

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA E INGENIERIA
METALÚRGICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA METALÚRGICA



**“ESTUDIO DE PARÁMETROS DE SOLDABILIDAD EN LA
RECONSTRUCCIÓN DE PIEZAS DE HIERRO FUNDIDO GRIS”.**

TESIS

PRESENTADA POR:

MILTON ARTURO MAMANI ALANOCA

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO METALURGISTA

PUNO – PERÚ

2018

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
FACULTAD DE INGENIERIA GEOLOGICA E INGENIERIA METALURGICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA METALURGICA

“ESTUDIO DE PARÁMETROS DE SOLDABILIDAD EN LA RECONSTRUCCIÓN DE PIEZAS DE HIERRO FUNDIDO GRIS”.

TESIS

PRESENTADA POR:

Bach. MILTON ARTURO MAMANI ALANOCA

PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO METALURGISTA



APROBADO POR:

PRESIDENTE

:

M.Sc. Julio Alberto Maquera Gil

PRIMER MIEMBRO

:

M.Sc. Carlos Alejandro Chavez Catacora

SEGUNDO MIEMBRO

:

M.Sc. Darssy Argélida Carpio Ramos

DIRECTOR / ASESOR

:

Ing. Benito Hugo Fernández Ochoa

Área : Metalurgia transformativa

Tema : Metalurgia de la soldadura

Fecha de sustentación: 30 de Julio del 2018

DEDICATORIA

Lleno de regocijo, de amor y esperanza, dedico este proyecto a cada uno de mis seres queridos quienes, han sido mis pilares para seguir adelante. Es para mí una satisfacción poder dedicarles a ellos, que con mucho esfuerzo y esmero, me los he ganado.

A mis padres, Julián Mamani Apaza y Teófila Alanoca Vargas, porque ellos son la motivación de mi vida, mi orgullo de ser lo que seré.

A mis hermanos, Hernán, Maribel, Cleofé y Rocío, porque son la razón de sentirme tan orgulloso de culminar mi meta, gracias a ellos por confiar siempre en mí.

Y sin dejar atrás a mi abuela María Apaza, quien siempre me bendice desde el cielo, gracias por haber formado parte de mi vida y por permitirme haber sido de su orgullo.

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, agradezco a Dios por haberme ayudado maravillosamente en cada paso de esta investigación, facilitando y abriendo caminos, y sobre todo en haberme inspirado, por su infinita misericordia, por haberme dado la oportunidad de cumplir una meta más de mi vida.

A la Universidad Nacional del Altiplano y a la Escuela profesional de Ingeniería Metalúrgica; así como a sus docentes por los conocimientos compartidos durante mi formación profesional.

A mis padres quienes se esforzaron en darme lo mejor, por su paciencia, consejos, apoyo incondicional y motivación en todas las etapas de mi vida.

A los miembros del jurado, por su acertada y colaboración en la elaboración de este proyecto.

A toda mi familia, quienes estuvieron siempre alentándome para cumplir con satisfacción esta etapa de mi vida.

INDICE GENERAL

DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTO	iv
INDICE DE TABLAS	ix
INDICE DE FIGURAS	x
RESUMEN	xi
ABSTRACT	xii

CAPITULO I

INTRODUCCIÓN	1
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	4
1.2. HIPOTESIS.....	5
1.2.1. Hipótesis General	5
1.2.2. Hipótesis Específicos	5
1.3. OBJETIVOS	6
1.3.1. Objetivo General	6
1.3.2. Objetivos Específicos.....	6

CAPITULO II

REVISIÓN DE LITERATURA	7
2.1. REFERENCIAS TEORICAS	7
2.1.1. Aleaciones Hierro – Carbono.....	7
2.1.2. Fundiciones.....	9
2.1.2.1 Clasificación de las fundiciones.....	9
2.1.2.2 Características de los Hierro Fundidos	11
2.1.2.3 Características de las fundiciones	11
2.1.2.4 Resistencia y dureza de la Fundición Gris	12

