Active gas</i>
GTAW	<i>Tungsten Arc Welding</i>
HRC	Hardnesrockwel C
HRB	Hardnesrockwel B
MnS	Sulfuro de manganeso
MIG	<i>Metal Inert Gas</i>
MAG	<i>Metal Active Gas</i>
Mg	Magnesio
Mn	Manganeso
Mo	Molibdeno

Ni	Niquel
O₂	Oxígeno molecular
Pul	pulgada
Psi	Lb/plg ²
SMAW	<i>Shielded Metal Arc Welding</i>
TIG	<i>Tungsten Inert Gas</i>

GLOSARIO

Acritud	Incremento de dureza por trabajo en frío.
Cementita	Es el componente más duro de los aceros al carbono y a su vez frágil.
Coalescencia	Propiedad de los metales para unirse y fundirse con otros.
Ductilidad	Propiedad importante de los metales que define la capacidad de deformación antes de la ruptura.
Ferrita	Estructura cristalina del hierro, conocida como hierro alfa.
Grafitización	Reacción cuando a altas temperaturas el carburo de hierro se descompone en grafito y hierro.
Esteadita	Microestructura presente en la mayoría de hierros fundidos por acción del fósforo de hierro, de alta fragilidad, que rodea las dendritas primarias de la austenita.
Incrustación	Partícula de contaminante atrapada en la soldadura solidificada.

Indentación	Marca dejada por un penetrador para ensayo de dureza, la cual es medida y de ella se determina la dureza.
Metaestable	Es una propiedad que se refiere a que el equilibrio de un estado de la materia cambia extremadamente lento a otros estados. Ejemplo: el diamante se vuelve grafito, la cementita se vuelve grafito más ferrita, entre otros. La temperatura incrementa la velocidad del cambio de estado.
Normalizado	Tratamiento térmico para uniformizar microestructura de un metal.
Recocido	Tratamiento térmico de ablandamiento total de esfuerzos, para reducción de dureza a estado de suministro de material y mejorar maquinabilidad.
Resiliencia	Capacidad de absorción de energía de un metal antes de la zona plástica.
Revenido	Tratamiento térmico de alivio de esfuerzos generalmente usado para fijar dureza de trabajo posterior a un temple.
Socavación	Defecto de soldadura en la periferia del cordón en forma de zanja que puede deberse a exceso de amperaje.

Soldabilidad	Propiedad de los metales que mide la facilidad de realizar una unión soldada en el material.
Temple	Tratamiento térmico de metales que endurece el material para conseguir optimizar las propiedades mecánicas.
ZAT	Zona afectada térmicamente, donde las propiedades del material base se ven modificadas.

RESUMEN

La soldadura del hierro fundido representa por sí sola un desafío, ya que no es la reparación más común que se realice en un taller de mantenimiento. La pobre experiencia para llevar a cabo este tipo de reparación ocasiona confusión en el procedimiento correcto que debe realizarse.

El contenido de este trabajo aborda el análisis de una propuesta de un método diferente para precalentar y poscalentar la soldadura de una fundición gris. El objeto del estudio es comparar si la propuesta de emplear un aislante y una resistencia de calefacción puede sustituir cualquier otro método para la aplicación de calor antes de una soldadura de fundición y después de ella.

La manera de confrontar si la propuesta es satisfactoria es someter varias probetas a tres diferentes procedimientos de soldadura, los resultados serán estudiados sometiendo a ensayos destructivos y no destructivos para determinar si las prestaciones mecánicas son superiores en el procedimiento planteado.

Durante el desarrollo de los capítulos teóricos, se tiene la información básica para entender las características de la fundición gris y comprender todo lo que el calor puede afectar o fortalecer a este material. Por ello, el control del calor cobra importancia y, consecuentemente, se profundiza significativamente.

OBJETIVOS

General

Aplicar un aislante térmico en soldadura SMAW en hierro fundido gris como alternativa a los métodos convencionales de pre y poscalentamiento.

Específicos

1. Definir los materiales adecuados del aislante que soporten las condiciones en la superficie del material soldado.
2. Identificar todas las variables que intervienen en la formación de fisuras en la fundición gris.
3. Comparar, por medio de ensayos, si se mejora la resistencia mecánica de la pieza soldada.
4. Analizar la estructura metalográfica y realizar comparación entre una soldadura con y sin pos aislamiento.

INTRODUCCIÓN

El proceso de soldadura smaw es el más utilizado, actualmente, en Guatemala por ser muy versátil. Si el proceso se aplica correctamente, se pueden obtener uniones muy resistentes. Para ello, se debe tomar en cuenta el uso del electrodo correcto, amperaje adecuado, una técnica de soldar perfecta y los respectivos tratamientos térmicos antes del proceso y después de él. Suele ser muy difícil conseguir los aspectos antes mencionados y, como consecuencia, se obtienen imperfecciones como baja penetración, mala aleación, porosidad, socavación, agrietamiento, esfuerzos internos, entre otros. Dichas imperfecciones ocasionan debilitamiento en ciertas áreas de la unión soldada e incrementan la posibilidad de falla. De todas ellas, las fisuras son las de mayor peligro y se presentan, sobre todo, en la fundición gris y pueden ser consecuencia de varias acciones, como utilizar un electrodo incorrecto, el enfriamiento es demasiado veloz, esto induce esfuerzos internos y estructuras de cementita.

Durante la presente investigación se aconseja una alternativa para evitar este tipo de falla por fisura en la zona donde se une el cordón de soldadura con el material base, el cual consiste en disipar lentamente la temperatura para darle tiempo al material de homogenizar su microestructura mientras se promueve la formación de grafito y reducir las tensiones internas en las uniones de soldadura del hierro fundido gris.

La propuesta para permitirle el tiempo necesario a la unión soldada de uniformizar su microestructura consiste en el diseño de un aislante térmico capaz de tolerar las altas temperaturas sin sufrir deterioro de sus propiedades y que, a su vez, sea capaz de disminuir tanto como sea posible, la velocidad de enfriamiento.

1. CONCEPTOS GENERALES

1.1. Hierro fundido

El hierro fundido, conocido también como hierro colado, es una aleación de hierro con alto contenido de carbono, mayor a 2.1 por ciento, también contiene cantidades generosas de silicio, quien se encarga de que, en la solidificación se forme grafito en lugar de cementita. Asimismo, se puede encontrar entre sus elementos el fósforo, ideal para mejorar la colabilidad, y otros componentes que aleados al hierro fundido pueden mejorar las prestaciones mecánicas del material como el cobre, níquel, molibdeno, titanio y aluminio.

El hierro fundido posee ventajas frente a otros materiales que lo hacen imprescindible en determinadas aplicaciones. Posee bajo peso en relación al acero, al carbono, aproximadamente un 10% menor, por lo cual es excelente para piezas de maquinaria, siempre que la aplicación no supere sus límites de resistencia. En general, posee excelente maquinabilidad y esto se debe a que en su estructura hay grafito y este hace de lubricante natural facilitando el trabajo en frío, además el grafito le confiere alta resistencia al desgaste. Es un material de muy bajo costo que se puede ajustar a diferentes formas durante la colada. No es un material que pueda laminarse ni estirarse en caliente.

Otra propiedad importante es que posee muy baja dilatación térmica. Esta, a su vez, disminuye su soldabilidad, ya que el material de aporte sí dilata y contrae mientras el hierro fundido es prácticamente inmutable a la deformación térmica, por lo que durante el enfriamiento de ambos puede separarse el cordón del material base.

La rotura que presenta el hierro fundido es frágil, posee muy baja ductilidad por tanto no es un material tenaz ni tampoco tiene buena resistencia al impacto. Aunque en la actualidad según el tipo de aleación se han logrado mejorar dichas desventajas.

1.1.1. Fundición gris

La fundición gris es la mayormente manejada en la industria, su nombre se debe al color de la fractura del material. Para conseguir la fundición gris hay que enfriar lentamente la colada y debe haber un contenido de silicio entre el dos y el tres por ciento para facilitar la formación de grafito y estructura ferrítica. Las propiedades mecánicas pueden variar en amplios intervalos y esto depende, intrínsecamente, de la composición química, velocidad de enfriamiento, tratamiento térmico, la forma y tamaño de las hojuelas de grafito, entre otros.

La fundición gris tiene, en general, poco más del doble de resistencia a la compresión que a la tracción, su baja ductilidad le impide tener buena resistencia a la tracción. Pero sus valiosas propiedades de resistencia al desgaste, autolubricación, maquinabilidad, bajo peso, bajo costo, entre otros, hace que sea ideal para aplicaciones como engranajes, carcasas de bombas y turbinas, bloques de motor, carcasas de reductores de velocidad, contrapesos, cubiertas para alcantarillas y varias piezas industriales.

La fundición gris se caracteriza por tener mayor resistencia al corte torsional que algunos tipos de acero al carbono, por lo que es utilizado para ejes en algunas aplicaciones. La fundición gris es de bajo costo, pero si las propiedades del hierro gris no cumplen con la función, se debe elegir otro material.

A diferencia de los aceros al carbono, la dureza en la fundición gris no se obtiene mediante un ensayo de dureza Rockwell, porque el penetrador es pequeño y la medición varía dependiendo de la cantidad de hojuelas de grafito y la matriz metálica donde se realice la prueba. Para obtener un resultado más representativo y verdadero, se realiza un ensayo de dureza Brinell porque el penetrador cubre un área mayor. Aun midiendo la dureza Brinell, puede dar datos de gran variación ya que siempre depende de la distribución y tamaño de las hojuelas de grafito. Una manera confiable para determinar la dureza en la fundición, es el análisis de la microestructura en laboratorios especializados. La composición química interviene también en la determinación de la dureza, tanto el carbono como el silicio disminuyen la dureza.

1.1.2. Fundición nodular

La fundición nodular o hierro dúctil es la misma fundición gris con la cualidad de poseer un 0.05 por ciento de magnesio con lo cual se mejora veinte veces la ductilidad y duplicando la resistencia. Esto gracias a que el magnesio permite que la microestructura pase de ser en forma de placas a forma de nódulos, conocida como una matriz perlítica. Se puede mejorar con tratamiento térmico de temple aunque es recomendado siempre realizar un revenido para reducir las tensiones internas y fijar dureza de trabajo. Esta fundición mejora en tracción, resistencia al desgaste y maquinabilidad respecto de la fundición gris, por ello, suele utilizarse para cigüeñales, troqueles para trabajar metales, manivelas, pistones y cabezas de cilindros para automóviles, motores diésel, poleas de transmisión, entre otros.

La manera más común para obtener fundición nodular es controlando la composición química y la velocidad de solidificación después de la fundición.

1.1.3. Fundición maleable

La fundición maleable es tratada de manera similar a la fundición blanca, no posee grafito en su estructura, pero para conseguir buenas propiedades de maleabilidad se somete a un tratamiento térmico de grafitización para insertar en la fundición estructuras nodulares de grafito.

El proceso para obtener la fundición maleable es a partir de la fundición blanca, quien en su estructura contiene cementita o carburo de hierro (Fe_3C) la cual puede desfragmentarse en $\text{Fe} + \text{C}$ mediante el mencionado tratamiento térmico produciendo ferrita más grafito y formando los nódulos de matriz ferrítica. De esta manera se dota a la fundición maleable de gran resistencia al desgaste, resistencia al impacto térmico, gran maquinabilidad aunque se vuelve muy complicado realizar soldaduras en este tipo de fundición.

Existe gran cantidad de aplicaciones para esta fundición pero el costo elevado del tratamiento térmico para conseguir la maleabilidad ha hecho que en la industria se busquen alternativas en otros materiales.

1.1.4. Fundiciones aleadas

Dependiendo del tipo de elemento que se utilice para aleación así será el tipo de microestructura que adquirirá la fundición y su respectivo incremento en determinada propiedad mecánica. Una fundición aleada puede crear variaciones en la grafitización.

Entre los elementos que favorecen la grafitización está el silicio, níquel, cobre y aluminio. Por el contrario, el cromo, el manganeso y el molibdeno facilitan la formación de carburo de hierro y entorpecen la grafitización.

Se conocen como fundiciones de baja y mediana aleación aquellas que contienen porcentajes menores al 1.5 por ciento de determinados elementos como el níquel, cromo, molibdeno y cobre. Estas aleaciones se caracterizan por tener muy buena resistencia al desgaste.

Las fundiciones martensíticas al níquel y manganeso son utilizadas en aplicaciones donde se requiere muy alta dureza y resistencia al desgaste. El Ni-Hard es un ejemplo de este tipo de aleación con un 4.5 por ciento de níquel, 2 por ciento de cromo y 0.5 por ciento de silicio cuya dureza se encuentra dentro de un intervalo de 51 y 61 HRC.

Cuando la aplicación requiere una fundición que soporte altas temperaturas sin permitir la dilatación térmica se puede emplear aleaciones austeníticas con entre 15 y 20 por ciento de níquel, aunque la ideal es de alto costo. La alternativa puede ser una fundición con entre 0.6 y 1.25 por ciento de cromo y 1.5 a 2 por ciento de silicio para evitar la grafitización que es uno de los causantes de que dilate la fundición.

Cuando de aleaciones del hierro fundido se trata existe una gran cantidad de combinaciones que cambian las prestaciones del material para gran infinidad de aplicaciones, por lo que no es posible enumerar una a una estas aleaciones.

1.2. Soldadura

La coalescencia de metales durante varios siglos se ha ido perfeccionando en un proceso que, para la manufactura industrial actual, es indispensable. Unir bien dos piezas de metal en el pasado suponía un gran reto por la dificultad de realizar una fundición localizada. Actualmente, hay suficientes formas de soldar dos metales entre sí y se ha vuelto toda una ciencia que busca la manera de

que la unión sea tan buena como si nunca se hubiese existido tal separación. Aunque existen muchas variantes por las cuales la unión podría tener puntos débiles, la aplicación de calor es un factor que siempre realizará cambios en la microestructura de la unión por lo que siempre es aconsejable realizar los tratamientos térmicos recomendados. Defectos en la técnica del soldador pueden ocasionar socavación, incrustaciones, fisuras, porosidad, baja penetración, zonas afectadas por excesivo calor y muchas otras variantes que pueden perjudicar las propiedades mecánicas de la unión si la persona encargada de realizarla no sigue un proceso técnico.

En sus inicios, los métodos para soldar piezas han ido evolucionando desde la soldadura por forja hasta que se ha desarrollado procesos más controlados como la soldadura a gas y la soldadura de arco eléctrico. Ambos han logrado alto desarrollo en el siglo veinte y han dado paso a procesos modernos como la soldadura TIG con aplicaciones en soldadura de cualquier material metálico.

El avance de la soldadura industrial ha llegado al extremo de utilizar robots para automatizar el proceso y así evitar el error humano. Un ejemplo de esto es la industria automotriz donde, en lugar de necesitar cientos de soldadores, utilizan una pequeña cantidad de robots que trabajan sin parar para ajustar pieza o modificar amperaje y de tal manera hacer eficiente su proceso.

1.2.1. Soldadura por arco eléctrico

Este tipo de soldadura se caracteriza por utilizar, como fuente de energía, la electricidad para generar un arco eléctrico entre un electrodo, el material base y la tierra. En este grupo está la soldadura SMAW, GTAW y GMAW.

La soldadura SMAW o la soldadura al arco con electrodo revestido, utiliza como material de aporte el mismo electrodo que viene recubierto por un fundente especial encargado de proteger el charco de soldadura de los efectos del oxígeno y nitrógeno del ambiente. Su otra función es entregar el material de aporte de manera lisa y ordenada si es para un cordón de presentación o de que el material de aporte tenga fuerte penetración a costa de la estética. En la industria guatemalteca este sigue siendo el proceso más predominante. Tiene la desventaja que el proceso se interrumpe constantemente para cambiar el electrodo y limpiar escoria, razones por las que en industrias de primer mundo han optado por procesos continuos como MIG y MAG.

El proceso GMAW también conocido como MIG/MAG, es un proceso de soldadura con material de aporte continuo y utiliza un gas protector de los efectos del ambiente en el metal fundido.

La soldadura MIG utiliza como gas protector del ambiente comúnmente el Argón, ocasionalmente mezclado con CO₂ para realizar soldaduras en metales no ferrosos y aceros inoxidable por la necesidad de pureza en dichas soldaduras. Aunque también puede utilizarse MIG para soldar acero al carbono, su costo es mucho más elevado por el precio del Argón en comparación con el del CO₂. Por ello el CO₂, se utiliza en el proceso MAG, es excelente para soldar acero al carbono. Ambos procesos utilizan como material de aporte microalambre dosificado a la velocidad y amperaje que el usuario gradúe acorde al material, tamaño, espesor y posición de la pieza.

El proceso de soldadura GTAW utiliza electrodo de tungsteno no consumible y un gas inerte como protección de los gases atmosféricos. El electrodo es de tungsteno debido al alto punto de fusión del tungsteno, 3422°C, capaz de resistir la temperatura del arco sin fundirse; por ello, es no consumible

ya que solo se ocupa de transportar el flujo de electrones. El electrodo de tungsteno puede contener diferentes aleaciones lo que le ayuda mejorar la estabilidad del arco y entregar cordones con mayor calidad metalográfica. Para el aluminio se utiliza electrodo de tungsteno puro y con corriente alterna, mientras que para soldar acero al carbono o acero inoxidable lo recomendado es hacer uso de un tungsteno aleado con torio o con cerio. En el mercado es más común encontrar el “tungsteno toriado”, aunque este elemento de aleación representa un riesgo para la salud del soldador ya que es un elemento radiactivo. El tungsteno aleado con circonio es una alternativa al de torio y cumple con las mismas características de estabilidad de arco y alta calidad metalográfica, este puede ser utilizado tanto para aluminio como para aceros al carbono o inoxidables.

Para la soldadura con GTAW deben cuidarse todos los detalles de ajuste de máquina como preparación de pieza. La presión del gas inerte es un parámetro importante ya que lo ideal es entregar un flujo laminar, si la presión es excesiva el flujo será turbulento y este permite la formación de remolinos mezclados con aire, lo que contaminaría el charco de fusión. La elección del tipo de gas inerte es también importante, si se va a soldar en posición plana horizontal, se debe usar un gas más denso que el propio aire. Por ello, debe ser con Argón, mientras que si la posición de soldadura es sobrecabeza, debe utilizarse un gas inerte menos denso que el aire, por ello se debe utilizar Helio. La varilla de aporte debe permanecer siempre cercana al flujo laminar de gas inerte esto debido a que si se aleja mucho mientras la punta de la varilla está fundida se contaminará con aire, y la siguiente aportación contaminará la soldadura. Una máquina para GTAW tiene parámetros para variar corriente mientras se trabaja o para ajustar el post flow, que es la cantidad de gas inyectado luego de finalizar el arco mientras el charco fundido solidifica y así evitar que se contamine el final del cordón con el aire atmosférico.

2. EVALUACIÓN DE RESISTENCIA DE MATERIALES

2.1. Ensayos destructivos

Dado que es insuficiente evaluar a simple vista la superficie de una soldadura para determinar si cumple los requisitos necesarios cuando la pieza sea sometida a esfuerzos de tensión, compresión, flexión, presión, temperatura, entre otros, se pueden realizar ensayos para determinar las propiedades mecánicas con pruebas destructivas. De esta manera, se puede asegurar con mayor certeza que la pieza realizará su trabajo sin problema inmediato. Las pruebas destructivas arrojan diferentes resultados dependiendo de la temperatura de la probeta. Si se encuentra a alta temperatura, el material aumentará naturalmente su ductilidad y disminuirá su resistencia, por lo tanto la temperatura a la que se realice la prueba es un dato a tener en cuenta.

Como el nombre de este tipo de ensayo lo indica, la probeta quedará inservible después de la prueba. Por ello, no se realiza directamente si se trata de una pieza de máquina, sino que debe emularse la situación utilizando materiales iguales y realizar la soldadura en las mismas condiciones que se realizará luego en la parte de la máquina.