2.1.3.	Dureza.....	13
2.1.3.1	Dureza Brinell.....	15
2.1.3.2	Dureza Rockwell	17
2.1.3.3	Composición Química de la Fundición Gris.....	18
2.1.3.4	Propiedades de la Fundición Gris	18
2.1.3.5	Tipos de la Fundición Gris	21
2.1.3.6	Soldabilidad de la Fundición Gris	22
2.1.3.7	Electrodos para proceso SMAW.....	24
2.1.3.8	Temperaturas para el proceso de soldeo	27
2.1.3.9	Tratamiento térmico Post – Soldadura	29
2.2.	ANTECEDENTES.....	31

CAPITULO III

MATERIALES Y METODOS	35
3.1. ENFOQUE	35
3.2. MODALIDAD Y TIPO DE INVESTIGACIÓN	35
3.2.1. Investigación Bibliográfica	36
3.2.2. Investigación Experimental.....	36
3.3. NIVEL Y TIPOS DE INVESTIGACIÓN	36
3.3.1. Exploratorio.....	36
3.3.2. Descriptivo	37
3.3.3. Correlacional.....	37
3.3.4. Explicativo	37
3.4. POBLACIÓN Y MUESTRA	37
3.5. RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN.....	39
3.6. PROCESAMIENTO Y ANALISIS	39

3.7. PROCESO DE EJECUCIÓN	39
3.8. PROCESO DE SOLDABILIDAD	40
3.8.1. Características del material	40
3.8.2. Ensayo de dureza	41
3.8.3. Preparación de la junta a soldar	42
3.8.4. Selección del electrodo	44
3.8.5. Aplicación y control de la temperatura de precalentamiento ..	45
3.8.7. Análisis estadístico	48
3.8.8. Operacionalidad de variables	48
CAPITULO IV	
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	49
4.1. IDENTIFICACIÓN DEL MATERIAL BASE	49
4.2. COMPOSICIÓN QUIMICA DEL MATERIAL BASE	51
4.3. PROPIEDADES DE LA FUNDICIÓN SEGÚN EL DIAGRAMA DE MAURER	52
4.4. PROPIEDADES DE LA FUNDICIÓN SEGÚN EL DIAGRAMA DE NORBURY	53
4.5. CONTRASTACIÓN DE LA DUREZA EN EL MATERIAL BASE	55
4.6. SELECCIÓN DEL MATERIAL BASE.....	56
4.7. CONSIDERACIONES PARA LA SOLDADURA DEL HIERRO FUNDIDO GRIS.....	57
4.7.1. Placas de ensayo para el estudio de la soldadura del Hierro Fundido Gris con Pre-calentamiento	57
4.7.2. Dimensionamiento de la junta a ser soldada	58
4.7.4. Determinación de la temperatura de precalentamiento para soldar Hierro Fundido Gris.....	60

4.8. DETERMINACIÓN DEL CARBONO EQUIVALENTE.....	61
4.9. EVALUACIÓN TÉCNICA DE LAS PROBETAS SOLDADAS DE HIERRO FUNDIDO GRIS UTILIZANDO DIFERENTES TEMPERATURAS DE PRECALENTAMIENTO	63
4.10. ENSAYO DE DUREZA DE LA JUNTA SOLDADA DEL HIERRO FUNDIDO GRIS SIN PRECALENTAMIENTO	64
4.11. ENSAYO DE DUREZA DE LA JUNTA SOLDADA DEL HIERRO FUNDIDO GRIS CON PRECALENTAMIENTO A 100 °C	65
4.12. ENSAYO DE DUREZA DE LA JUNTA SOLDADA DEL HIERRO FUNDIDO GRIS CON PRECALENTAMIENTO A 200 °C	66
4.13. ENSAYO DE DUREZA DE LA JUNTA SOLDADA DEL HIERRO FUNDIDO GRIS CON PRECALENTAMIENTO A 300 °C	67
4.14. ENSAYO DE DUREZA DE LA JUNTA SOLDADA DEL HIERRO FUNDIDO GRIS CON PRECALENTAMIENTO A 370 °C	68
4.15. ENSAYO DE DUREZA DE LA JUNTA SOLDADA DEL HIERRO FUNDIDO GRIS CON PRECALENTAMIENTO A 400 °C	69
4.16. ENSAYO DE DUREZA DE LA JUNTA SOLDADA DEL HIERRO FUNDIDO GRIS CON PRECALENTAMIENTO A 500 °C	70
4.17. ENSAYO DE DUREZA DE LA JUNTA SOLDADA DEL HIERRO FUNDIDO GRIS CON PRECALENTAMIENTO A 600 °C	71
4.18. INTERPRETACION DE RESULTADOS.....	72
4.19. INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA DE PRECALENTAMIENTO EN LA DUREZA DE LA JUNTA SOLDADA.....	76
4.20. INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA DE PRECALENTAMIENTO EN EL ALIVIO DE TENSIONES DE PIEZAS FUNDIDAS	77
4.21. SOLDADURA DE RECUPERACIÓN DE UNA FUNDICIÓN GRIS	80
4.22. PLANTEAMIENTO DE EXPERIMENTOS DE RECUPERACION DE PIEZAS DE FUNDICIÓN GRIS	82

4.23. PLANTEAMIENTO DE RECUPERACIÓN DE MONOBLOCK DE MOTOR DE COMBUSTIÓN	86
4.24. PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA Y MATERIAL DE APORTE	87
CONCLUSIONES	93
RECOMENDACIONES.....	94
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	96
ANEXOS.....	98

INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Clasificación de las fundiciones grises según la norma ASTM A 48-41 ...	12
Tabla 2: Técnicas de ensayo de dureza	14
Tabla 3: Comparación de ensayos de dureza típicos.....	17
Tabla 4: Clasificación de grados de fundición gris	20
Tabla 5: Electrodo para soldadura de hierros fundidos	25
Tabla 6: Características y propiedades del material base	56
Tabla 7: Propiedades del material depositado según el fabricante	59

INDICE DE FIGURAS

Figura N° 1: Diagrama Fe-Fe ₃ C (6.67 %C) meta estable	8
Figura N° 2: Tipos de fundiciones comerciales.....	10
Figura N° 3: Diámetro vs. Resistencia a la tracción de grados de fundición gris.....	20
Figura N° 4: Tipos de fundición gris a) Fundición gris perlítica tomada a 200X b) Fundición ferrítico-perlítica a 100X c) fundición ferrítica a 100X.....	22
Figura N° 5: Esquema de temperaturas y zonas en fundición gris típica.....	24
Figura N° 6: Dureza de materiales de aporte en soldadura de fundiciones.....	26
Figura N° 7: Efecto del carbono equivalente en temperatura de no fractura para grados distintos de fundiciones	28
Figura N° 8: a) probeta seccionada: block de motor b) probeta preparada para ser soldada	43
Figura N° 9: Juntas sugeridas con penetración completa y parcial para hierros fundidos.....	44
Figura N° 10: Juntas sugeridas con penetración completa y parcial para hierros fundidos.....	44
Figura N° 11: Diagrama de Maurer para fundiciones de hierro	53
Figura N° 12: Diagrama de Norbury para fundiciones de hierro	54
Figura N° 13: Junta recomendada por la norma AWS D11.2.....	58
Figura N° 14: Procedimiento: Efecto del carbono equivalente en la temperatura de precalentamiento para el no agrietamiento para fundiciones de hierro	62
Figura N° 15: Metal Fundido: Dureza HB vs Temperaturas de precalentamiento	73
Figura N° 16: Intercara: Dureza HB vs Temperaturas de precalentamiento	74
Figura N° 17: ZAT: Dureza HB vs Temperaturas de precalentamiento.....	75
Figura N° 18: Material Base: Dureza HB vs Temperaturas de precalentamiento	75
Figura N° 19: Reparto de calor existente en una soldadura.....	77
Figura N° 20: Elementos básicos en la soldadura	77
Figura N° 21: agrietamiento en el haz.....	78
Figura N° 22: agrietamiento transversal.....	78
Figura N° 23: agrietamiento longitudinal.....	79
Figura N° 24: agrietamiento en el haz.....	79
Figura N° 25: Formas de cordones que se aplican en la recuperación	81
Figura N° 26: Perfil de penetración en la aplicación de la soldadura.....	81
Figura N° 27: Tensiones generadas por la soldadura	82
Figura N° 28: Precalentamiento en puntos necesarios	83
Figura N° 29: Piezas recuperadas de fundición gris poleas y múltiples	85
Figura N° 30: Cordón de soldadura depositado por el proceso SMAW	86
Figura N° 31: monoblock de motor de combustión	87
Figura N° 32: Monoblock Fisurado	90
Figura N° 33: Soldeo de monoblock.....	90
Figura N° 34: Cordón de soldadura sin efecto.....	91
Figura N° 35: Cordón de soldadura con defecto	91