Estas pruebas destructivas son también, comúnmente, utilizadas para medir la habilidad de determinado soldador, las probetas que él entregue son sometidas a un ensayo de flexión, en el que debe flexionarse la probeta por la parte de la soldadura hasta cierto ángulo sin que la unión falle.

2.1.1. Ensayo de tracción

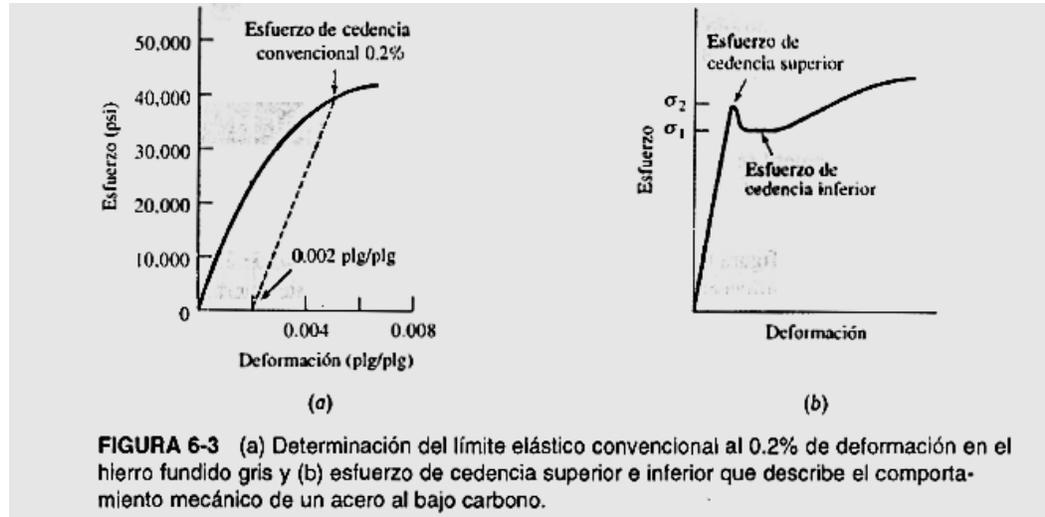
En el campo de ingeniería el ensayo de tracción o tensión en los materiales es de valiosa información, ya que indica las prestaciones principales que se requiere de un material o experimento especial. Se pueden obtener valores del esfuerzo máximo que soporta el material, su ductilidad, entre otros.

El ensayo consiste en someter a esfuerzos de tensión una probeta de medidas normadas a la máquina universal que indique la carga instantánea.

2.1.1.1. Esfuerzo de cedencia

Una importante propiedad que indica es el esfuerzo de cedencia, éste indica el esfuerzo que divide los comportamientos elásticos y plásticos. Es un parámetro del material importante de conocer, ya que si se va a diseñar una pieza que se someta a tensión se debe buscar que los esfuerzos no lleven el material a su zona plástica. Por lo tanto, conocer el esfuerzo de cedencia de diferentes materiales ayudará a tomar una decisión acertada. La otra opción es sobredimensionar el área transversal de la pieza para evitar la zona plástica, es la decisión fácil, mas no la óptima.

Figura 1. **Esfuerzo de cedencia en fundición gris y acero al carbono**



Fuente: ASKELAND, Donald. Ciencia e Ingeniería de los materiales. P 134

2.1.1.2. Resistencia a la tensión

También se obtiene la propiedad de resistencia a la tensión. Esta se refiere al máximo esfuerzo al que se somete durante la zona plástica antes de la fractura. Se llega a este punto de máxima carga cuando la probeta está a punto de sufrir estricción, a partir de este punto la carga empieza a disminuir y luego se fractura la probeta. Esta propiedad, habitualmente, se encuentra en la hoja técnica del material.

Se conoce por medio de la ecuación:

$$\text{Esfuerzo} = \frac{\text{Carga máxima}}{\text{Área}}$$

2.1.1.3. Módulo de elasticidad

A partir de este ensayo se obtiene el módulo de elasticidad o módulo de Young.

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon}$$

El módulo de Young E es la pendiente entre el esfuerzo σ y la deformación ϵ del material durante la zona elástica, donde la tendencia entre éstos dos es lineal. Esta propiedad está íntimamente relacionada con la energía de enlace de los átomos y, por ende, con la rigidez del material. El módulo de elasticidad es más alto en los metales de más alto punto de fusión.

2.1.1.4. Módulo de resistencia

También se puede obtener una propiedad de interés para quienes buscan un material tenaz, el módulo de resistencia E_r , que se obtiene del área bajo curva de la parte elástica del material, y se refiere a la energía que el material absorbe o libera al ser tensionado y liberado respectivamente.

$$E_r = (1/2)(\text{esfuerzo de cedencia})(\text{deformación a la cedencia})$$

2.1.1.5. Ductilidad

Del ensayo de tracción se obtiene una medida de la ductilidad, que es la capacidad que tiene el material bajo carga de deformarse sin fracturar.

$$\% \text{de elongación} = \frac{l_f - l_o}{l_o} \times 100$$

Los diseñadores eligen materiales con buenas propiedades de ductilidad ya que si hay un sobreesfuerzo el material se deforma y en el última instancia fractura.

2.1.2. Ensayo de dureza

Dureza es la resistencia que opone un material a la penetración o al rayado por otro. Dependiendo del tipo de material, así será el tipo de ensayo para obtener la dureza, no se determina de la misma manera la dureza del hule que del acero.

En el área de los metales, la dureza puede servir para comprobar si el material ha pasado por tratamiento térmico o endurecimiento superficial o bien, evaluar los resultados después de un procedimiento térmico. Los métodos más usuales para conocer la dureza de un metal es por medio de los ensayos de Rockwell y Brinell, ambos realizan una penetración con bolas especiales al material para realizar la medición de dureza.

2.1.2.1. Dureza Brinell

El ensayo de Brinell no está diseñado para materiales de extrema dureza, ya que la bola del durómetro se deforma. Tampoco se realiza en cementaciones porque la capa endurecida puede ser más delgada que la bola del durómetro. Durante un ensayo Brinell se mantiene durante 15 segundos la carga en materiales no ferrosos y 30 segundos para metales más suaves. La huella es medida y se obtiene el número de dureza brinell *HB* de la ecuación:

$$HB = \frac{\text{carga sobre la bola}}{\text{área indentada}} = \frac{P}{\frac{\pi D}{2}(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

Donde P es la carga aplicada en kilogramos, D el diámetro de la bola de acero en milímetros, y d el diámetro de la huella en milímetros.

2.1.2.2. Dureza Rockwell C y Rockwell B

El ensayo de dureza Rockwell es similar al de Brinell, ya que también depende de la penetración de un indentador bajo cierta carga. Dicha carga es menor a las utilizadas en el ensayo de Brinell. Por esta razón la huella resultante es de menores dimensiones, aunque es utilizado para materiales más duros que los que se ocupa el ensayo de Brinell. El ensayo de Rockwell utiliza una bola de acero o un cono de diamante con la punta levemente redondeada y el número se lee en el indicador de manera automática y éste se relaciona con la profundidad de la huella.

La dureza Rockwell se mide en dos escalas diferentes, a B y la C. La escala rockwell B utiliza un penetrador de bola. Su rango de medida va del 0 al 100, no se utiliza para materiales más duros que B100 ya que la bola puede aplanarse. Se utiliza para durezas intermedias como aceros de bajo y mediano carbono con o sin tratamiento térmico.

Cuando la dureza sobrepasa B100 se utiliza la escala Rockwell C, por medio de un penetrador cónico de diamante, un valor menor a C20 puede no ser confiable, por lo que se utiliza entre C20 y C70, que son los dos extremos posibles de dureza.

Figura 2. **Tipos de penetradores para ensayos de dureza**

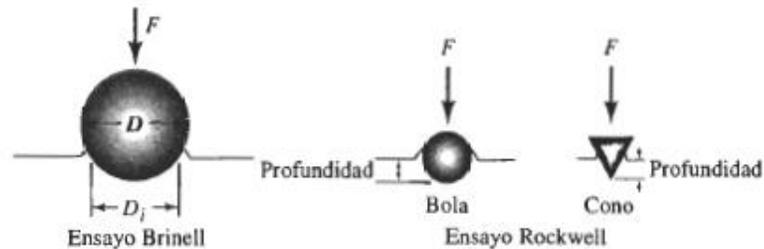


FIGURA 6-11 Ensayos de dureza Brinell y Rockwell.

Fuente: ASKELAND, Donald. Ciencia e Ingeniería de Materiales. P. 142

2.1.2.3. Dureza Vickers

El ensayo de microdureza Vickers es muy similar al ensayo de Brinell. Se realiza la penetración y se efectúa la medición de dureza con base en la carga aplicada a determinada área indentada. El penetrador es una pirámide de base cuadrada, cuyo ángulo entre caras opuestas es de 136° según la norma ASTM E 92. Es un método muy eficaz para medir durezas en pequeños espesores de hasta 0.006 pulgadas. Por ello, es muy utilizada para medir la capa de nitruración del acero.

2.2. Ensayos no destructivos

Se le conoce como ensayo no destructivo a toda aquella evaluación de soldadura que no altere las propiedades físicas, mecánicas, dimensionales o químicas. En otras palabras la pieza evaluada no debe sufrir ningún tipo de alteración.

Este tipo de ensayo se realiza en secciones críticas y no proveen un dato tan exacto como lo hacen los ensayos destructivos, aunque la ventaja de no destruir la pieza lo hace ideal para evaluar la reparación de soldadura real.

Por medio de los ensayos no destructivos se puede investigar gran cantidad de variables importantes para certificar una soldadura de buena calidad. Entre los parámetros que se pueden evaluar, se pueden mencionar: evaluación de corrosión, detección de fugas, concentración de tensiones, composición química, características mecánicas, físicas y tecnológicas. Para la evaluación de soldadura especialmente se utiliza la inspección visual, tintas penetrantes, partículas magnéticas, ultrasonido y radiografía.

2.2.1. Inspección visual

Es el método más utilizado por ser altamente práctico. Para que la inspección visual sea válida y completa, el inspector debe realizar una serie de controles antes, durante y después de la soldadura.

Antes de soldar, el inspector analiza el material base en busca de imperfecciones o mala preparación de la pieza. Durante la soldadura, esta misma persona, evalúa la técnica de aplicación y determina si la primera capa de soldadura tendrá buena penetración ya que es la más importante desde el punto de vista de la resistencia final.

La última capa de soldadura o penetración también es evaluada en busca de grietas, socavamiento, incrustaciones, tamaño del cordón, regularidad del cordón y salpicaduras de material de aporte.

La inspección visual es útil, pero existen pruebas no destructivas que dan información más minuciosa sobre el resultado final.

2.2.2. Radiografía

Este ensayo aprovecha las propiedades de la longitud de onda corta, de penetrar objetos opacos a la luz ordinaria. La cantidad de radiación emitida en parte es absorbida por la pieza y, si en su camino encuentra discontinuidades, la radiación tendrá menos metal que atravesar, por lo que esta variación se registra en una película sensible a la radiación que dará una imagen del defecto. La imagen es una sombra de rayos X conocida como radiografía.

Es considerado el método no destructivo más confiable para evaluar imperfecciones internas. Aunque se requiere que el evaluador sea especializado, porque la radiografía presenta en un plano todas las imperfecciones de la soldadura, por lo que, visualmente puede aparentar tener muchas fallas, sin que este sea motivo de calificarla como no apta para la aplicación. Simplemente con variar el ángulo de exposición a los rayos X influencia en la radiografía.

2.2.3. Ensayo metalográfico

La finalidad de este tipo de ensayo no destructivo es observar micrográficamente el tipo de estructura del material y analizar la forma y tamaño de grano para luego determinar si ha sido expuesto a tratamiento térmico o mecánico. El evaluador puede, entonces, diagnosticar el comportamiento aproximado que tendrá el material cuando se someta al trabajo para el cual fue diseñado. La preparación adecuada de la pieza antes de visualizarla en el microscopio es fundamental, por lo que el desbaste grosero, el desbaste

intermedio, desbaste fino, el pulido final y el ataque químico deben realizarse siguiendo el procedimiento adecuado para cada tipo de metal.

El desbaste grosero se realiza mediante una lijadora de banda que tiene como objetivo aplanar la superficie rugosa gruesa sin ejercer demasiada presión que pueda rayar el metal. El papel de lija recomendado para esta fase es de carburo de silicio número 240.

Para el desbaste intermedio se utiliza una lija de carburo de silicio número 320, 340 y 400. El proceso se realiza apoyando la lija en una mesa y friccionando uniformemente la pieza sobre el papel de lija.

Para el pulido fino, el desbaste se debe realizar en el material cambiando la dirección en la que se fricciona la pieza en 90 grados, para conseguir desaparecer las rugosidades imperceptibles a simple vista. Puede realizarse mediante un disco giratorio de bajas revoluciones con un abrasivo de óxido de aluminio, ideal para materiales ferrosos. También se puede realizar el pulido fino con papel de lija, número 600, 1000 y 1500. La apariencia del pulido fino debe ser semejante a la superficie de un espejo, sin ninguna rayadura a simple vista ya que cuando se ven en el microscopio alteran significativamente la realidad.

Una alternativa al pulido fino es el pulido electrolítico. Se realiza sumergiendo el metal en un electrolito especial que realiza la función de un ánodo y como cátodo se elige un material inerte como níquel, cromo o platino. Dentro del electrolito hay aspas encargadas de agitar la solución sobre la parte de la pieza que se está atacando. Se debe controlar la velocidad de rotación, el tiempo que se expone el metal, el amperaje y el voltaje, para obtener una superficie suficientemente lisa para ser observada en el microscopio.

Por último se realiza el ataque químico, que consiste en aplicar en la superficie pulida un reactivo adecuado, se enjuaga con alcohol y se seca al aire natural. El objetivo del reactivo es crear reacciones con la estructura que se reflejarán contrastando los elementos que se logren atacar y los que no. De esta manera se obtiene una visión más clara en el microscopio para facilitar la tarea de interpretación.

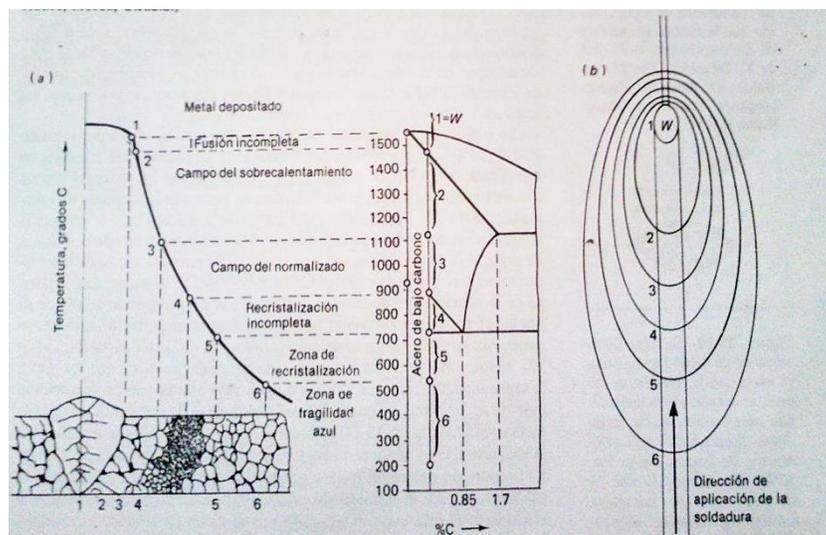
3. METALURGIA Y METALOGRAFÍA DEL HIERRO FUNDIDO

3.1. Metalurgia de la soldadura

Comparando la fundición que tiene lugar en un horno de cubilote, donde se funden grandes volúmenes de metal, en la soldadura se realiza la fundición de pequeños volúmenes. Como está focalizado el punto de calor, se dispersará rápidamente en el resto de la pieza. Esto ocasiona que la soldadura se solidifique bastante más rápido que en una fundición en un horno.

En la figura 3 (a) se puede observar la curva de enfriamiento para metales ferrosos y la transformación de grano que sufre el metal durante la solidificación de la soldadura. Las líneas isoterma, figura 3 (b), están en relación con la curva de enfriamiento.

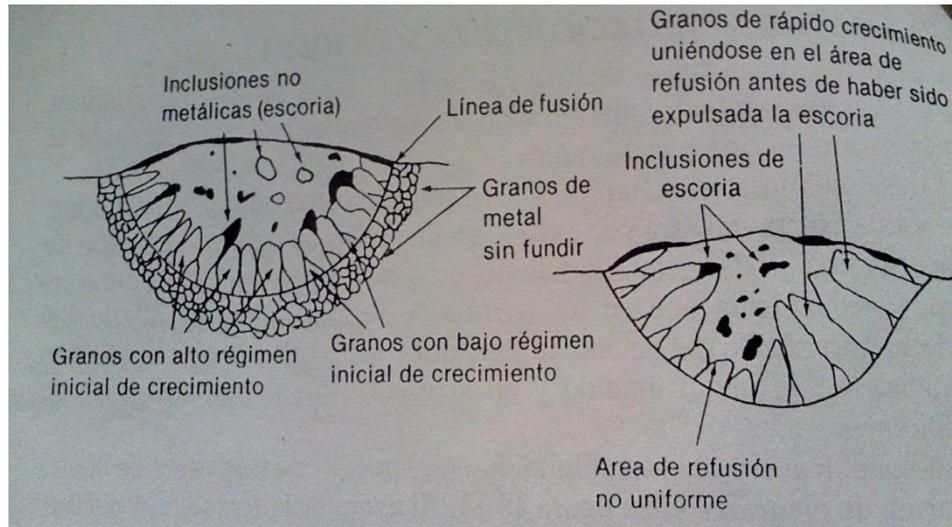
Figura 3. Solidificación en soldadura y tipos de grano en la ZAT



Fuente: HORWITZ, Henry. Soldadura, aplicaciones y práctica. P. 515

El depósito de soldadura comienza a solidificar en la línea de fusión. Entonces, comienza la formación y crecimiento de grano, lo que da lugar al desplazamiento de las inclusiones no metálicas en forma de escoria hacia la superficie del cordón. Esto significa que, sin importar la posición en la que se aplique la soldadura, la escoria será expulsada y siempre quedará del lado opuesto a la raíz. Esta es la razón por la que la escoria sale a la superficie en la mayoría de los casos, y no por la falsa creencia de que lo hace por flotación.

Figura 4. **Solidificación del material de aporte**



Fuente: HORWITZ, Henry. Soldadura, aplicaciones y práctica. P. 515

La zona afectada térmicamente ZAT, es la parte adyacente al charco de fusión que se ve afectada en su estructura y propiedades mecánicas. Debido a que la temperatura en la ZAT alcanza diferentes valores y se enfría a diferentes razones, existe la posibilidad de tener una zona con mayor resistencia que el metal base, llamada área normalizada, también es posible tener zonas que pierden ductilidad donde el grano es grueso y su resistencia al impacto se reduce. Esto se agudiza en los metales sensibles al tratamiento térmico. La ZAT se manifiesta por cambios de dureza a distancias perpendiculares desde el

cordón de soldadura. Como regla general, si la dureza en la ZAT es mayor a la dureza del material base, se puede asumir que tiene cierto grado de fragilidad. Los aceros de bajo carbono tienen una ZAT insignificante ya que no son aptos al tratamiento térmico y sus propiedades adyacentes al depósito de soldadura son cercanas a las del material base. En los metales ferrosos con un contenido mayor de 0.25% de carbono se recomienda realizar un precalentamiento. Con esto se logra evitar fragilidad en la zona afectada térmicamente.

3.2. Solidificación

La solidificación ocurre para todo metal o aleación en algún momento de su manufactura al pasar de estado líquido a sólido. Controlando la solidificación se puede regular el tamaño y crecimiento de grano. Esto tiene relación directa con las propiedades mecánicas del metal o aleación. La solidificación se da siguiendo dos secuencias, la nucleación y el crecimiento.