RESUMEN

En la región de Puno, se desarrolla un sin número de procesos empíricos de soldadura para la reparación, recuperación y reconstrucción de elementos de máquinas y estructurales de diversos tipos de metales. Ahora bien, se sabe que, en el mundo industrial, el hierro fundido es uno de los metales más versátiles, debido a su simplicidad de elaboración posee un punto bajo de fusión y fluidez; lo cual hace que no sea tan común reconstruirlas a través del proceso de soldadura, ya que presentan baja soldabilidad debido a sus propiedades mecánicas que en ciertos casos son insustituibles por otros materiales.

Las piezas de hierro fundido como todo elemento mecánico expuesto a un trabajo continuo, tienden a deteriorarse por lo tanto hay que recurrir a procesos de reconstrucción, como la soldadura, que puede resultar más viable que realizar una nueva fundición por la complejidad de las piezas y el costo que representa fundir una sola pieza, en tal razón el objetivo del presente trabajo de investigación es evaluar los parámetros que permitan la reconstrucción de piezas de hierro fundido gris, mediante soldadura SMAW y determinar la influencia de la temperatura de precalentamiento a través de un proceso experimental de soldadura realizado en las juntas de hierro fundido gris clase 30 clasificada en la norma ASTM A 48-03, aplicando diferentes temperaturas de precalentamiento de 21°C a 600°C. La metodología que se utilizó fue la descriptiva- experimental, ya que a través de ello se consiguió describir, analizar paso a paso todo lo realizado en el estudio y se realizaron diferentes pruebas para determinar el tipo de metal de aporte y la temperatura de precalentamiento que permitieron proponer resultados y aportes para brindar soluciones a la problemática.

En consecuencia, se evaluaron las probetas soldadas con electrodos ENi-CI, en un procedimiento de soldadura SMAW realizando ensayos de dureza en la zona del material base, zona térmicamente afectada y el material fundido para poder determinar la variación en sus propiedades mecánicas influenciadas por la temperatura de precalentamiento. Posteriormente los resultados fueron tabulados y analizados, obteniendo como conclusión que 370°C es la temperatura que mejores propiedades presentó sobre el metal base.

Palabras claves: Soldadura, fundición, reconstrucción, piezas y dureza.

ABSTRACT

In Puno's region, one develops without number of empirical processes of weld for the repair, recovery and reconstruction of elements of machines and structural of diverse types of metals. Now well it is known that in the industrial world, the cast iron are one of the most versatile metals due to his simplicity of production possesses a low point of merger and fluency; which does that it is not so common to reconstruct them across the process of weld, since they present low weldability due to his mechanical properties that in certain cases are irreplaceable for other materials.

The pieces of cast iron like any mechanical component exposed to a constant work, they tend to deteriorate therefore it is necessary to resort to processes of reconstruction, as the weld, which can turn out to be more viable that to realize a new smelting for the complexity of the pieces and the cost that it represents to fuse an alone piece, in such a reason the aim of the present work of investigation is to evaluate the parameters that allow the reconstruction of pieces of cast iron by means of weld SMAW and to determine the influence of the temperature of warm-up across an experimental process of weld realized in the meetings of gray cast iron class 30 classified under the norm ASTM TO 48-03, applying different temperatures of warm-up of 21°C to 600°C. The methodology that was in use was descriptive - experimental, since across it it was managed to describe, to analyze stepwise everything realized in the study and different tests were realized to determine the type of metal of contribution and the temperature of warm-up that allowed to propose results and contributions to offer solutions to the problematics.

In consequence, there were evaluated the manometers welded with electrodes ENi-CI in a procedure of weld SMAW realizing hardness tests in the zone of materially base, zone térmicamente affected and the material fused to be able to determine the variation in his mechanical properties influenced by the temperature of warm-up. Later the results were tabulated and analyzed, obtaining as conclusion that 370°C is the temperature that he presented better properties on the metal base.

Key words: Weld, smelting, reconstruction, pieces and hardness.

CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

Uno de los principales problemas en la soldadura es el comportamiento de los metales ante la combinación de agentes atmosféricos y cambios de temperatura bruscos que pueda tener en el momento de ser soldado.

Cuando una pieza de hierro fundido se rompe el costo de reposición es enorme independientemente de la industria que se trate y para la empresa es imposible mantener almacenadas una serie de fundiciones de repuestos incluso el mismo fabricante no podría proporcionar una pieza de repuesto en un tiempo inmediato ya sea por sus características o por el tiempo en que fue fabricado, por lo que muchas veces se requiere exportar una nueva.

La soldadura aplicada a las fundiciones es un tema del cual se maneja poca información ya que los aceros son los predilectos para la utilización con fines tecnológicos, no obstante, esto no significa que los hierros fundidos no tengan cabida en el mundo de los materiales; por el contrario, la soldadura en este tipo de

aleaciones de hierro, se ve limitada por el alto porcentaje de carbono que presentan en su composición química, lo que les hace poco factibles de soldar.

Actualmente en el mundo industrial, el hierro fundido es uno de los metales más versátiles su simplicidad de elaboración pues posee un punto bajo de fusión y fluidez, su alto contenido de carbono es el que hace al hierro fundido tan diferente del acero. La fundición gris se utiliza ampliamente en la industria, en la fabricación de piezas vitales para el funcionamiento de multitudes de equipos, entre los que se encuentran bases de maquinaria, protectores de esmeril, carcasas de motores eléctricos, tapas de bombas de agua, tuberías, discos de frenos, monoblocks, árboles de levas, cigüeñales, rodillos, poleas y muchas otras piezas. El hierro gris es una aleación con muchas aplicaciones en la industria metal mecánica.

A pesar de existir diferentes clases de hierro fundido el más importante y utilizado es el hierro fundido gris; la soldabilidad y la recuperación de este tipo de fundiciones es muy deseable ya que estas son de uso común en la industria, ya sea en el campo de producción de recuperación industrial para garantizar piezas estéticas con características mecánicas específicas y medidas exactas.

En realidad, la soldadura es un proceso metalúrgico y entender cómo se comportan los metales durante su producción y fundición es conocer los fundamentos de soldadura.

Las metodologías de reparación y reconstrucción investigadas, se espera que sirvan de fundamento en la práctica diaria de los ingenieros que se dedican al mantenimiento de los diversos tipos de maquinaria y equipo que constituyen el

soporte de la industria nacional, incrementando el conocimiento científico- técnico de los mismos y de los trabajadores y operarios calificados que se dedican a la práctica de la soldadura en general, contribuyendo a la mejora de la eficiencia y productividad de las plantas del país.

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

Así mismo la investigación es de carácter experimental tecnológico, mediante el cual se busca proponer una metodología que colabore al mejoramiento de las técnicas de reparación y/o reconstrucción de piezas de fundición de hierro gris, por medio de soldadura al arco (SMAW), resaltando el efecto post-soldadura por medio de estudios de ensayo de dureza HRB en probetas representativas de los elementos implicados.