La nucleación tiene lugar cuando se forma una ínfima cantidad de sólido en el líquido. Esto sucede cuando el líquido o parte de él desciende su temperatura por debajo de la temperatura de fusión. Cuando comienza la formación del sólido, si el crecimiento posterior hace que la energía total del sistema disminuya. Entonces, el sólido es estable. La nueva partícula formada es el núcleo, a partir de él sucederá el crecimiento. La nucleación homogénea, tiene lugar cuando el líquido se enfría lo suficiente por debajo de la temperatura de solidificación de equilibrio siguiendo dos etapas: se agrupan los átomos y así se forman los embriones, esto permite la mayor diferencia en energía libre de volumen entre líquido y sólido. La nucleación homogénea es cuando el subenfriamiento es tal, que forma un núcleo estable.

La nucleación homogénea nunca ocurre de forma natural en los metales. Se debe crear un ambiente ideal que solo se puede conseguir en un laboratorio especializado. En la naturaleza, el metal líquido tiene contacto con las impurezas del ambiente o con las impurezas que se encuentran en el recipiente que contenga el metal líquido. Estas provocan una superficie para la formación del sólido. A la nucleación sobre impurezas se le denomina nucleación heterogénea.

Actualmente, se introducen impurezas en el metal líquido porque esto permite controlar el tamaño de grano, y tanto mayor sea el área superficial del grano mayor será el endurecimiento por tamaño de grano. Por ello, al proceso de introducir impurezas intencionalmente se le denomina refinación de grano o inoculación.

El crecimiento sucede después de la nucleación, y básicamente es que el núcleo empieza a crecer por los átomos de los alrededores que se van uniendo al sólido. Conforme el calor es expulsado del sistema, los átomos de líquido se unen a la superficie del sólido.

Hay que considerar tanto el calor específico del líquido como el calor latente de fusión. El calor específico es el calor necesario para disminuir un grado la temperatura de una unidad de medida de peso del metal. El calor específico se elimina antes, y se puede lograr por radiación hacia el ambiente o por conducción desde el recipiente que contiene el metal líquido. Antes de que se complete la solidificación se debe extraer el calor latente. La manera en la que se elimine este calor determinará el crecimiento y la estructura resultante. Hay dos tipos de crecimiento, el planar y el dendrítico. El crecimiento planar es cuando un líquido bien inoculado se enfría al equilibrio y la temperatura del líquido es mayor a la temperatura de solidificación. El calor latente de fusión se

elimina por conducción por medio de la superficie del recipiente con los alrededores. En el crecimiento dendrítico, la manera de disipar el calor es absorbido por el líquido subenfriado.

3.3. Relevado de esfuerzos

Los altos contenidos de carbono presente en los hierros fundidos sirven para crear estructuras endurecidas en toda la periferia del cordón y esfuerzos internos que favorecen la aparición de fisuras. Para mitigar este efecto se puede realizar un tratamiento de revelado de esfuerzos, como también un normalizado o un tratamiento de revenido. Consisten en calentar uniformemente el metal base y la soldadura final a una temperatura inferior al intervalo crítico del metal base para luego reducir la temperatura uniforme y lentamente.

La temperatura alcanzada en el tratamiento térmico posterior no debe exceder la temperatura de intervalo crítico, porque hacerlo representa modificar el tamaño de grano y su estructura de manera desfavorable, por lo que la medición y control de temperatura durante la ejecución del tratamiento térmico debe ser controlada con precisión y exactitud.

Se debe elevar la temperatura de manera gradual, evitando así el choque térmico hasta alcanzar una temperatura inferior a la del intervalo crítico, según el metal base utilizado, y para que dicho tratamiento sea efectivo, el tiempo de permanencia a dicha temperatura debe ser aproximadamente 1 hora por cada pulgada de espesor. Seguido del mencionado enfriamiento lento hasta la temperatura ambiente.

Se puede calcular la temperatura del material conociendo la composición química del material base y su espesor, por medio del siguiente procedimiento matemático:

Se determina el equivalente químico de carbono del acero:

$$C_c = C + \frac{Mn}{20} + \frac{Ni}{15} + \frac{Cr + Mo + V}{10}$$

Se determina el equivalente en carbono para el espesor de lámina:

$$C_t = 1 + 0.005(\text{Espesor de placa en milímetros})$$

Se determina el equivalente total de carbono:

$$C_T = (C_c)(C_t)$$

Luego se obtiene la temperatura en grados Fahrenheit:

$$T_{\circ F} = 630(\sqrt{C_T} - 0.25)^{1/2} + 32$$

Los efectos detallados que produce un tratamiento térmico, y que se desarrollan más adelante, son: recuperación, relajamiento, revenido, recristalización y esferoidizado.

3.3.1. Recuperación

El efecto de Recuperación se logra siempre que se eleve considerablemente la temperatura de la pieza soldada para realizar un relevado de esfuerzos. Este efecto se logra calentando toda la pieza a una temperatura homogénea para evitar esfuerzos térmicos. La temperatura para lograr la recuperación es aproximadamente 200 °C. A esta temperatura no hay cambio significativo en la estructura de los granos pero se alcanza a reducir esfuerzos internos de contracción.

El fenómeno de la recuperación se consigue siempre que se eleve la temperatura del material soldado, y que su permanencia a tal temperatura debe ser suficientemente larga para conseguir liberar tensiones internas. La primera hora es la de mayor provecho para conseguir los efectos del relevado de esfuerzos.

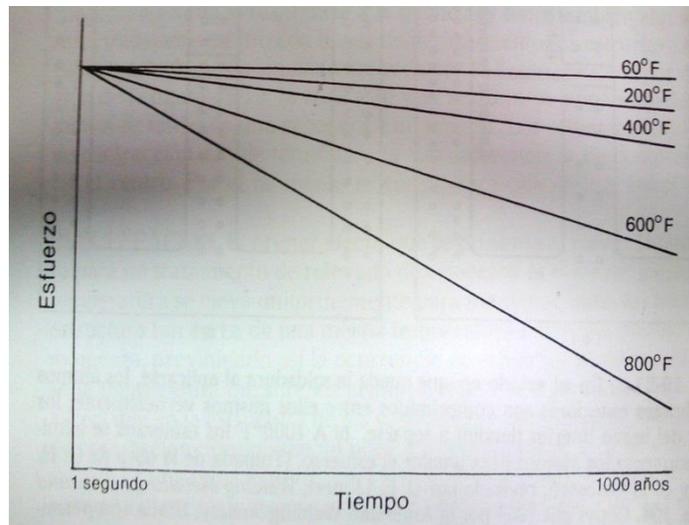
3.3.2. Relajamiento

El Relajamiento se obtiene elevando más la temperatura en relación con la necesaria para una recuperación, cerca de los 530 °C o más, por lo que se logra eliminar los esfuerzos de contracción casi en su totalidad.

A través de los años, átomos dentro de un metal tienden a reducir su esfuerzo interno de manera natural, esto se debe a que los átomos del metal tienen cierto movimiento o acomodo. La velocidad con la que ocurre dicho movimiento depende directamente de la temperatura a la que esté sometido el metal. A temperatura ambiente, una pieza soldada disminuirá sus esfuerzos internos de manera insignificante, incluso, luego de cientos o miles de años, por

lo que elevar la temperatura permite acelerar el proceso natural de movimiento de los átomos. Como se puede observar en la siguiente figura.

Figura 5. **Reducción de esfuerzos internos a diferentes temperaturas**



Fuente: HORWITZ, Henry. Soldadura, aplicaciones y práctica. P. 524

El relevado o alivio de esfuerzos se basa en ésta idea. Se lleva la pieza soldada a una temperatura cercana al punto conocido como movimiento plástico del metal, para facilitar el acomodo natural de átomos. Un efecto desfavorable y difícil de controlar es la deformación producida por las altas temperaturas del relajamiento del metal. A pesar de afectar las dimensiones de la pieza, es el método mayormente recomendado para eliminar esfuerzos, por encima del maquinado superficial que también elimina el material sometido a mayores esfuerzos, pero que pierde en mayor proporción las dimensiones de la pieza.

La elección de la temperatura para aliviar esfuerzos está delimitada, entonces, por la deformación térmica. Cuando se analiza la figura anterior se observa que el alivio del esfuerzo depende tanto de la temperatura como del

tiempo sometido a dicha temperatura. Según el comportamiento lineal que se observa de la gráfica anterior, se puede concluir que, si la deformación delimita la temperatura deseada para el alivio de esfuerzos, se puede utilizar una temperatura más baja, pero se debe compensar sometiendo la pieza durante más tiempo a la temperatura seleccionada.

En una soldadura, se puede adoptar, como regla general, para el tiempo de permanencia a temperatura constante de alivio de esfuerzos de una hora por cada pulgada de espesor del material base. Cuando se hacen varias pasadas de soldadura, el cordón externo va aliviando de esfuerzos levemente al cordón interno, pero crea los propios en sus alrededores.

3.3.3. Revenido

El revenido es un tratamiento térmico de alivio de esfuerzos que se realiza para eliminar la extrema dureza después de un temple, pero también se puede utilizar en uniones de soldadura.

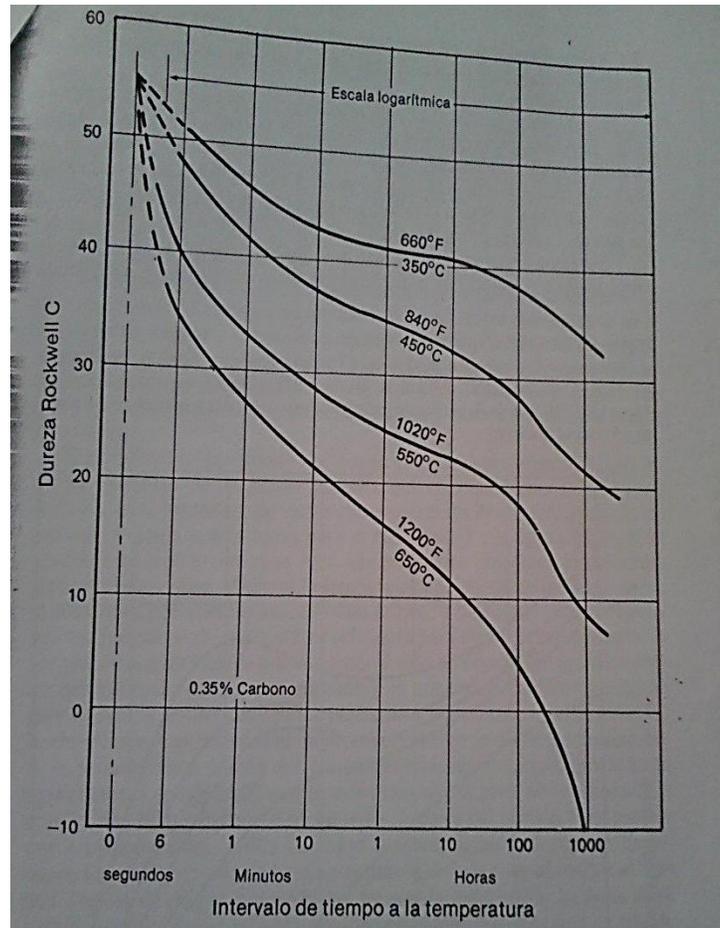
Si el material por soldar se considera templable, como un acero de mediano y alto contenido de carbono, es natural que en la zona afectada térmicamente aparezcan estructuras de alta dureza como la martensita, que son susceptibles a provocar fisuras. Por tal motivo, se supone que un acero templable tiene baja soldabilidad. Que se le considere de baja soldabilidad no impide que se realice la unión y que ésta posea alta resistencia. Haciendo uso del procedimiento técnico adecuado se consiguen realizar dichas uniones.

La dureza se forma en un acero de mediano y alto carbono en diferentes magnitudes dependiendo de la velocidad de enfriamiento. En una soldadura, generalmente, se enfría al aire a temperatura ambiente, la cual es muy baja y

se considera un enfriamiento veloz, lo que permite que la transformación de austenita en martensita, que es una estructura de pequeños cristales de carburo de hierro, responsable de la extrema dureza.

La estructura de martensita es indeseable en la periferia de la soldadura, por lo que se efectúa el revenido para conseguir transformar la martensita en ferrita, la austenita aun presente se transforma también en ferrita, y la perlita fina presente aumenta de tamaño. Lo que sucede a escala microscópica es que los diminutos cristales de carburo presentes en la martensita y los de la perlita fina, aumentan de tamaño. A esto se debe la disminución de dureza después del tratamiento, y esto se consigue primordialmente llevando el metal a la temperatura recomendada para el revenido y no tanto por el efecto del tiempo de permanencia a dicha temperatura. Como se puede observar en la siguiente imagen, menos de una hora es suficiente para obtener la disminución de dureza necesaria.

Figura 6. **Reducción de dureza en relación al tiempo de permanencia a diferentes temperaturas**



Fuente: HORWITZ, Henry. Soldadura, aplicaciones y práctica. P. 527

La razón de disminución de dureza en el tiempo es mayor al principio, y rápidamente se comienza a relentizar. Sin embargo, los costos económicos por conservar una pieza a temperatura de revenido se mantienen. Dicho en otras palabras, reducir en 10 unidades de dureza Rockwell C en los primeros minutos del revenido, puede tomar 25 minutos; pero luego de una hora de tratamiento, reducir otras 10 unidades de dureza Rockwell C puede tomar cerca de 10 horas. Es en extremo costoso e impráctico mantener una pieza recién templada o soldada a extensos tiempos de tratamiento sin resultados significativos.

El soldador profesional tiene la capacidad de evitar la formación de dureza en cordones de varias pasadas, lo puede lograr si no permite que la temperatura disminuya entre pasadas. Así, el cordón superior le servirá de revenido al anterior, de esta forma, hasta depositar el último cordón.

En ciertos casos, el revenido puede resultar contraproducente, es decir, que aumente la dureza, este caso sucede si el metal que se está tratando es de alta aleación.

3.3.4. Recristalización

Los metales son formados por diminutos cristales, que se rompen en gran cantidad de fragmentos cuando se somete el material al trabajo en frío o deformación. Si se llevan los nuevos fragmentos a temperatura de recristalización, se formarán nuevamente cristales independientes que si se mantienen a esa temperatura o se eleva, el tamaño de los nuevos granos crece, provocando que los anteriores cristales sean absorbidos por los nuevos. Este proceso se conoce como recristalización.

Es bien sabido que el trabajo en frío como el mecanizado, el taladrado, el pulido, el rolado, el doblado, entre otros inducen, inevitablemente, esfuerzos internos, que pueden ser mermados por el usuario que trabaja el material. Mediante la aplicación de los métodos adecuados puede evitar la menor formación de esfuerzos internos, pero nunca desaparecen completamente. Al elevar la temperatura del metal a temperatura de recristalización se consigue arreglar los fragmentos de cristales producidos por los anteriores métodos de trabajo en frío mencionados, quedando granos nuevos y libres de esfuerzos internos.

Los efectos de esfuerzos internos debidos a la contracción de una soldadura enfriándose son extremadamente pequeños, por lo que el revelado de esfuerzos en soldadura no disminuye esfuerzos internos por recristalización, sino por recuperación y relajamiento.

3.3.5. Esferoidizado

Esferoidizar consiste en la transformación de partículas bainita o perlita, en carburo con forma esférica con la finalidad de obtener la coalescencia de las partículas y se logren visualizar por un lente de microscopio.

En un cordón de soldadura, cuando el material base es un acero de bajo contenido de carbono, en la zona afectada térmicamente se tiene una microestructura de perlita que, con el tratamiento de revelado de esfuerzos, se le transforma en partículas semiesféricas, que con un aumento de temperatura o un incremento en el tiempo de permanencia, la forma esférica de las partículas se afina e incrementan dimensión.

En cambio en un cordón de soldadura, en un acero de contenido medio de carbono, las partículas presentes en la zona afectada térmicamente son pequeños esferoides de carburo que dentro tienen agujas de martensita. Al someter esta soldadura a un revelado de esfuerzos, el carbono procedente de las partículas más pequeñas, las de martensita, se precipitan sobre las partículas mayores de dimensión. Cumpliendo con la ley general de las partículas pequeñas contenidas en un metal.

En una unión soldada, el esferoidizado comienza durante la soldadura, se forma perlita en la zona que alcanza la temperatura crítica y, luego, comienza a tomar forma esférica en un proceso relativamente lento, resultando austenita en

la zona afectada térmicamente. Y termina de completarse durante el tratamiento térmico de relevado de esfuerzos.

En un proceso como el de soldadura por puntos, el tiempo de aplicación de calor es tan corto, que no alcanza para lograr la transformación de perlita a austenita.

Si la intención y la necesidad del técnico soldador es reducir las tensiones al mínimo, y homogenizar la estructura completamente en la zona afectada térmicamente, debe acudir a otro tratamiento térmico de ablandamiento: el recocido completo. El recocido completo consiste en elevar la temperatura de la pieza soldada cerca de 100 °F encima de la temperatura crítica o temperatura de austenización, y someterla un largo período a esta condición. Como regla general, se estima el tiempo según el espesor de la pieza; una hora por cada pulgada de espesor. Luego, se enfría lentamente dentro del horno, sumergiendo la pieza en cal o ceniza o utilizando un aislante especial con baja transferencia térmica, como la lana de roca o la fibra de vidrio. Existe un riesgo en la realización del recocido, y es que a las temperaturas a las que se realiza, se puede dar el fenómeno de la descarburización. La manera de controlarlo es desplazar el oxígeno del ambiente donde se someta al recocido, ingresando un gas inerte dentro del horno. En el tratamiento de relevado de esfuerzos no ocurre esto porque las temperaturas y tiempo de permanencia son inferiores.

Existe la posibilidad de realizar un normalizado, que es un tratamiento térmico parecido al Recocido, ya que también se eleva la temperatura aproximadamente 100°F por encima de la temperatura de austenización y con los mismos tiempos de permanencia, con la diferencia en el método de enfriamiento. Esta acción sencilla genera cambio en la estructura. Mientras que en el recocido se enfría en el horno, en el normalizado se enfría al aire. El

recocido entrega microestructuras de carburo de perlita laminar gruesa o carburo esferoidizado, el normalizado entrega perlita laminar fina, que es más dura, pero óptima para condiciones de servicio. Se aplica normalizado cuando se desea reducir esfuerzos por trabajo en frío, eliminar endurecimientos y concentraciones de esfuerzos en zonas afectadas por el calor en soldaduras, homogenizar estructuras.

3.4. Metalografía

La manera más certera de identificar un hierro fundido es mediante su estructura metalográfica, aunque existen otras variables que crean una amplia gama de combinaciones, ya que también es factor el contenido de aleación e impurezas. La velocidad de enfriamiento luego de su fundición, el tratamiento térmico posterior y el contenido de carbono, que son características que en la mayoría de las ocasiones reales se desconocen.

De las principales variables mencionadas con anterioridad, el carbono desempeña una importante función en el tipo de hierro fundido según la forma en que se presente. Generalmente, se puede encontrar libre en forma de grafito, o combinado en forma de carburo de hierro o cementita. Ocasionalmente, se encuentran otras estructuras propias de una alteración intencional para mejora de las prestaciones del material para aplicaciones especiales por medio de un tratamiento térmico.

3.4.1. Microestructura de la fundición blanca

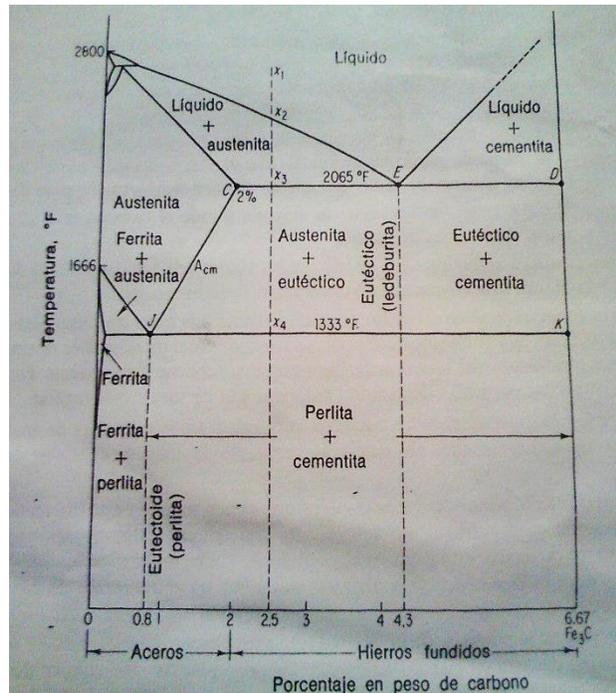
La microestructura dominante en un hierro fundido blanco es la forma combinada del carbono: la cementita.

La cementita es una microestructura que vuelve al hierro fundido blanco en un material extremadamente resistente al desgaste, y también muy frágil y poco maquinable. Las fundiciones completamente blancas, tienen dichas limitantes y por ende escasas aplicaciones, por lo que se utiliza donde lo único importante es la resistencia al desgaste como boquillas de extrusión, mezcladores de cemento, entre otros. La fundición blanca cobra especial importancia para elaborar fundición maleable y fundiciones blancas aleadas.

Las prestaciones mecánicas de este material son: dureza Brinell entre 375 a 600; resistencia a la tensión, de 20 mil a 70 mil psi; resistencia a la compresión, de 200 mil a 250 mil psi, módulo de elasticidad de 24 a 28 millones de psi.

En la siguiente figura se puede estudiar el enfriamiento de una fundición blanca al 2.50 por ciento de carbono.

Figura 7. **Diagrama Hierro-Fe₃C de fundición blanca al 2.5 por ciento de carbono**

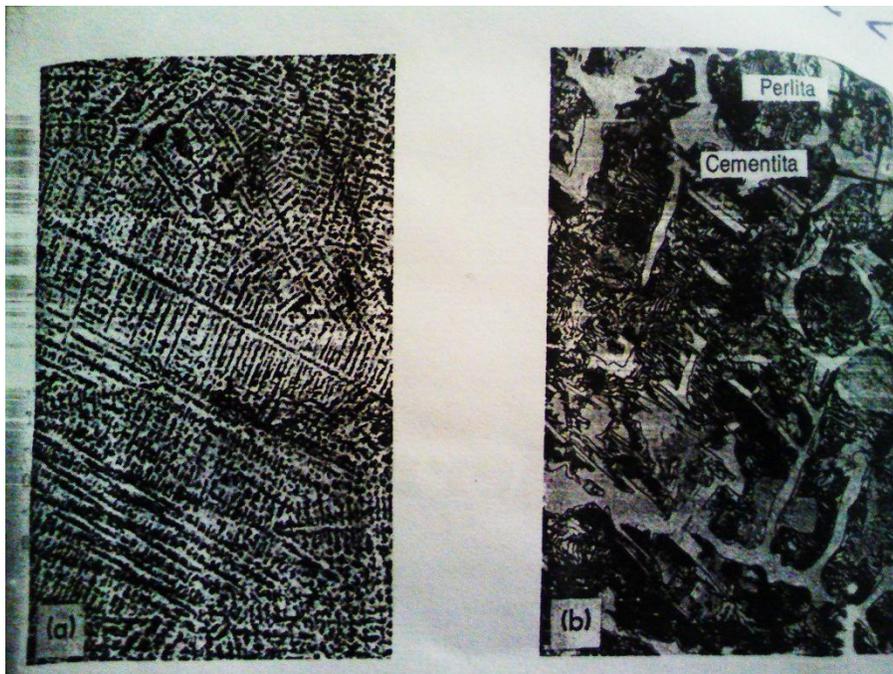


Fuente: SYDNEY H. Avner. Introducción a la metalurgia física. P. 422.

En el punto x_1 se encuentra como solución líquida. Esta se mantiene hasta que se enfría a x_2 , y comienza la formación de cristales de austenita y se da el inicio de la solidificación. Al avanzar la solidificación, el líquido se enriquece de carbono y la austenita primaria se mueve por la línea de solidus. Luego, a la temperatura eutéctica de 2065 °F el líquido experimenta la reacción eutéctica a temperatura constante y se forma la mezcla eutéctica y cementita, mejor conocida como ledeburita. Al continuar enfriando, hasta la temperatura eutectoide de 1333°F, la austenita restante de la aleación sufre la reacción eutectoide a temperatura constante y se forma la perlita. Desde esta temperatura, hasta la temperatura ambiente, la estructura no sufre modificación alguna.

En la siguiente figura se aprecia la microestructura de la fundición blanca a 20x (a) y a 250x (b). Y las partes oscuras son de perlita mientras que las partes blancas son de cementita.

Figura 8. **Fundición blanca a 20x y 250x**



Fuente: SYDNEY H. Avner. Introducción a la metalurgia física. P. 423.

3.4.2. **Microestructura de la fundición maleable**

La fundición blanca está formada en gran parte por cementita, que es un estado metaestable, que es una tendencia a que la cementita se descomponga en grafito y ferrita. Esta degradación es favorable para volver maleable el hierro fundido blanco y se convierte en hierro fundido maleable.

Existen elementos de aleación no metálicos que favorecen el cambio de estado de la cementita, entre ellos el principal es el silicio, conocido por ser un excelente grafitizador de la cementita a altas temperaturas.

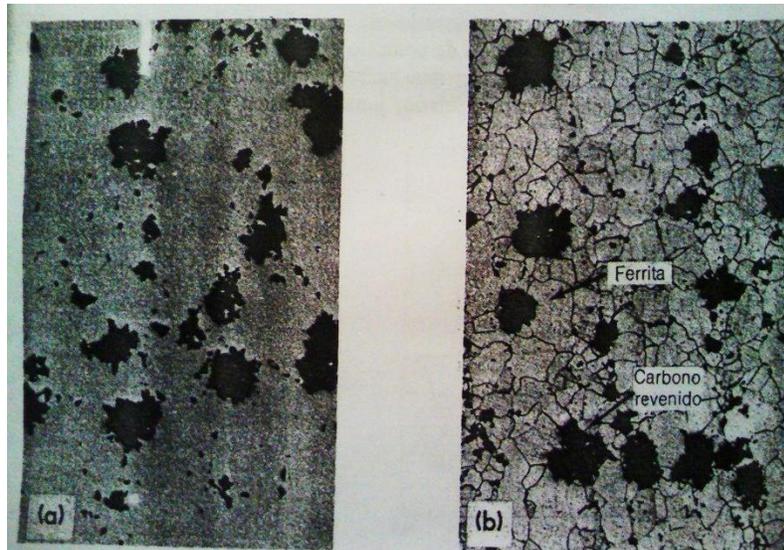
La composición química que debe tener la fundición blanca para ser convertida en fundición nodular es: carbono entre 2.00 y 2.65 por ciento, silicio entre 0.90 y 1.40 por ciento, manganeso entre 0.25 y 0.55 por ciento, azufre 0.05 por ciento y fósforo menos de 0.18 por ciento. Con esta composición, se puede realizar una maleabilización para convertir la cementita en ferrita más nódulos irregulares de carbono revenido conocido como grafito. El otro requisito es aumentar la velocidad de cambio de estado por medio de la primera y segunda etapa del recocido. La primera etapa del recocido consiste en elevar la temperatura entre 900 y 960 grados centígrados para convertir la perlita en austenita y con ello se disuelve la cementita. La conversión inicia cuando un núcleo de grafito agota el carbono de la austenita y con ello la cementita adyacente se disuelve en mayor medida. Los núcleos de grafito se forman en torno al primer núcleo a velocidades similares para luego dar paso a la formación de nódulos, o también conocidos como carbono revenido. Durante este desarrollo de nucleación y grafitización, los elementos no metálicos como el silicio intensifica el efecto de la conversión en carbono revenido debido a que el silicio se funde fácilmente con el hierro.

La cantidad de carbono revenido depende en gran parte de la temperatura de recocido y del contenido de silicio. Tanto mayor sea la temperatura de recocido mayor será la velocidad de transformación del carburo primario y los subsecuentes carbonos revenidos, aunque la temperatura se ve limitada por la deformación de la pieza que luego debe enderezarse, lo que no es deseable. En general las temperaturas oscilan entre 900 °C y 960°C.

El tiempo de permanencia a esta temperatura es bastante alto, debido a que la grafitización se lleva a cabo muy lentamente. Generalmente, son necesarias no menos de 20 horas para piezas pequeñas, hasta llegar incluso a

72 horas para piezas grandes. La estructura resultante después de la primera etapa de recocido es de nódulos de carbono revenido.

Figura 9. **Estructura del hierro maleable, sin ataque químico (a) y con ataque químico (b)**



Fuente: SYDNEY H. Avner. Introducción a la metalurgia física. P. 425.

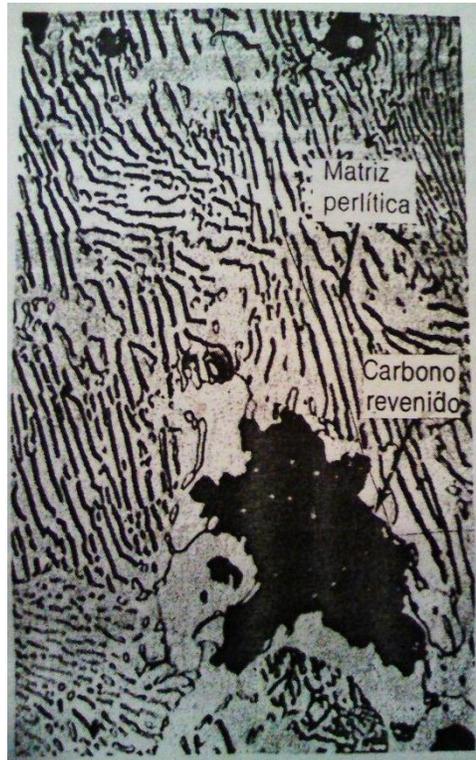
Luego de culminado el tiempo de permanencia para la pieza, se inicia la segunda etapa del recocido. Consiste en enfriar tan rápidamente como sea necesario a los 760° C, para iniciar la segunda etapa del recocido en la estructura de la fundición. Dicho enfriamiento se logra entre 2 y 6 horas, ya que la razón de cambio de temperatura oscila entre los 5 y 15 °F por hora, según necesidad. Cuando la pieza se enfría lentamente, el carbono que se encuentra en la austenita se convierte en grafito en el carbono revenido ya creado y la austenita sobrante se transforma en ferrita. La pieza, es ahora fundición maleable o fundición ferrítica maleable. Cuyas prestaciones incluyen aumento en resistencia y ductilidad, incluso mayor que la fundición gris. Tiene buenas propiedades de lubricación mediante maquinado. Se utiliza en aplicaciones de

juntas de expansión, conexiones para tubería, industria automotriz y agrícola, herramientas de ferretería, entre otros.

Existen, en el mercado de las fundiciones especiales, las fundiciones aleadas maleables. En general, se encuentran aleaciones con cobre o con cobre y molibdeno. El cobre incrementa la resistencia a la corrosión y la dureza. El molibdeno con cobre produce mayor resistencia a la corrosión y aumento de propiedades mecánicas.

Además del hierro ferrítico maleable, anteriormente expuesto, existe el hierro perlítico maleable, su obtención depende de un control estricto de la composición química del carbono, que puede oscilar entre el 0.3 al 0.9 por ciento. Se obtiene de manera similar, se somete al proceso de grafitización igual al hierro ferrítico maleable. Luego, se puede agregar manganeso para retener carbono combinado. La otra opción, es realizar la segunda etapa del recocido con un enfriamiento al aire para conseguir un temple y con ello también se logra retener carbono combinado en la fundición. La cantidad de perlita que se puede obtener depende de la temperatura del temple y el tiempo de enfriamiento. A mayor temperatura y menor tiempo de enfriamiento, realizado con aire a presión, mayor será la cantidad de perlita presente en la matriz de la fundición, similar a la figura siguiente.

Figura 10. **Estructura del hierro perlítico maleable a 500x atacado químicamente**

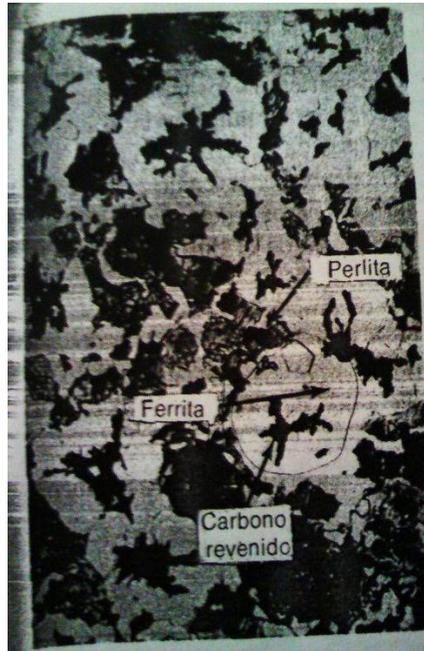


Fuente: SYDNEY H. Avner. Introducción a la metalurgia física. P. 428.

No se recomienda soldar con métodos comunes la fundición perlítica maleable debido a que en los alrededores del cordón se forma fundición blanca que es muy frágil por el rápido enfriamiento. Las principales aplicaciones de esta fundición son cajas para ejes y diferenciales, ejes de levas, cigüeñales, bombas, martillos, cizalladoras, entre otros.

Si la velocidad de enfriamiento de la fundición perlítica maleable no es suficientemente veloz, lo que sucede es que se grafitizan las áreas aledañas a los nódulos de carbono y el resto se vuelve perlita, esta estructura es conocida como ojo de buey.

Figura 11. Estructura “ojo de buey” de carbono revenido rodeado por ferrita



Fuente: SYDNEY H. Avner. Introducción a la metalurgia física. P. 429.

Es habitual someter a un revenido a las fundiciones perlíticas maleables, seguido del enfriamiento al aire, con el objetivo de Esferoidizar la perlita y conseguir mejoras en la tenacidad, maquinabilidad y disminución de dureza.

Figura 12. **Estructura de hierro perlítico maleable luego de un revenido**



Fuente: SYDNEY H. Avner. Introducción a la metalurgia física. P. 429.

Otra opción, si se necesita elevar las propiedades mecánicas, es realizar un temple de la fundición, elevando la temperatura entre 840 y 875 °C por unos 30 minutos o más, hasta reastenizar la estructura y luego someter la pieza a un descenso veloz en aceite calentado, para obtener una estructura de martensita y bainita. La cantidad de martensita depende directamente del tiempo de permanencia, la composición química y sobretodo la velocidad de enfriamiento, en la misma medida aumenta la posibilidad de fisuras. La dureza que se obtiene ronda entre los 55 y 60 rockwell C.

El resultado obtenido es el hierro martensítico maleable, que posee alta dureza y fragilidad pero que se puede reducir hasta conseguir las propiedades deseadas realizando un revenido. El revenido se realiza elevando la

temperatura de la pieza entre 230 y 710 °C. Y un enfriamiento lento al aire para conseguir martensita revenida, que carece de fragilidad.

3.4.3. Microestructura de la fundición gris

En la industria en general predomina el hierro fundido de fundición gris. Dicha fundición se obtiene con determinada composición química y un intervalo de enfriamiento controlado. El tipo de fractura de la fundición gris es lo que le da el nombre, ya que el grafito está presente como placas irregulares conocidas como hojuelas de grafito, que le dan el color grisáceo a su fractura, esta es una de las maneras de identificarlo.

El contenido de carbono puede oscilar entre el 2.5 y 4 por ciento en la mayoría de los casos. El silicio, es un elemento presente en esta fundición que promueve la transformación de la cementita en grafito y austenita o ferrita.

En la siguiente imagen se puede observar la estructura de una fundición gris perlítica, atacada químicamente en nital y un aumento de 100x en la imagen de arriba y 500x la de abajo.

Figura 13. Estructura de la fundición gris perlítica con aumento de 100x y 500x



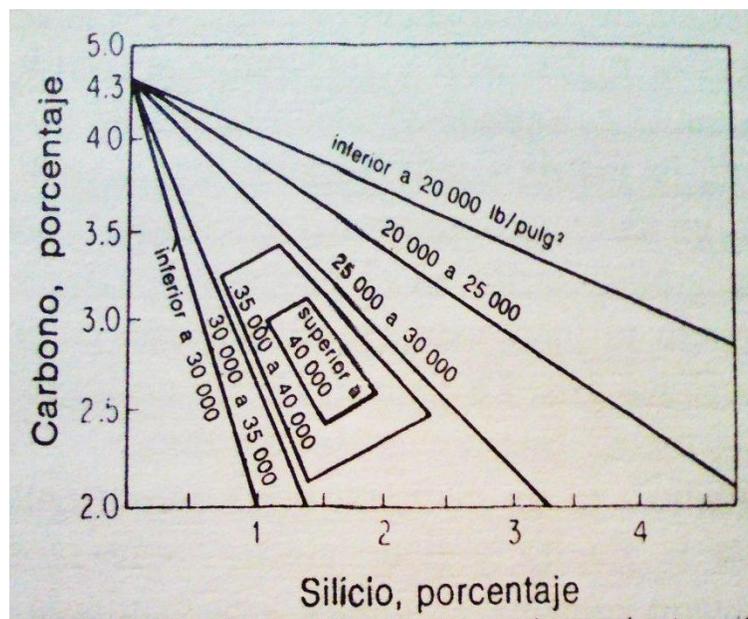
Fuente: SYDNEY H. Avner. Introducción a la metalurgia física. P. 432.

La fundición gris puede tener matriz ferrítica o matriz perlítica, la matriz ferrita tiene bajas propiedades mecánicas y la perlítica tiene prestaciones más altas. La matriz obtenida depende directamente de la composición química y los tiempos de enfriamiento.

El silicio es un elemento que influye en la solidificación además de ser un grafitizador, permite formar hojuelas de grafito, las que son responsables de crear discontinuidades en la matriz, haciendo el material de muy baja ductilidad.

La siguiente imagen muestra una relación entre el contenido de carbono y el de silicio y su respectiva resistencia a la tensión.

Figura 14. **Resistencia a la tensión para una fundición según su contenido de carbono y silicio**



Fuente: SYDNEY H. Avner. Introducción a la metalurgia física. P. 434.

La cantidad en la composición química debe estar minuciosamente controlada, ya que se puede llegar a crear una fundición blanca cuando lo necesario es una fundición gris perlítica de alta resistencia.

Existen elementos que hacen lo contrario que el silicio, en vez de grafitizar, ayudan a combinar el carbono y formar cementita, que es la

estructura deseada para obtener fundición blanca. El elemento principalmente encontrado en las fundiciones es el azufre, en cantidades entre 0.06 y 0.12 por ciento. El azufre contribuye a la formación de cementita y sulfuro de hierro. El sulfuro de hierro produce fragilidad al rojo o fisuras a altas temperaturas, lo cual es indeseable; también dificulta la colada porque es un reductor de la fluidez y un creador de cavidades que no permiten el escape del aire. Estos defectos desagradables del sulfuro de hierro se contrarrestan agregando manganeso a la fundición para crear sulfuro de manganeso. El manganeso reacciona con mayor facilidad con el azufre que con el hierro. Para aprovechar la reacción del manganeso con el azufre y evitar la reacción del hierro y azufre, se agrega manganeso dos o tres veces la cantidad que haya de azufre. El manganeso promueve la formación de carbono combinado por ser un estabilizador de carburo, aunque el azufre es mucho más poderoso estabilizador.

Un exceso de azufre formaría sulfuro de hierro que ocasiona fisuras y colada defectuosa. Una escasa cantidad de manganeso, no permitiría la formación correcta de sulfuro de manganeso y sí la de sulfuro de hierro. Por estos motivos, es vital controlar los contenidos de estos dos elementos en la fundición.

Otro elemento presente en la fundición gris, es el fósforo, en proporciones entre el 0.10 y 0.90 por ciento. El fósforo forma fosfuro de hierro al combinarse y está presente, generalmente, en las fundiciones. Forma una estructura llamada esteadita que se encuentra en las orillas de las dendritas primarias de la austenita y que son muy frágiles. Pero en proporciones correctas con el silicio favorece la colada para moldes complejos que tengan formas planas y delgadas.

En la observación metalográfica de la fundición gris, es muy importante observar y saber identificar el tipo y tamaño de hojuela de grafito, porque se puede obtener mucha información sobre el historial del material. El procedimiento de evaluación del tamaño de las hojuelas de grafito es mediante comparación con los tratados respectivos de la ASTM y la AFS.

El enfriamiento lento produce hojuelas grandes, lo cual no es deseado porque tanto menor sea el tamaño de las hojuelas de grafito mayor será la resistencia mecánica, aunque la forma es otro parámetro que se debe tomar en cuenta. La manera de que el enfriamiento lento no ocasione grandes hojuelas de grafito es añadir a la composición química un inoculante, entre ellos está el calcio metálico, aluminio, titanio zirconio, carburo de silicio y combinaciones.

3.4.4. Microestructura de la fundición nodular

La microestructura de la fundición nodular o dúctil está formada por pequeños nódulos con forma de bolas denominadas esferoides, cuya separación es mayor que la separación de las hojuelas de grafito. Esta es la razón por la cual la fundición nodular tiene mejores prestaciones mecánicas que la fundición gris.

La microestructura de la fundición nodular es muy parecida a la maleable, los nódulos tienen forma más redonda en la fundición nodular. La principal diferencia entre estas dos fundiciones es que la fundición maleable se realiza un tratamiento térmico para obtener la microestructura, y en la fundición nodular se controla la solidificación de la colada. Aunque deben existir algunas condiciones para que por medio de la solidificación se obtenga fundición nodular, en la composición química debe existir algún elemento formador de nódulos, como el magnesio o cerio y el contenido de azufre debe ser inferior al

0.015 por ciento para que el azufre no reaccione con el elemento formador de nódulos.

Se le conoce como hierro ferrítico nodular si la cantidad de perlita es menor del 10 por ciento, para la obtención de ferrita se debe controlar la velocidad de enfriamiento y la composición química. También se puede obtener hierro perlítico nodular, aunque de menor ductilidad que el ferrítico nodular.

4. AISLANTE TÉRMICO

4.1. Materiales aislantes térmicos

Para conservar la temperatura en ciertos puntos o lugares se ha experimentado con diversos materiales. A partir de ello, se ha determinado el mejor material especializado para aislar la temperatura, mientras se conserva en buen estado. Entre los materiales que naturalmente son buenos aislantes se puede mencionar el aluminio, determinadas algas, madera, vidrio, roca, entre otros. Y los materiales que se han desarrollado en procesos industriales para aumentar las capacidades de reducción de la transferencia de calor están la fibra de vidrio, la fibra de madera, la lana de roca, la espuma de poliuretano, la espuma de polietileno, el poliestireno expandido, entre otros.

El aluminio es un excelente aislante térmico para el calor proveniente en forma de radiación. Puede utilizarse en delgadas capas para proteger de calor por radiación. Sin embargo, transmite bien el calor por conducción y la transmisión de calor por convección se reduce con el plegado de varias láminas.

El corcho es un aislante muy empleado en el pasado. Este material se extrae del árbol de alcornoque, se hierve y, sin necesidad de otro aditamento, puede unirse y formar paneles de dicho material. Es ideal para aislamientos externos debido a su alta inercia térmica, que es la cualidad del material de conservar el calor o cederlo.

Existe un tipo de mica, un mineral formado por silicatos de magnesio o de hierro llamado vermiculita, cuyo proceso de fabricación se eleva la temperatura y el mineral se puede expandir hasta 30 veces su volumen y se separa en láminas. A dicho proceso se le denomina exfoliación. Es un material

incombustible por lo que se puede usar directamente para protección del fuego, por lo que tiene aplicaciones en calderas y hornos, siempre que la temperatura no supere su punto de fusión, cercano a los 1370°C. En las aplicaciones mencionadas, es importante mencionar que la vermiculita no tiene reacción algún con ningún tipo acero ni hierros.

La roca volcánica se puede procesar para obtener la lana de roca, que es un material ignífugo ya que conserva sus propiedades sin alteraciones si se le somete a temperaturas de hasta 1000°C. Además, es un aislante térmico muy bueno, ya que en su interior hay aire estático, el cual actúa como aislante para la transferencia de calor.

La lana de vidrio es una serie de filamentos unidos por medio de una solución aglutinante. No se debe confundir con la fibra de vidrio. El proceso de obtención de la lana de vidrio consiste en llevar el vidrio reciclado a estado de fundición con aditivos y arena, cerca de los 1400°C. Luego se somete a un proceso de centrifugado y se hace pasar el material en diminutas rejillas para luego rociarle el aglutinante y obtener, de esta manera, las propiedades deseadas para el material.

Otra aplicación del vidrio para aislante térmico es el vidrio expandido, que utiliza polvo de vidrio tratado químicamente a altas temperaturas consiguiendo formar una esponja que tiene vacío en el interior de cada grano de polvo de vidrio. Con ello, se puede obtener una gran reducción en la transferencia de calor. Además es un material ignífugo e impermeable a líquidos.

4.2. Resistencia térmica

La oposición al intercambio de calor entre dos o más cuerpos se denomina resistencia térmica, la cual depende del tipo de material. Para que haya una

fácil transferencia de calor entre dos cuerpos, deben presentar diferente temperatura y ser materiales de buena conductividad térmica, y la forma geométrica de los cuerpos. El calor fluirá, entonces, del cuerpo a mayor temperatura hacia el de menor temperatura hasta alcanzar el equilibrio térmico.

Si el material tiene baja conductividad térmica se le denomina aislante térmico. Cabe mencionar los cerámicos, vidrio, madera, sílice, alúmina, entre otros, que son excelentes aislantes para el intercambio de calor.

Para la clasificación de los valores de resistencia térmica, se hacen experimentalmente mediante la ecuación:

$$R = \frac{\Delta T}{q/A}$$

Donde q es el flujo de calor, A el área y ΔT es la diferencia de temperatura entre dos cuerpos.

En la siguiente imagen se resumen los valores de R para materiales de uso común en la industria:

Figura 15. Resistencia térmica para diferentes materiales

<i>Tipo</i>	<i>Intervalo de Temperatura, °C</i>	<i>Conductividad térmica mW/m·°C</i>	<i>Densidad, kg/m³</i>	<i>Aplicación</i>
1 Superaislante lince evacuado	-240-1100	0.0015-0.72	Variable	Muchas
2 Espuma de poliuretano	-180-150	16-20	25-48	Tubería caliente y fría
3 Espuma de poliuretano	-170-110	16-20	32	Tanques
4 Bloques de vidrio celular	-200-200	29-108	110-150	Tanques y tubería
5 Hojas de fibra de vidrio para envolver	-80-290	22-78	10-50	Tubería y accesorios
6 Hojas de fibras de vidrio	-170-230	25-86	10-50	Tanques y equipo
7 Fibra de vidrio premoldeada	-50-230	32-55	10-50	Tubería
8 Hojas elastoméricas	-40-100	36-39	70-100	Tanques
9 Paneles de fibra de vidrio	60-370	30-55	10-50	Tubería y accesorios
10 Elastómero premoldeado	-40-100	36-39	70-100	Tubería y accesorios
11 Fibra de vidrio con revestimiento de barrera de vapor	-5-70	29-45	10-32	Líneas de refrigeración
12 Fibra de vidrio sin chaqueta de barrera de vapor	a 250	29-45	24-48	Tuberías calientes
13 Tablero de fibra de vidrio	20-450	33-52	25-100	Calderas, tanques, cambiadores de calor
14 Bloques y tableros de vidrio celular	20-500	29-108	110-150	Tubería caliente
15 Bloques y tableros de espuma de poliuretano	100-150	16-20	24-65	Tubería
16 Fibra mineral premoldeada	a 650	35-91	125-160	Tubería caliente
17 Hojas de fibra mineral	a 750	37-81	125	Tubería caliente
18 Bloques de lana mineral	450-1000	52-130	175-290	Tubería caliente
19 Bloques, tableros de silicato de calcio	230-1000	32-85	100-160	Tubería caliente, calderas, revestimientos de chimeneas
20 Bloques de fibra mineral	a 1100	52-130	210	Calderas y tanques

Fuente: J.P. Holman. Transferencia de Calor. P. 44

4.3. Fibra de vidrio

La fibra de vidrio está formada por diminutos hilos de vidrio que siguen una dirección o patrón. La principal propiedad de la fibra de vidrio es su capacidad de aislante térmico. Esta propiedad se favorece de la gran área superficial que ocupa en relación al peso por la distribución de sus hilos. Los hilos se obtienen mediante la fundición del vidrio a 1250°C y la extrusión por pequeños orificios aprovechando la maleabilidad del estado de fundición, posteriormente, son enfriados. Por este motivo las fibras están orientadas en una dirección. Por esto, la fibra de vidrio es resistente en la dirección en la que

están orientadas las fibras, pero muy débil si se le aplica una fuerza perpendicular a la orientación de sus fibras. La fundición de vidrio y la necesidad de adición de químicos catalizadores para acelerar el tiempo de solidificación, resulta un proceso tóxico e incluso volátil. La viscosidad del vidrio en estado de fundición debe ser la correcta y estar en constante control, la alta viscosidad impide la formación longitudinal de los filamentos y demasiado baja puede crear gotas en vez de filamentos. Al tener la viscosidad correcta, se lleva la fundición a una placa caliente con boquillas por donde pasará el vidrio y se formará en filamentos.

La fibra de vidrio es un excelente aislante térmico, relativamente tiene alta resistencia a la tensión y buena maleabilidad a temperaturas de fundición. Por este motivo, puede tener aplicaciones en la industria como aislante térmico o en trabajos artísticos. Además, puede encontrarse en gran variedad de aplicaciones como partes de la carrocería de automóviles, tablas de surf, aislamiento acústico y eléctrico, tragaluces transparentes, telas de alta resistencia, telas para resistencia a la corrosión, fabricación de tanques, puede utilizarse para fabricación de veleros, para elaboración de cables de fibra óptica para transmisiones lumínicas, entre otros.

Existe gran variedad de clases de fibra de vidrio atendiendo a su combinación química. El vidrio clase E, utilizado para reforzar plástico con vidrio, es un vidrio de aluminio y borosilicato con menos de 1 por ciento de óxidos alcalinos. El vidrio clase A, también utilizado para reforzamiento de plástico con vidrio, es un vidrio álcali-cal con muy bajo óxido de boro. El vidrio clase E-CR, utilizado donde tendrá contacto con ácidos, es un vidrio álcali-cal con menos de 1 por ciento de óxidos alcalinos. El vidrio clase C, para aplicaciones que requieran filamentos cortos de longitud, es un vidrio álcali-cal

con considerable cantidad de óxido de boro. El vidrio clase D, cuya característica principal es su alta constante dieléctrica, es un vidrio de borosilicato. El vidrio clase R, es un vidrio de aluminio y silicatos sin óxido de magnesio ni óxido de calcio, es el tipo de vidrio que presenta mayores propiedades mecánicas. El vidrio de la clase S, es el que presenta la mayor resistencia a la tensión, constituido por aluminio y silicatos pero con buena cantidad de óxido de magnesio de alta resistencia a la tensión.

4.4. Resistencia de calefacción

La intención de una resistencia de calefacción, es emplear un elemento calefactor que reduzca la diferencia de temperatura entre la alcanzada después de la soldadura y la temperatura ambiente, y realizar un enfriamiento ordenado y lento por toda la pieza, luego de haber empleado la resistencia para elevar la temperatura próxima a los 400°C. La propuesta es realizar el calentamiento con una resistencia tipo mica de 900 watts, para 110 voltios y dimensiones de 15cm X 15cm que alcanza la temperatura de revenido de 400°C, como la que se puede observar en la siguiente fotografía.

Figura 16. **Resistencia de 900 watts que alcanza los 400° C**



Fuente: elaboración propia

Y como medio aislante se emplea y experimenta con fibra de vidrio, cuya conductividad térmica se encuentra cerca de $0.038 \text{ W/m } ^\circ\text{C}$ suficiente para lograr un lento enfriamiento en una soldadura inmediatamente después de someter la pieza a un revenido a aproximadamente 400°C .

Al someter la pieza recién soldada, a la resistencia eléctrica a 400°C se estará transfiriendo calor por conducción porque se coloca directamente en contacto con la pieza. Además, al haber aire ambiente en los alrededores habrá transferencia de calor debida a la convección. Al estar los dos cuerpos a diferentes temperaturas, habrá transferencia de calor por radiación térmica entre la resistencia eléctrica y la pieza metálica soldada.

Figura 17. **Fibra de vidrio empleada en prueba**



Fuente: elaboración propia

5. SOLDADURA SMAW DEL HIERRO FUNDIDO

5.1. Material de aporte

Se le denomina material de aporte a todo metal agregado a un charco de fundición de soldadura. Hay un material de aporte especial para cada proceso de soldadura y para cada material base, por lo que existe una gran variedad para el proceso de selección.

En la soldadura MIG y MAG se utilizan bobinas de hilo metálico, del mismo al material base, ya sea acero al carbono, inoxidable, aluminio, entre otros. El hilo viene con recubrimiento de cobre para protegerlo de la oxidación y facilitar el inicio del arco para el soldador.

En el proceso TIG se utilizan varillas de aporte, también se utilizan en soldadura oxiacetilénica. Las varillas deben estar libres de contaminantes como el óxido y humedad por lo que tienen un recubrimiento de cobre. También se encuentran varillas con fundente para procesos especiales como soldaduras sanitarias.

Para la soldadura SMAW se utilizan electrodos, formados por un núcleo de metal y un revestimiento químico, diseñados para determinadas necesidades. El revestimiento cubre diversas funciones, entre ellas desoxida el material base y protege del oxígeno ambiental, disminuye el chisporroteo, estabiliza el arco, forma escoria para proteger la soldadura de la oxidación y para enfriar lentamente. El almacenamiento correcto de los electrodos es importante para que las propiedades anteriormente mencionadas no se pierdan. Es recomendado utilizar un calefactor para los electrodos para antes de soldar, para eliminar la humedad que absorbe naturalmente el revestimiento.

Para la soldadura del acero al carbono, si el revestimiento es celulósico, se utiliza para cordones de penetración y se recomienda para mayores de 6 milímetros de espesor. Entre ellos, los más utilizados son el E-6010 y el E-6011. El E-6010 tiene calidad radiográfica y es de mayor costo que el E-6011 que no tiene calidad radiográfica.

Para realizar cordones de soldadura con buena presentación, se utilizan electrodos con revestimiento con rutilo conocidos como rutilicos, cuya función es hacer que el material de aporte se dosifique en forma de rocío al charco de soldadura. Entre ellos, se puede mencionar para el acero al carbono el E-6013 y para el acero inoxidable el E-312.

Existen revestimientos básicos, en su composición tienen óxidos de hierro, aleaciones ferrosas, carbonato de calcio y magnesio que reaccionan con fluoruro de calcio para formar fluorita, la cual facilita la fusión. Un ejemplo de revestimiento básico es el E-7018. Los revestimientos básicos se distinguen por conferir cordones de buena calidad y muy altas propiedades mecánicas.

Para la soldadura de los hierros fundidos, los materiales de aporte mayormente utilizados son el E-NiFeCl, el E-NiCl y el E-ST para fundiciones contaminadas.

Para esta experimentación se prueba el electrodo E-NiFeCl, que contiene, teóricamente, un 60% de níquel, es utilizado para soldadura de fundición gris, nodular, y maleable. También puede utilizarse para la unión de metales ferrosos con las fundiciones anteriormente mencionadas adicionando la menor temperatura de precalentamiento. El electrodo E-NiFeCl tiene la cualidad de poseer alta resistencia mecánica, resistencia a elongación para absorber

tensiones residuales y aceptable adherencia por su contenido de hierro, mientras que el E-NiCl, que es un electrodo de 100% níquel, se caracteriza por tener excelente tenacidad en depósito.

El E-NiFeCl tiene la versatilidad de utilizarse con corriente directa y polaridad invertida o se puede soldar con corriente alterna. Para la prueba se emplea electrodo de 1/8" por lo que la corriente teóricamente recomendada es entre 85 y 100 amperios.

La composición química del E-NiFeCl en pruebas de laboratorio especializado rondan el 51 por ciento de níquel, 0,53 por ciento de carbono, 0,55 por ciento de manganeso, 0,66 por ciento de silicio, 0,005 por ciento de azufre, 1,11 de cobre y el resto de hierro. Lo que hace de este electrodo el adecuado para reparaciones cuya prioridad sea la alta resistencia mecánica; por ejemplo, en engranes, coronas, levas, válvulas, carcasas de fundición gris, entre otros.

5.2. Material base

El experimento pone a prueba la soldadura en el hierro fundido gris, conocido en la industria por diversos nombres como hierro fundido V2, FC-300 o hierro perlítico. La producción de este material consiste en una fundición de colada continua para la obtención de microestructura perlítica. Su apariencia es uniforme y no presenta discontinuidades como burbujas de gas, rechupes, inclusiones de escoria, micro orificios o cualquier tipo de discontinuidad, por lo que puede endurecerse mediante aplicación de calor y presentar propiedades mecánicas imponentes. Es un material que permite excelentes acabados superficiales mediante un correcto pulido.

Las aplicaciones donde más se puede utilizar la fundición gris en máquinas es en poleas, rodillos, ejes, guías, engranajes y contrapesos; en hidráulica y neumática en manifolds, émbolos, pistones de cilindros, tapas de cilindros, rotores y cuerpos de válvulas; en la industria automotriz, en émbolos para pistón de freno, guías y asientos de válvulas, anillos, entre otros.

La composición química aproximada dada por el fabricante del hierro fundido gris utilizado en la prueba está dentro de los siguientes rangos:

Tabla I. **Composición química de la fundición gris**

Elemento químico	Porcentaje
Carbono	2,80 – 3,70
Manganeso	0,40 – 0,80
Silicio	2,30 – 2,70
Azufre	0,20 máximo
Fosforo	0,10 máximo

Fuente: Elaboración propia

Este material es susceptible a los tratamientos térmicos, lo que le da al material versatilidad en aplicaciones industriales. Para reducir tensiones se puede realizar el tratamiento en un rango de 538 a 566°C. Para reducir dureza a estado de suministro se le puede realizar un recocido entre 704 a 760°C. Para dotarle de dureza y aumentar propiedades resistivas, el hierro fundido gris tiene buena templeabilidad entre los 857 a 871°C y un enfriamiento moderadamente rápido, en aceite. Para homogenizar su microestructura, entre los 822 a 972°C se puede realizar un normalizado. Para la fijación de dureza de trabajo de un elemento de máquina. Luego de realizar un temple se realiza un revenido, la temperatura a elegir depende de la dureza que se desea obtener.

El hierro fundido gris puede mecanizarse, aunque piezas grandes son susceptibles a endurecimiento por trabajo en frío o acritud. Las hojuelas de grafito actúan como lubricante natural del material por lo que es el hierro fundido gris el que presenta mayor grado de maquinabilidad. Es más complicado el mecanizado de las fundiciones nodulares y blancas por la disposición del grafito en su microestructura.

La soldabilidad de la fundición gris se considera baja en relación con los aceros al carbono, aunque en realidad son dos procesos muy diferentes y a menudo quienes consideran que el hierro fundido es irreparable, siempre han utilizado métodos incorrectos. Aunque sí hay ocasiones en que es muy complejo soldar una fundición y puede optarse por hacer un inserto de acero al carbono.

5.3. Efectos del calor en la soldadura del hierro fundido

Se deben tomar consideraciones especiales al soldar fundición gris, y no confundir o utilizar los mismos métodos aplicados en la soldadura de acero al carbono. Esto se debe a que la tendencia a la formación de fisuras aumenta en proporción con la cantidad de carbono y ciertos elementos de aleación. Un acero de mediano carbono con cerca del 0,40 por ciento de carbono presenta buena templabilidad y riesgo de fisura en soldadura. Por lo tanto, un hierro gris que tiene entre 2,80 y 3,70 por ciento de carbono presentará un riesgo mayor de formación de esfuerzos internos que llevan a fisuras, lo cual no quiere decir que no se pueda soldar. Con los procedimientos y precauciones correctas se puede realizar la soldadura de dicho material.

Al realizar la unión a tope, el material de aportación y el material base se funden, cerca de los 1400°C y con ello existe dilatación térmica en la zona

inmediata al charco de fundición. El hierro fundido es prácticamente inmutable a la dilatación, pero el material de aporte, formado por 60% níquel y 40% de hierro aproximadamente, es altamente sensible a dilatar térmicamente. A medida que se realiza la soldadura, el depósito aleado entre el material base y el de aporte empieza a solidificar y, con ello, a contraerse, dado que el único afectado por la contracción es el material de aporte. Este tiene la tendencia a separarse y crear diminutas fisuras, en ocasiones imperceptibles. Este es el principal problema que origina la fisura del material y lo más recomendado para evitarlo es el martilleo del cordón, cuya dirección exacta debe ser sobre el material de aporte y con la fuerza suficiente para lograr que el material de aporte se expanda mientras solidifica y se mantenga aleado al material base.

Otra manera que el calor afecta la estructura y las prestaciones mecánicas de la soldadura de la fundición gris para optimizar sus propiedades es por medio de tratamientos térmicos. También se puede buscar la reducción de esfuerzos internos remanentes de la fundición o soldaduras. Los tratamientos térmicos para reducción de esfuerzos para el hierro fundido gris es alrededor de los 530°C y los 565°C, temperatura a la que no se descompone la cementita en grafito y hierro. La descomposición del carbono combinado inicia a los 590°C.

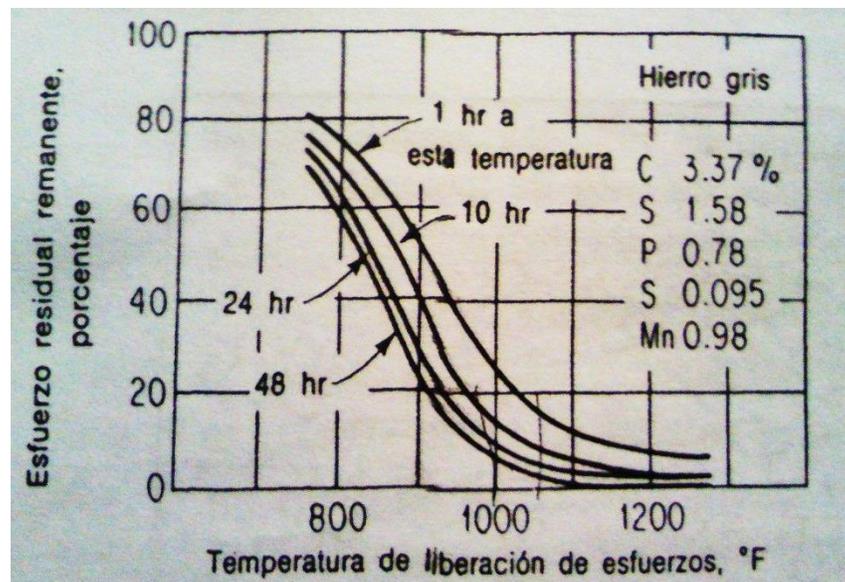
Si lo que se desea es ablandar la fundición a estado de suministro, y así mejorar la maquinabilidad, se debe realizar un recocido a temperaturas entre 700°C y 760°C. Se debe hacer permanecer la pieza a la temperatura elegida el tiempo suficiente para que se desarrolle el proceso de grafitización. Como regla general, a mayor temperatura, menor tiempo de permanencia a dicha temperatura.

Para realizar un normalizado, se debe realizar un calentamiento a una temperatura superior a la del intervalo de transformación 885 y 930 °C y

mantenerla una hora por cada pulgada de espesor de la pieza. La normalización es altamente recomendada después de un proceso de soldadura, ya que el proceso de soldadura del hierro fundido gris incluye precalentamiento y poscalentamiento que no dejan la estructura uniforme, para restaurar las propiedades.

La siguiente imagen gráfica los efectos de la temperatura y el tiempo en la liberación de esfuerzos internos de la fundición gris.

Figura 18. **Liberación de esfuerzo residual en la fundición gris respecto del tiempo y temperatura**



Fuente: SYDNEY H. Avner. Introducción a la metalurgia física. P. 436.

Los metales ferrosos como el acero y el hierro fundido gris son de buena templabilidad, se calienta la pieza entre 860 y 875°C para luego someter la pieza un rápido enfriamiento en un medio como agua, aceite o aire. La elección depende de las dimensiones de la pieza y su composición química. De los tres medios mencionados, el enfriamiento en agua es demasiado veloz y puede

ocasionar fisuras. El medio ideal es el aceite, con el cual se consigue endurecimiento generalizado en el material. Al igual que en el acero, la fundición gris, luego de ser templada, debe someterse obligatoriamente a un revenido, para reducir fragilidad y dureza, mejorar tenacidad y reducir esfuerzos residuales. El revenido en una pieza de fundición gris es alrededor de los 370°C y se puede realizar 2 ó 3 veces si es necesario y se obtienen cerca de 50 Rockwell C de dureza. Si la necesidad es de conservar mayor dureza se puede realizar a menor temperatura que los 370°C, entre 150 °C y 260°C, y obtener cerca de 55 a 60 Rockwell C.

Para aplicaciones especiales de la fundición gris, como ruedas dentadas, camisas de cilindros de motores y ejes de levas para autos, se requiere una estructura con matriz de alta dureza para tener alta resistencia, y grafito para tener propiedades de lubricación natural para mejora de la resistencia al desgaste.

5.4. Fisuras y grietas

Las fisuras es un problema con el cual lidiar en la soldadura de metales ferrosos, sobre todo en las fundiciones es bastante más problemático que en los aceros, ya que con un porcentaje mayor de 0.25 de carbono comienza a existir posibilidad de fisura. Hay diferentes puntos que se deben tomar en cuenta para prevenir la formación de fisuras, el precalentamiento, el poscalentamiento, la elección del material de aporte adecuado y la técnica correcta. También es importante conocer la composición química porque ciertos elementos pueden favorecer la formación de fisuras.

El precalentamiento se realiza antes de depositar el cordón de soldadura. Puede ser por medio de la llama oxiacetilénica, induciendo la pieza en un horno

si es viable o realizando un precalentamiento donde quiera que se encuentre la pieza por medio de un aislante térmico, como el propuesto en el presente trabajo. La función del precalentamiento, es conseguir que el enfriamiento luego de la soldadura sea más lento y uniforme, con lo que se consigue disminuir los esfuerzos internos remanentes de la aplicación de calor.

La finalidad del poscalentamiento es conseguir la reducción de esfuerzos internos sobrantes, como un revenido o un normalizado. Si la fundición gris presenta suciedad y fatiga, resultará muy complicado reparar en dicho estado pero, si no se realiza el precalentamiento y poscalentamiento prácticamente no habrá forma de conseguir la soldadura deseada.

El origen de las fisuras se da por esfuerzos multidireccionales que, al ser opuestos, exceden la resistencia del material y dan inicio a micro fisuras que se desarrollan por vibraciones, golpes u otros. Un tratamiento térmico que reduzca tensiones es altamente recomendado luego de efectuar la soldadura.

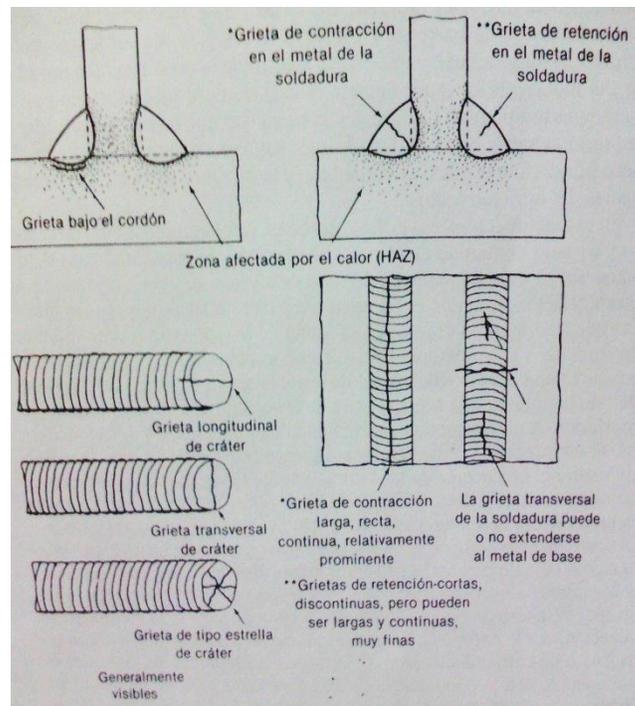
Las fisuras no siempre son detectables visualmente por el soldador, ya que algunas se forman internamente y solo puede observarse una deformación externa, con lo que se puede deducir que habrá fisura a futuro. Una raíz de soldadura mal penetrada puede dar origen a una fisura, sobre todo si la pieza se somete a esfuerzos de tensión lo que será suficiente para que la grieta penetre todo el espesor del material. Por lo tanto, no es recomendado utilizar materiales duros que sean sensibles a formación de fisuras en aplicaciones donde se someta el elemento de máquina a esfuerzos de tensión. En estos casos se recomienda utilizar materiales de buena ductilidad.

Las fisuras pueden presentarse en diferentes lugares y direcciones, puede aparecer directamente en el material aportado o en el material base, o puede

apreciarse en una inspección visual sino más bien por medio de un examen de radiografía.

La aparición de grieta en el cordón puede deberse a una elección incorrecta del material de aporte, o una mala aplicación por malos parámetros eléctricos, por muy alta velocidad de avance o por no realizar precalentamiento. La fisura longitudinal es la que más ocurre, puede originarse en el primer cordón y crecer en los siguientes depósitos de material de aporte si el segundo cordón no realizó una fusión completa de la fisura. En ocasiones, la fisura puede salir a superficie luego de enfriada la pieza a temperatura ambiente. Si el material de aporte es el correcto para el material base es posible que la máquina de soldadura esté mal ajustada.

Figura 19. Tipos de fisuras en soldaduras



Fuente: HORWITZ, Henry. Soldadura, aplicaciones y práctica. P. 692

En la soldadura de fundición gris es recomendado no realizar cordones extensos, sino más bien aportar entre 1 y 2 pulgadas y luego detenerse para no sobrecalentar el material, pero existe el riesgo de que se forme una grieta en el cráter tipo estrella, la cual puede ser el inicio de una grieta longitudinal en el cordón subsiguiente.

Para evitar la formación de grietas se debe realizar un precalentamiento correcto, hacer que el enfriamiento sea uniforme y utilizar el material de aporte adecuado.

5.5. Procedimiento de soldadura

Es necesario llevar un procedimiento técnico correcto para la soldadura de la fundición gris. Como primer paso hay que saber identificar el material. Una forma de hacerlo es observando la fractura del hierro fundido, es gris y porosa. También puede realizarse un ensayo de chispa y realizar las comparaciones respectivas. Un soldador experimentado puede guiarse por el sonido de la fundición al ser golpeado. Las fundiciones tienen ciertas aplicaciones y conocerlas también ayuda a descartar opciones, de las aplicaciones encontradas en la industria, un 90 por ciento es fundición gris, aproximadamente.

El procedimiento a detalle para realizar una unión soldada en fundición gris es:

El primer paso es la identificación de la fundición gris por medio de observación de la fractura si la hay, la apariencia puede observarse en la siguiente figura, siempre resulta conveniente auxiliarse de ensayo de chispa. Se puede identificar la fundición gris en estado de suministro, por medio de un

examen de dureza, la cual debe oscilar cerca de los 183 a 285 HB. Si la identificación se hace difícil, puede realizarse una prueba de adherencia, utilizando un electrodo E-NiFeCl para fundición o un E-6013 para acero al carbono y depositar un punto de cada electrodo y retirar con cincel y martillo para identificar cuál tiene mejor adherencia. Si se cuenta con los medios, un examen metalográfico puede ser la opción más certera.

Figura 20. **Fractura de fundición gris**



Fuente: Elaboración propia

El segundo paso es preparar los implementos que se utilizarán, tanto la máquina y herramienta como el equipo de protección personal certificado. La máquina que puede utilizarse debe poder trabajar de manera estable entre los 80 y 130 amperios en corriente directa o alterna. La herramienta básica consta de un cepillo de alambre, un picador, martillo de bola, una tenaza tipo *vise grip*, prensa de banco, arco de sierra, amoladora, disco de pulir, lima cuadrada, escuadras y cinta métrica metálica.

Todo soldador debe usar equipo de protección personal básico para trabajos de soldadura. Está conformado la careta con lente inactínico número 12 o mayor, guantes y mangas de cuero aislante, gabacha de cuero aislante, polainas de cuero aislante, gorro de cuero aislante para cubrir cabeza completa

y cuello, lentes transparentes anti impacto, tapones auditivos, mascarilla con filtro para gases, zapato industrial de cuero aislante para trabajos eléctricos y punta sólida.

Figura 21. **Máquina para soldadura SMAW**



Fuente: Taller de Mecánica, T-7, Facultad de Ingeniería.

El tercer pasó es elegir el material de aporte a utilizar dependiendo de las condiciones en la que se encuentre la pieza de fundición gris y los resultados deseados.

Si la pieza sufrió una fractura y durante su tiempo de operación estuvo en contacto directo con aceite, como en una caja reductora de velocidad, la pieza tendrá en su interior aceite difícil de extraer. Realizar una exhaustiva limpieza superficial y utilizar el electrodo especial para contaminación E-ST, que es un electrodo de acero diseñado para realizar soldadura directamente sobre fundiciones contaminadas en cualquier posición con corriente directa y electrodo positivo. Los depósitos de este electrodo no son maquinables, por lo

que su mayor aplicación es para las primeras pasadas de un material contaminado.

Si la pieza no presenta contaminantes en su interior, dependiendo de los resultados deseados, se puede utilizar electrodos como el E-NiFeCl o el E-NiCl. El E-NiFeCl de 60% níquel y 40% hierro, es utilizado para alta resistencia mecánica y puede aplicarse sobre el E-ST como relleno. Trabaja con corriente directa y electrodo positivo y puede utilizarse para uniones de acero al carbono con fundición gris y maleable. El E-NiCl es un electrodo de 100 por ciento níquel se utiliza donde se necesite alta tenacidad en depósito y tiene excelente acabado superficial, se suelda con corriente directa electrodo positivo o con corriente alterna. El amperaje que se debe utilizar depende del diámetro del núcleo del electrodo y debe consultarse en la hoja técnica del electrodo, donde puede obtenerse información de los parámetros de la máquina de soldar. Se puede combinar estos electrodos, primeras pasadas con E-ST relleno con E-NiFeCl y presentación con E-NiCl, si la situación así lo demanda.

Si el material de la fundición está en perfectas condiciones, o si está en estado de suministro, como para la prueba de esta investigación, puede utilizarse directamente el E-NiFeCl o el E-NiCl.

Figura 22. **Electrodo E-NiFeCl**



Fuente: Taller de Mecánica, T-7, Facultad de Ingeniería

En el cuarto paso se prepara la superficie donde se realizará la unión de soldadura. Para este procedimiento se utiliza la amoladora y lima para que ambos lados de las dos piezas que se unirán sean perfectamente simétricos. Si es necesario realizar bisel, hacerlo a 60° con bordes redondos para evitar vértices que provoquen inicio de grietas, y dejar $1/8$ de pulgada de espesor sin biselar. La separación de las piezas debe ser del diámetro del electrodo. Los puntos de soldadura deben colocarse por la parte trasera de las piezas y deben tener una distancia recomendada de 10 centímetros, no mayor porque la deformación térmica puede romper los puntos y separar la pieza a una distancia mayor que el diámetro del electrodo y el resultado será defectuoso. Se debe recordar que la simetría de las dos piezas debe permanecer mientras se realiza el procedimiento. Las piezas deben estar libres de cualquier clase de contaminante como grasa, aceite, óxido, pintura, entre otros. La superficie debe estar pulida y puede limpiarse con acetona antes de realizar el procedimiento. El éxito de la unión en gran parte depende de la preparación satisfactoria.

El quinto paso es el precalentamiento para que el enfriamiento posterior de la soldadura sea lento y uniforme y evitar así la formación de tensiones internas, para ello, la pieza de fundición debe estar preparada superficialmente en la posición necesaria. En la prueba de esta investigación se utiliza un calentador de resistencias que alcanza los 400°C, y se somete la pieza al incremento gradual de temperatura y la permanencia durante 30 minutos. El electrodo se somete al mismo precalentamiento para liberar la humedad absorbida.

En el sexto paso, inmediatamente después de precalentar, se inicia la soldadura. Para lo cual la máquina ya está ajustada con corriente directa electrodo positivo. Como el electrodo utilizado es de 1/8 de pulgada de diámetro de núcleo, se utiliza 90 amperios para realizar la soldadura.

Los cordones de soldadura en la fundición gris deben aplicarse de manera discontinua y en lugares diferentes porque no se debe sobrecalentar la pieza ya que el enfriamiento no será uniforme y dará lugar a formación de grietas. La longitud de los cordones debe estar entre 2 y 3 pulgadas, aunque este factor depende del amperaje de la máquina, diámetro de electrodo y el espesor de la pieza. Luego de realizar un cordón, inmediatamente debe realizarse un fuerte martilleo directamente sobre el material aportado, ya que este está formado principalmente por níquel, el cual tiene gran capacidad de dilatar o contraerse en presencia o ausencia de calor. El hierro fundido gris carece de esta cualidad, por lo que mientras el níquel aportado dilata y luego contrae, la fundición conservará sus dimensiones. Esto quiere decir que la aleación de níquel con fundición gris tiende a separarse cuando comienza la contracción del níquel y crear fisuras segundos después de soldar fundición gris. Esto se puede evitar dando fuertes golpes con martillo de bola directamente sobre el material aportado para que dicha contracción no tienda a separarse y crear grietas.

La separación del electrodo respecto de la pieza debe ser entre 1/8 y 3/16 de pulgada de la pieza y mantenerse igual mientras se avanza realizando un cordón sin movimiento a los laterales. El ángulo del electrodo respecto a la dirección de avance sobre el material base es entre 45 a 60°.

La primera pasada busca realizar una correcta penetración que tiene como función alear los dos extremos de manera uniforme por la parte trasera de la pieza de inicio a fin. La primera pasada soportará, en gran medida, los esfuerzos a los que se someta la soldadura, puede ser el principio de grieta si no hay aleación completa.

El séptimo paso es realizar cordones de relleno. Para ello, se utiliza exactamente la misma técnica que para el cordón de primera pasada, y cuidar que la temperatura se mantenga elevada durante el proceso, mantener el martilleo sobre el material recién depositado y no excederse en longitud aportada.

En el octavo paso, luego de realizar el último cordón de presentación, inmediatamente se somete la pieza caliente a las resistencias ya preparadas a 400°C con lo que se logra disminuir el diferencial y el gradiente de temperatura y, por lo tanto, la transferencia de calor de la pieza hacia el ambiente. La intención es maximizar los efectos de la reducción de esfuerzos internos residuales del enfriamiento brusco.

Al estabilizarse la temperatura de toda la pieza a 400°C se deja permanecer a esta temperatura por 45 minutos. A esta temperatura, que es menor a la temperatura de transformación, se consigue realizar un revenido en la pieza, para alivio de tensiones, si se consigue bajar lentamente de 400°C a

temperatura ambiente. "Por ello, inmediatamente, se quita de las resistencias y se somete al material a la fibra de vidrio que actúa como aislante térmico.

6. COMPARACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS APLICANDO DIFERENTES PROCEDIMIENTOS DE SOLDADURA DEL HIERRO FUNDIDO

6.1. Caso 1: Proceso incorrecto de soldadura

En muchas ocasiones se puede confundir la fundición gris con acero al carbono y realizar un proceso de reparación menos cuidadoso, o puede que se identifique el material pero se utilicen métodos incorrectos por desconocimiento. Una muestra de la realización de procedimientos incorrectos es la elección de electrodo para acero inoxidable en las reparaciones de fundición gris, lo cual no es recomendado. En esta prueba no se evaluará la elección de este tipo de electrodo.

En el caso 1 se evaluará las influencias en las propiedades mecánicas de un procedimiento no recomendado de soldadura:

- Se utiliza el electrodo E-NiFeCr
- No se realiza precalentamiento de material base
- No se realiza precalentamiento de material de aporte
- Demasiada longitud en los cordones, alto aporte de calor
- No se realiza martilleo
- El posenfriamiento no es adecuado, se enfría al aire
- No se realiza un Revenido, ni tratamiento térmico de alivio de tensiones

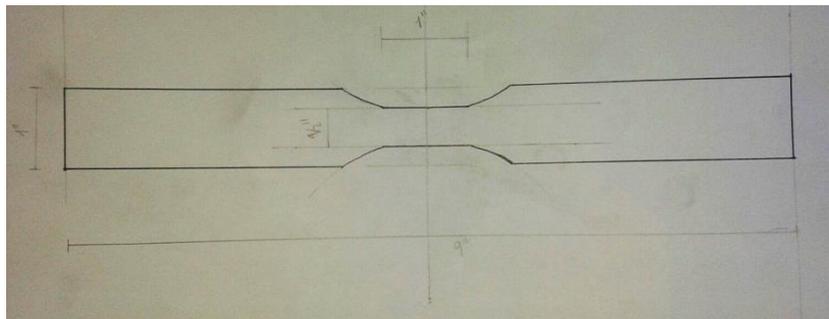
6.1.1. Ensayo de tensión

Un requisito para el ensayo de tensión es llevar las probetas con acabado superficial pulido, para que las dimensiones en las que se efectúen las cargas sean uniformes. Por eso, se debe eliminar el bulto del cordón de presentación y penetración.

Medidas teóricas de la sección central de la probeta 1, longitudinal a la soldadura:

$\frac{1}{2}$ pulgada por $\frac{1}{4}$ pulgada = 1,27cm por 0,635 cm.

Figura 23. **Medidas teóricas de probeta**



Fuente: elaboración propia

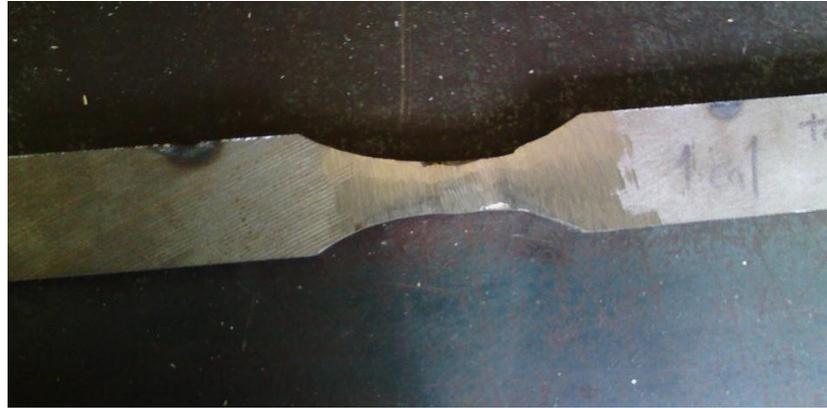
Medidas reales de la sección central de la probeta 1, longitudinal a la soldadura:

- 1,245cm por 0,593cm
- 1,238cm por 0,590cm

Medidas reales promedio probeta 1: 1,2415cm por 0,591cm.

Área promedio probeta 1= 0,734 cm²

Figura 24. **Probeta soldada con superficie pulida**



Fuente: elaboración propia.

Carga máxima probeta 1= 660 Kg

Carga de rotura probeta 1= 540 Kg

$$\text{Esfuerzo probeta 1} = \frac{\text{Carga máxima}}{\text{Area}} = \frac{660 \text{ Kg}}{0,734 \text{ cm}^2} = 899,5 \text{ Kg/cm}^2$$

6.1.2. **Ensayo de dureza**

Para la realización del ensayo de dureza en la probeta 1 donde se realizó la soldadura por los métodos incorrectos, se realiza en una máquina Rockwell Hardness Tester modelo HR-150A, y se utiliza un penetrador con punta de diamante a 120° para medición de HRC.

Figura 25. **Medición de dureza con máquina Rockwell Hardness Tester modelo HR-150A**



Fuente: Taller de Mecánica, T-7, Facultad de Ingeniería

Las mediciones se hacen sobre el cordón y sobre la zona afectada térmicamente a uno y dos milímetros.

Figura 26. **Indentaciones de ensayo de dureza**



Fuente: elaboración propia

Las mediciones de dureza obtenidas en Hardness Rockwell C son:

Tabla II. **Resultados de ensayo de dureza del Caso 1**

	Cordón	1 mm del cordón	2 mm del cordón
1	8	15,5	14,5
2	2,5	16,5	12,5
Promedio	5,25	16	13,5

Fuente: Elaboración propia.

6.1.3. Radiografía

Tabla III. **Resultados de radiografía en probeta No. 1**

Probeta Caso 1/ condiciones de soldadura	Resultados
Se utiliza el electrodo E-NiFeCl.	
No se realiza precalentamiento de material base.	
No se realiza precalentamiento de material de aporte.	
Demasiada longitud en los cordones, alto aporte de calor.	
No se realiza martilleo.	
El posenfriamiento no es adecuado, se enfría al aire.	
No se realiza un revenido, ni tratamiento térmico de alivio de tensiones.	
Amperaje y polaridad: 90 amperios y CDPI.	

Continuación Tabla III

Análisis
a) Falta de fusión. Dos razones principales dan lugar a dicha falla. La falta de fusión se debe a que al no haber precalentamiento, no se logra elevar la temperatura del material base desde la temperatura ambiente hasta temperatura de fusión en una longitud total de soldadura de ½ pulgada. La ausencia de martilleo hace que el material aportado se contraiga cuando empieza a enfriarse y separe la aleación hecha con el material base.
b) Cordón irregular. Defecto superficial poco influyente en propiedades mecánicas, la irregularidad presentada puede ocasionar diferentes estructuras metalográficas debidas al aporte de calor poco uniforme en la ZAT.

Fuente: elaboración propia

6.1.4. Ensayo metalográfico

El procedimiento de preparación para observar claramente la estructura de la soldadura y en la zona afectada térmicamente consiste en pulir con lija de agua, empezando por granos gruesos 80, 100, 150, hasta alcanzar grano tan fino como el número 1200. El ataque químico se realiza con nital, para atacar la fundición gris y resaltar los detalles al microscopio.

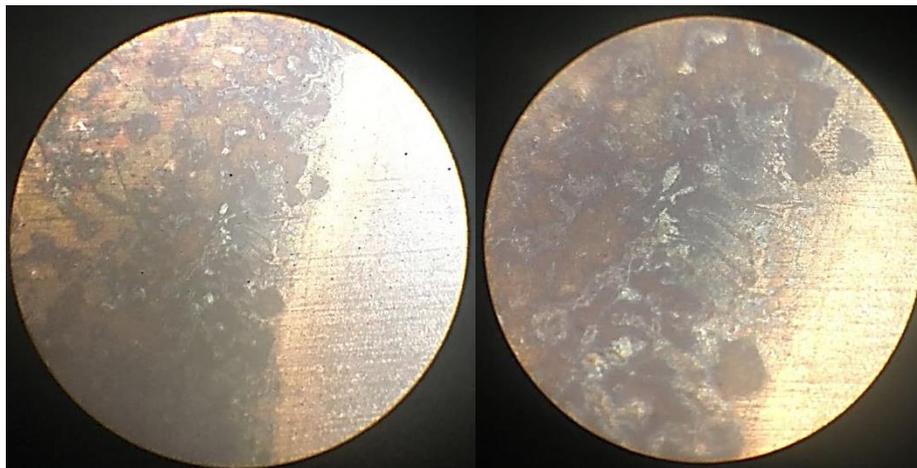
Figura 27. **Preparación de pieza , izquierda probeta pulida, derecha atacada químicamente**



Fuente: Taller de Mecánica, T-7, Facultad de Ingeniería.

La microestructura encontrada en la línea de aleación, como puede observarse en la siguiente figura, es de presencia de esteadita alrededor de la austenita primaria, la cual es una estructura frágil.

Figura 28. **Microestructura en línea de aleación, izquierda a 100x derecha a 200x .Caso 1**



Fuente: Taller de Mecánica, T-7, Facultad de Ingeniería.

La microestructura en la zona afectada térmicamente es la conocida como ojo de buey, donde se observan los nódulos de carbono revenido rodeados por ferrita que es el área blanca.

Figura 29. **Microestructura en ZAT, izquierda a 100x derecha a 200x.**

Caso 1



Fuente: Taller de Mecánica, T-7, Facultad de Ingeniería.

6.2. Caso 2: Procedimiento empírico tradicional en la soldadura del hierro fundido

Cuando se logra identificar la fundición gris y se tiene experiencia soldando, el soldador tiene el conocimiento que la fundición gris debe sumergirse en cal luego de aplicada la soldadura, incluso realizan martilleo muy suave en la zona afectada por el calor “para aliviar tensiones”. Este es el método para soldar fundición gris más comúnmente utilizado en la industria, pero tiene ciertas falencias. Por mucha práctica que tenga el soldador, puede tener la idea de realizar la reparación de la fundición con electrodo de acero inoxidable, lo cual es incorrecto, y siempre el débil martilleo lo realizan en la

zona afectada térmicamente donde no sirve de nada, ya que el martilleo debe realizarse con relativa fuerza sobre el cordón de soldadura directamente después de la aplicación.

En pasos resumidos, a continuación se describe el proceso de soldadura del caso 2:

- Se utiliza el electrodo E-NiFeCl.
- No se realiza precalentamiento de material base.
- No se realiza precalentamiento de material de aporte.
- Demasiada longitud en los cordones, alto aporte de calor.
- El martilleo es débil y lo recibe el material base, no el de aporte.
- El posenfriamiento se realiza sumergiendo la pieza en cal, se consigue enfriamiento lento.
- No se realiza un revenido, ni tratamiento térmico de alivio de tensiones.

6.2.1. Ensayo de tensión

Un requisito para el ensayo de tensión es llevar las probetas con acabado superficial pulido para que las dimensiones en las que se efectúen las cargas sean uniformes, por lo que hay que eliminar el bulto del cordón de presentación y penetración.

Medidas teóricas de la sección central de la probeta 2, longitudinal a la soldadura:

$\frac{1}{2}$ pulgada por $\frac{1}{4}$ pulgada = 1,27cm por 0,635 cm.

Ver figura 23.

Medidas reales de la sección central de la probeta 2, longitudinal a la soldadura:

- 1,226cm por 0,589cm
- 1,195cm por 0,573cm

Medidas reales promedio probeta 2 : 1,2105cm por 0,581cm.

Área promedio probeta 2 = 0,703 cm²

Ver figura 24.

Carga máxima probeta 2 = 695 Kg

Carga de rotura probeta 2 = 545 Kg

$$Esfuerzo\ probeta\ 2 = \frac{Carga\ máxima}{Area} = \frac{695\ Kg}{0,703\ cm^2} = 988,2\ Kg/cm^2$$

6.2.2. Ensayo de dureza

Para la realización del ensayo de dureza en la probeta 2, que fue sometida a enfriamiento lento en cal, se realiza en una máquina Rockwell Hardness Tester modelo HR-150A, y se utiliza un penetrador con punta de diamante a 120° para medición de HRC. Ver figura 25.

Las mediciones se hacen sobre el cordón y sobre la zona afectada térmicamente a uno y dos milímetros. Ver figura 26.

Las mediciones de dureza obtenidas en Hardness Rockwell C son:

Tabla IV. **Resultados del ensayo de dureza del caso 2**

	Cordón	1 mm del cordón	2 mm del cordón
1	11,5	14	14,5
2	3	13	12
Promedio	7,25	13,5	13,25

Fuente: Elaboración propia

6.2.3. Radiografía

Tabla V. **Resultados de radiografía en probeta No. 2**

Probeta Caso 2/ condiciones de soldadura	Resultados
Se utiliza el electrodo E-NiFeCl	a) Libre de indicaciones. Cordón aceptado, dentro de norma
No se realiza precalentamiento de material base.	
No se realiza precalentamiento de material de aporte.	
Demasiada longitud en los cordones, alto aporte de calor.	
El martilleo es débil y lo recibe el material base, no el de aporte.	
El posenfriamiento se realiza sumergiendo la pieza en cal, se consigue enfriamiento lento.	
No se realiza un Revenido, ni tratamiento térmico de alivio de tensiones.	
Amperaje y polaridad: 90 amperios y CDPI.	

Continuación Tabla V

Análisis
A) Libre de indicaciones: la probeta ha sido aceptada. La razón de que no haya habido falta de fusión a pesar de que no hubo precalentamiento ni martilleo correcto, es que el aporte de calor fue muy uniforme y la contracción del níquel del electrodo no fue suficientemente perjudicial como para separarse del material base.

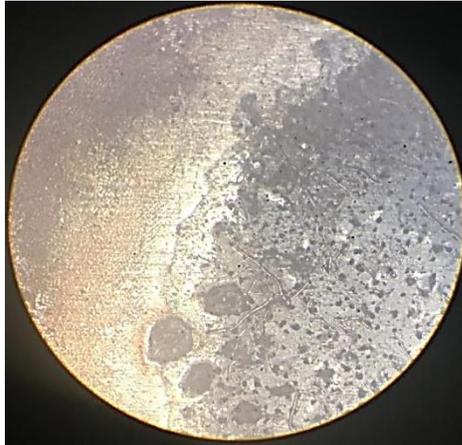
Fuente: elaboración propia

6.2.4. Ensayo metalográfico

El procedimiento de preparación para observar claramente la estructura de la soldadura y en la zona afectada térmicamente consiste en pulir con lija de agua, empezando por granos gruesos 80, 100, 150, hasta alcanzar grano tan fino como el número 1200. El ataque químico se realiza con nital, para atacar la fundición gris y resaltar los detalles al microscopio. Ver figura 27.

La siguiente figura muestra la microestructura en la línea de aleación en el caso 2, donde se puede ver hojuela de grafito demasiado pequeña por la presencia de silicio la cual es una estructura débil.

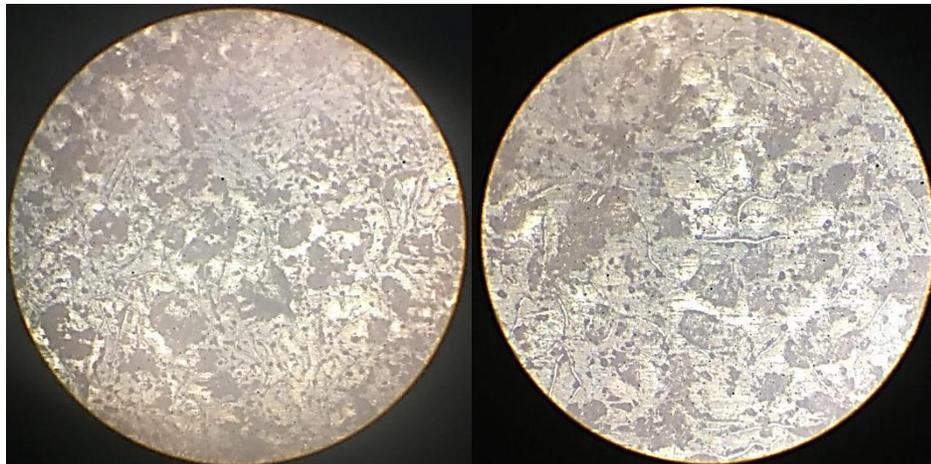
Figura 30. **Microestructura en línea de aleación a 100x. Caso 2**



Fuente: Taller de Mecánica, T-7, Facultad de Ingeniería.

La microestructura en la zona afectada térmicamente presenta hojuelas de grafito de tamaño mediano, de matriz combinada de perlita y ferrita (áreas blancas), microestructura con mediana resistencia mecánica.

Figura 31. **Microestructura en ZAT, izquierda a 100x derecha a 200x. Caso 2.**



Fuente: Taller de Mecánica, T-7, Facultad de Ingeniería.

6.3. Caso 3: Procedimiento correcto de soldadura

Con el material debidamente identificado se realiza un procedimiento técnicamente correcto para una reparación de soldadura de fundición gris. El soldador capacitado conoce la forma precisa en que debe realizar dicha reparación, lo cual se detalla a continuación:

- Se utiliza el electrodo E-NiFeCl
- Se realiza precalentamiento de material base.
- Se realiza precalentamiento de material de aporte.
- Longitud de cordones menor de 2 pulgadas, aporte de calor no exagerado.
- El martilleo lo recibe directamente el material de aporte con un martillo de bola y con relativa fuerza, para prevenir la contracción del níquel y hierro del material de aporte.
- Inmediatamente después de la soldadura, cuando la temperatura no ha disminuido sustancialmente, se somete a las resistencias a 400°C durante 45 minutos.
- Al apagar las resistencias se coloca la probeta entre fibra de vidrio para realizar el enfriamiento lento y evitar tensiones internas y completar de esta manera el tratamiento térmico de Revenido.

6.3.1. Ensayo de tensión

Un requisito para el ensayo de tensión es llevar las probetas con acabado superficial pulido- Esto sirve para que las dimensiones en las que se efectúen las cargas sean uniformes, por lo que hay que eliminar el bulto del cordón de presentación y penetración.

Medidas teóricas de la sección central de la probeta 3, longitudinal a la soldadura:

$\frac{1}{2}$ pulgada por $\frac{1}{4}$ pulgada = 1,27cm por 0,635 cm.

Ver figura 23.

Medidas reales de la sección central de la probeta 3, longitudinal a la soldadura:

- 1,207cm por 0,583cm
- 1,204cm por 0,576cm

Medidas reales promedio probeta 3: 1,206cm por 0,5795cm.

Área promedio probeta 3 = 0,699 cm²

Ver figura 24.

Carga máxima probeta 3 = 695 Kg

Carga de rotura probeta 3 = 545 Kg

$$\text{Esfuerzo probeta 2} = \frac{\text{Carga máxima}}{\text{Area}} = \frac{695 \text{ Kg}}{0,699 \text{ cm}^2} = 994,5 \text{ Kg/cm}^2$$

6.3.2. Ensayo de dureza

Para la realización del ensayo de dureza en la probeta 3, donde fueron aplicados los procedimientos correctos de soldadura y se experimentó con la propuesta del aislante térmico, se realiza en una máquina Rockwell Hardness

Tester modelo HR-150A, y se utiliza un penetrador con punta de diamante a 120° para medición de HRC. Ver figura 25.

Las mediciones se hacen sobre el cordón y sobre la zona afectada térmicamente a uno y dos milímetros. Ver figura 26.

Las mediciones de dureza obtenidas en Hardness Rockwell C son:

Tabla VI. **Resultados del ensayo de dureza del Caso 3**

	Cordón	1 mm del cordón	2 mm del cordón
1	3,5	17	11
2	5	13,5	12,5
Promedio	4,25	15,25	11,75

Fuente: Elaboración propia

6.3.3. Radiografía

Tabla VII. Resultados de radiografía en probeta No. 3

Probeta Caso 3/ condiciones de soldadura	Resultados
Se utiliza el electrodo E-NiFeCl	a) Porosidad
Se realiza precalentamiento de material base.	b) Cordón irregular
Se realiza precalentamiento del material de aporte.	Cordón no aceptado, fuera de norma
Longitud de cordones menor de 2 pulgadas, aporte de calor no exagerado.	
El martilleo lo recibe directamente el material de aporte con un martillo de bola y con relativa fuerza, para prevenir la contracción del níquel y hierro del material de aporte.	
Inmediatamente después de la soldadura, cuando la temperatura no ha disminuido sustancialmente, se somete a las resistencias a 400°C durante 45 minutos.	
Al apagar las resistencias se coloca la probeta entre fibra de vidrio para realizar el enfriamiento lento y evitar tensiones internas y completar de esta manera el tratamiento térmico de Revenido.	
Amperaje y polaridad: 90 amperios y CDPI.	
Análisis	
<p>a) Porosidad. Defecto ocasionado por suciedad residual en cordones de varias pasadas. La escoria influye en esto, ya que la soldadura empieza a solidificar desde la raíz hasta el cordón de presentación y las partículas sólidas son desplazadas hacia la superficie del cordón de presentación. Este es un defecto de aplicación, por lo que no es un dato representativo para el objeto de estudio en este proyecto. Vale la pena resaltar que la fusión está bien realizada y no hay fisuras, lo que sí es realmente el objeto de este ensayo.</p>	

Continuación Tabla VII

b) Cordón irregular. Defecto superficial poco influyente en propiedades mecánicas, la irregularidad presentada puede ocasionar diferentes estructuras metalográficas debidas al aporte de calor poco uniforme en la ZAT.

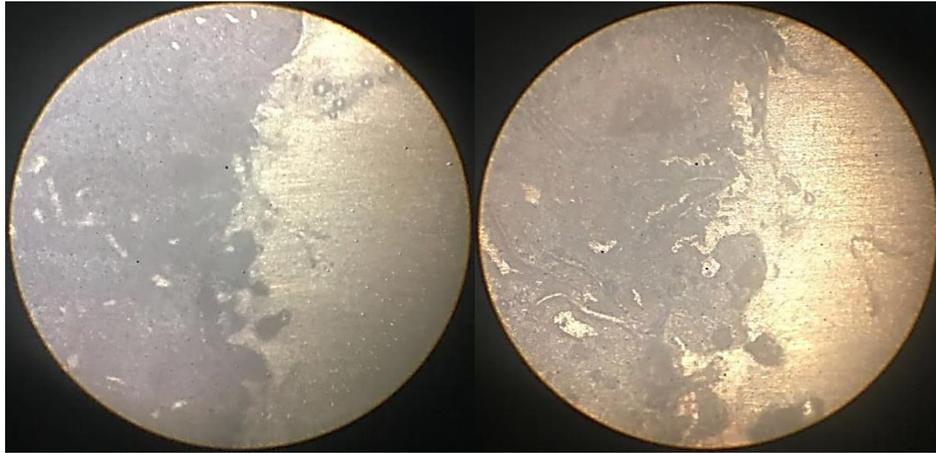
Fuente: elaboración propia

6.3.4. Ensayo metalográfico

El procedimiento de preparación para observar claramente la estructura de la soldadura y en la zona afectada térmicamente consiste en pulir con lija de agua, empezando por granos gruesos 80, 100, 150, hasta alcanzar grano tan fino como el número 1200. El ataque químico se realiza con nital, para atacar la fundición gris y resaltar los detalles al microscopio. Ver figura 27.

En la siguiente estructura se puede observar que el área oscura está formada por carbono revenido, y pequeñas cantidades de ferrita.

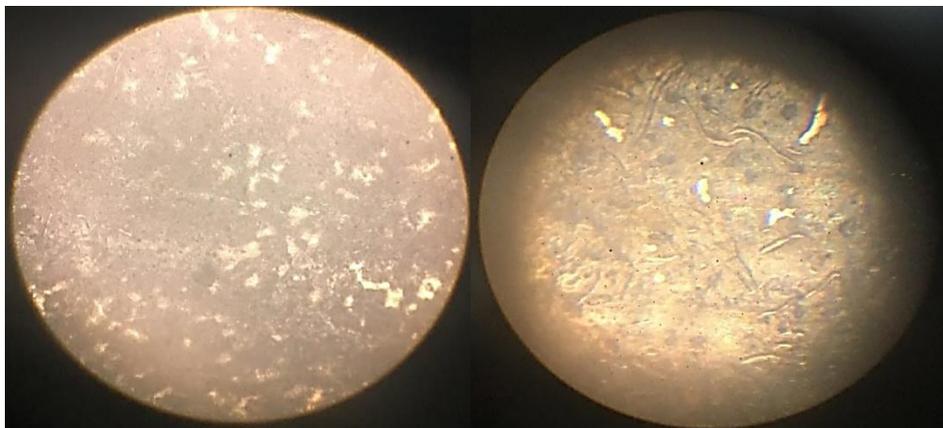
Figura 32. **Microestructura en línea de aleación, izquierda a 100x y derecha a 200x. Caso 3**



Fuente: Taller de Mecánica, T-7, Facultad de Ingeniería.

En la siguiente figura se puede observar menores áreas blancas, por lo que hay menor cantidad de ferrita y la que predomina es la perlita, estructura de altas propiedades mecánicas. Las hojuelas de grafito tienen tamaño mediano y distribución no uniforme lo cual es conveniente.

Figura 33. **Microestructura en ZAT, izquierda a 100x derecha a 200x. Caso 3**



Fuente: Taller de Mecánica, T-7, Facultad de Ingeniería.

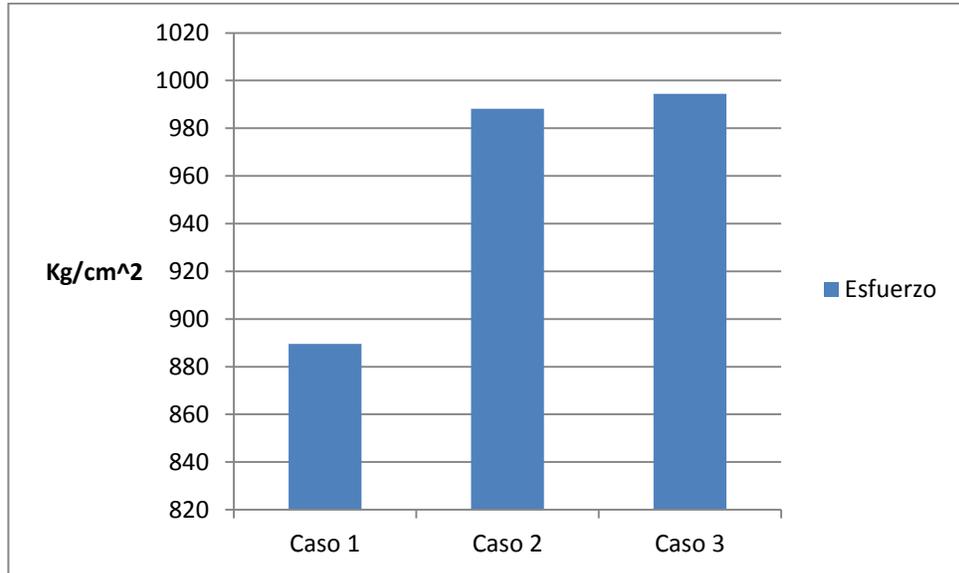
6.4. Recopilación de propiedades

Tabla VIII. Resumen de resultados obtenidos de ensayos

Prueba		Caso 1	Caso 2	Caso 3
Ensayo tensión	Área	0,734cm ²	0,703cm ²	0,699cm ²
	Carga	660 kg	695 kg	695 kg
	Esfuerzo	889,5 kg/cm ²	988,2 kg/cm ²	994,5 kg/cm ²
Ensayo de dureza HRC	En cordón	5,25	7,25	4,25
	a 1mm de cordón	16	13,5	15,25
	a 2mm de cordón	13,5	13,25	11,75
Radiografía	Falta de fusión	Sí	No	No
	Fisura	No	No	No
Ensayo metalográfico	Microestructura en línea de aleación	Austenita con cantidades de esteadita	Hojuela de grafito demasiado pequeña y débil	Carbono revenido y ferrita
	Microestructura en ZAT	Carbono revenido rodeado de ferrita	Matriz combinada de ferrita y perlita mediana resistencia	Predomina perlita y poca ferrita, hojuela de grafito mediana no uniforme

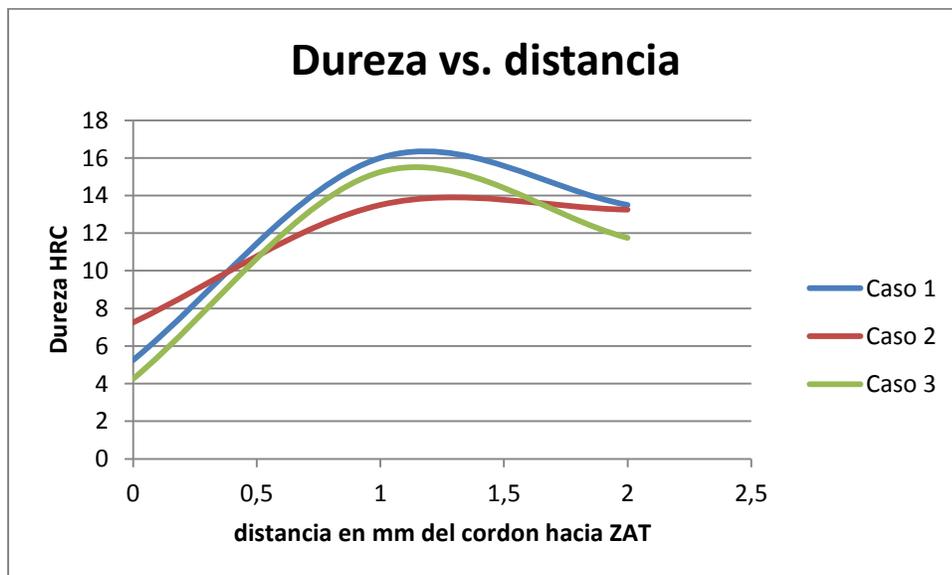
Fuente: elaboración propia.

Figura 34. **Esfuerzo de tensión obtenido en cada caso**



Fuente: elaboración propia.

Figura 35. **Tendencia de dureza desde cordón hasta 2mm de la ZAT**



Fuente: elaboración propia

CONCLUSIONES

1. La fibra de vidrio es un material apto para soportar la temperatura para el poscalentamiento desde 400 grados centígrados a temperatura ambiente de una soldadura de fundición gris y su integridad no se ve afectada.
2. En la formación de fisuras en la fundición gris intervienen factores como la composición química del material base, el choque térmico y la dilatación del material de aporte, lo que genera esfuerzos internos que al superar la resistencia del material se crean las fisuras.
3. Las prestaciones mecánicas se ven mejoradas con la aplicación del aislante propuesto respecto del método convencional, generalmente empleado por un soldador experimentado, en un 0.64% en resistencia a la tensión.
4. La microestructura de la zona afectada térmicamente lograda con el método de poscalentamiento recomendado, prevalece la perlita y pequeña cantidad de ferrita. La hojuela de grafito es de tamaño mediano y no es uniforme lo cual caracteriza por tener mayor resistencia mecánica, mientras que con métodos convencionales hay mayor presencia de ferrita la cual es menos resistente.

RECOMENDACIONES

1. Para efectuar la soldadura de una fundición gris es recomendado realizar todo el estudio previo del procedimiento correcto, conocerlo y aplicarlo, para obtener así la mayor probabilidad de realizar una reparación exitosa.
2. La elección del material de aporte correcto y el control correcto del aporte de calor durante todo el proceso de reparación, incluyendo el pre y poscalentamiento, son vitales para reducir la posibilidad de creación de fisuras y/o esfuerzos internos.
3. Realizar ensayos no destructivos como una radiografía posterior a la reparación para monitorear la integridad interna y la calidad final de la soldadura, ya que la fisura puede ser interna por lo que con un examen visual no hay forma de detectar.
4. Se recomienda la utilización de métodos de precalentamiento y poscalentamiento para la realización de uniones de soldadura de fundición gris, el aislante de calentamiento propuesto es mejor opción respecto del tradicional enfriamiento en cal.

BIBLIOGRAFÍA

1. HERNÁNDEZ, Sampieri R.; FERNÁNDEZ COLLADO, S. y BAPTISTA Lucio, *Metodología de la investigación*. 5ª. Ed. México: Mc Graw-Hill, 2010. 356 p.
2. HORWITZ, Henry. *Soldadura, aplicaciones y práctica*. Mexico: Alfaomega Grupo Editor, 2002. 158 p.
3. RIVERA MORALES, Gerson Francisco. *Análisis metalográfico con la aplicación de la soldadura smaw, utilizando el microscopio para determinar las propiedades y características de los aceros AISI 1018 y AISI 1045*. Trabajo de graduación de ingeniero mecánico, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala. 2010, 146 p.
4. ASKELAND, Donald R. *Ciencia e Ingeniería de los Materiales*. 3ra. Ed. México: International Thomson Editores. 1998. 552 p.
5. HARMER E., Davis. *Ensaye e Inspección de los Materiales de Ingeniería*. 3ra. ed. México: Continental, 1964. 144 p.
6. AVNER, Sydney H. *Introducción a la metalurgia física*. 2da. ed. México: Mc. Graw-Hill, 1988. 149 p.
7. ALONZO MORALES, Darlineth Yajaira. *Clases de electrodos utilizados en soldadura, fabricados y distribuidos en Guatemala*. Trabajo de

graduación de ingeniera Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2014.

8. CASTILLO RODRIGUEZ, Felipe. *Hierros fundidos*. [en línea]. <http://olimpia.cuautitlan2.unam.mx/pagina_ingenieria/mecanica/mat/mat_mec/m6/hierro%20fundido.pdf>. [Consulta: julio de 2016].

ANEXOS

Anexo 1. Ensayo Metalográfico



• PROYECTOS
• INSPECCIONES

Guatemala 27 de Febrero de 2016.

Sr:
DIEGO TOLEDO.
GUATEMALA, CIUDAD

Estimado Sr. Toledo, sirva la presente para saludarle e informarle que de acuerdo a su solicitud, se ha realizado la inspección radiográfica de tres probetas soldadas al centro, de acuerdo a las siguientes características:

1.0- Objetivo:

Verificación de Integridad Mecánica de Soldadura que une por el centro probeta de acero.

2.0- Alcance:

3 Probetas de acero tipo sección Reducida, soldadas al centro.

3.0- Código de Referencia:

- a. ASME SECCION V, ARTICULO 2 Radiografía Industrial.
- b. ASME SECCION IX, CALIFICACION DE PROCEDIMIENTOS DE SOLDADURA Y CALIFICACION DE SOLDADORES, PARTE QW 191.1

4.0- Metodología:

La toma de cliché, de acuerdo a procedimiento interno de EMS, PROYECTOS E INSPECCIONES, S.A.:

- | | |
|-------------------------------|--------------------|
| a. Distancia Fuente Objeto: | 0" (a contacto) |
| b. Distancia Fuente Película: | 13" |
| c. Actividad de Fuente: | 9 Curies |
| d. Tiempo de Exposición: | 2 min 30 segundos |
| e. Densidad: | 2.3 H&D promedio |
| f. Tipo de Película: | ASTM TIPO II |
| g. Marca y Designación: | AGFA STRUCTURIX D7 |
| h. Tiempo de Revelado: | 5 min@20°C |

EMS PROYECTOS E INSPECCIONES S.A.

Fuente: EMS Proyectos e Inspecciones S.A.



- PROYECTOS
- INSPECCIONES

5.0- Resultado de Inspección Radiográfica:

A continuación se enumeran las indicaciones que se observan en la imagen radiográfica, empleando el criterio de ACEPTACIÓN O RECHAZO indicado en ASME IX, QW 191.1.2

- a- TOMA MUESTRA 1:
 - a. Falta de Fusión
 - b. Cordón Irregular
 - c. FUERA DE NORMA (NO ACEPTADO)



- b- TOMA MUESTRA 2:
 - a. Libre de Indicaciones
 - b. EN NORMA (ACEPTADO)



EMS PROYECTOS E INSPECCIONES S.A.

Fuente: EMS Proyectos e Inspecciones S.A.



- PROYECTOS
- INSPECCIONES

- c- TOMA MUESTRA 3:
- a. Porosidad
 - b. Cordón Irregular
 - c. FUERA DE NORMA (NO ACEPTADO)



Agradecemos a usted la confianza en nuestros servicios, quedando pendiente de sus noticias y recordando que si tiene alguna duda, en relación a este informe, nos puede visitar o solicitar alguna ampliación.

Atentamente

Eduardo E. Mendez S.
CWI 96050031

EMS PROYECTOS E INSPECCIONES S.A.

Fuente: EMS Proyectos e Inspecciones, S.A.



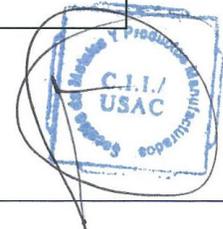
O.T. No. 36103 INFORME No. 247-M
INTERESADO: DIEGO FERNANDO TOLEDO CARDENAS CARNET: 2010-20818
PROYECTO: TRABAJO DE GRADUACION "APLICACIÓN DE AISLANTE TERMICO EN SOLDADURA SMAW EN HIERRO FUNDIDO GRIS COMO ALTERNATIVA A LOS METODOS CONVENCIONALES DE PRE Y POSCALENTAMIENTO".
ASUNTO: ENSAYO DE TENSION A PROBETAS DE ACERO.
FECHA: 01/06/2016

ANTECEDENTES

El estudiante **DIEGO FERNANDO TOLEDO CARDENAS**, CARNE No. 2010-20818, de la carrera de Ingeniería Mecánica, solicito a este Centro de Investigaciones de Ingeniería que se realizara, ensayo de tensión, a 03 probetas de acero. Los ensayos en cuestión son parte del trabajo de tesis, "APLICACIÓN DE AISLANTE TERMICO EN SOLDADURA SMAW EN HIERRO FUNDIDO GRIS COMO ALTERNATIVA A LOS METODOS CONVENCIONALES DE PRE Y POSCALENTAMIENTO".

RESULTADOS

No.	Ancho cm	Espesor cm	Área cm ²	Carga kg	Esfuerzo kg/cm ²	Elongación mm
1	1,2415	5,91	7,34	660	89,95	1,3
2	1,2105	5,81	7,03	695	98,82	1,3
3	1,206	5,795	6,99	695	99,45	1,6





**CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**



Nº 22765

O.T. No. 36103 INFORME No. 247-M
INTERESADO: DIEGO FERNANDO TOLEDO CARDENAS CARNET: 2010-20818
PROYECTO: TRABAJO DE GRADUACION "APLICACIÓN DE AISLANTE TERMICO EN SOLDADURA SMAW EN HIERRO FUNDIDO GRIS COMO ALTERNATIVA A LOS METODOS CONVENCIONALES DE PRE Y POSCALENTAMIENTO".
ASUNTO: ENSAYO DE TENSION A PROBETAS DE ACERO.
FECHA: 01/06/2016



Atentamente,
M.Sc. Ing. Pablo Christian De León Rodríguez
Jefe de Metales y Productos
Manufacturados



Vo.Bo.

Ing. Francisco Javier Quiñonez de la Cruz
DIRECTOR C.I.I.



/cbr

FACULTAD DE INGENIERIA —USAC—
Edificio T-5, Ciudad Universitaria zona 12
Teléfono directo: 2418-9115, Planta: 2418-8000 Exts. 86209 y 86221 Fax: 2418-9121
Página web: <http://cii.usac.edu.gt>

Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.