En tal razón el objetivo general del presente trabajo es evaluar los parámetros que permitan la reconstrucción de piezas de hierro fundido mediante soldadura SMAW, tomándose como espécimen de ensayo la reconstrucción y mantenimiento de un monoblock de motor de combustión, para lo que se tendrá que determinar primeramente que electrodos serán los adecuados, para que garanticen obtener buenas propiedades mecánicas en uniones soldadas de hierro fundido mediante el proceso SMAW y analizar cuál es la temperatura adecuada para realizar el precalentamiento en la soldadura SMAW del hierro fundido gris.

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Actualmente en el mundo industrial, el hierro fundido es uno de los metales más versátiles y debido a su simplicidad de elaboración posee un punto bajo de fusión y fluidez; lo cual hace que no sea tan común reconstruirlas a través del proceso de soldadura, ya que presentan baja soldabilidad debido a sus propiedades mecánicas que en ciertos casos son insustituibles por otros materiales, las piezas de hierro fundido gris como todo elemento mecánico expuesto a un trabajo continuo, tienden a sufrir desgastes, agrietamientos y fracturas que los pueden inhabilitar parcial o totalmente, por lo tanto hay que recurrir a procesos de reconstrucción, como la soldadura, que puede resultar más viable que realizar una nueva fundición por la complejidad de las piezas y el costo que representa fundir una sola pieza.

Sin embargo, a nivel de la Región de Puno existen muy pocos estudios respecto al tema de investigación propuesto pues la mayoría de sectores están dedicados a la fundición y no a la soldadura de elementos de hierro fundido; los que realizan lo hacen de manera artesanal sin ninguna fundamentación científica puesto que sus conocimientos son empíricos.

Si se considera algunas especificaciones con mucho cuidado y enmarcado en la normativa correspondiente será posible realizar uniones soldadas con el proceso SMAW, para esto se deberá seguir un procedimiento muy riguroso, a fin de no cambiar las propiedades mecánicas del material base.

Uno de los principales problemas en la soldadura es el comportamiento de los metales ante la combinación de agentes atmosféricos y cambios de temperatura bruscos que pueda tener en el momento de ser soldado en tanto es necesario determinar un método adecuado para la reconstrucción de piezas fabricadas con el tipo de materiales en cuestión, forma de aplicación del material de aporte y condiciones elementales durante la aplicación del proceso. Por lo expresado anteriormente, surge la pregunta de investigación: ¿Qué método de aplicación de soldadura al arco eléctrico con electrodo revestido sobre una fundición de hierro gris, es el adecuado para mantener las propiedades de comportamiento mecánico similares al material original, especialmente la resistencia a la dureza a que se somete?

1.2. HIPOTESIS

1.2.1. Hipótesis General

La selección adecuada de los parámetros de soldabilidad permitirá la reconstrucción de piezas de hierro fundido gris mediante soldadura SMAW.

1.2.2. Hipótesis Específicos

H1: Determinando los electrodos adecuados para soldar piezas de hierro fundido gris, se obtendrá buenas propiedades mecánicas de dureza.

H2: Aplicando la temperatura adecuada de precalentamiento para llevar a cabo el proceso de soldadura permitirá reconstruir piezas de hierro fundido gris.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. Objetivo General

Evaluar los parámetros que permitan la reconstrucción de piezas de hierro fundido gris mediante soldadura SMAW, tomándose como espécimen de ensayo la reconstrucción y mantenimiento de un monoblock de motor de combustión.

1.3.2. Objetivos Específicos

- a) Determinar que electrodos serán los adecuados, para que garanticen obtener buenas propiedades mecánicas en uniones soldadas de hierro fundido gris mediante el proceso SMAW.
- b) Analizar cuál es la temperatura adecuada para realizar el precalentamiento en la soldadura SMAW del hierro fundido gris.

CAPITULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. REFERENCIAS TEORICAS

2.1.1. Aleaciones Hierro – Carbono

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

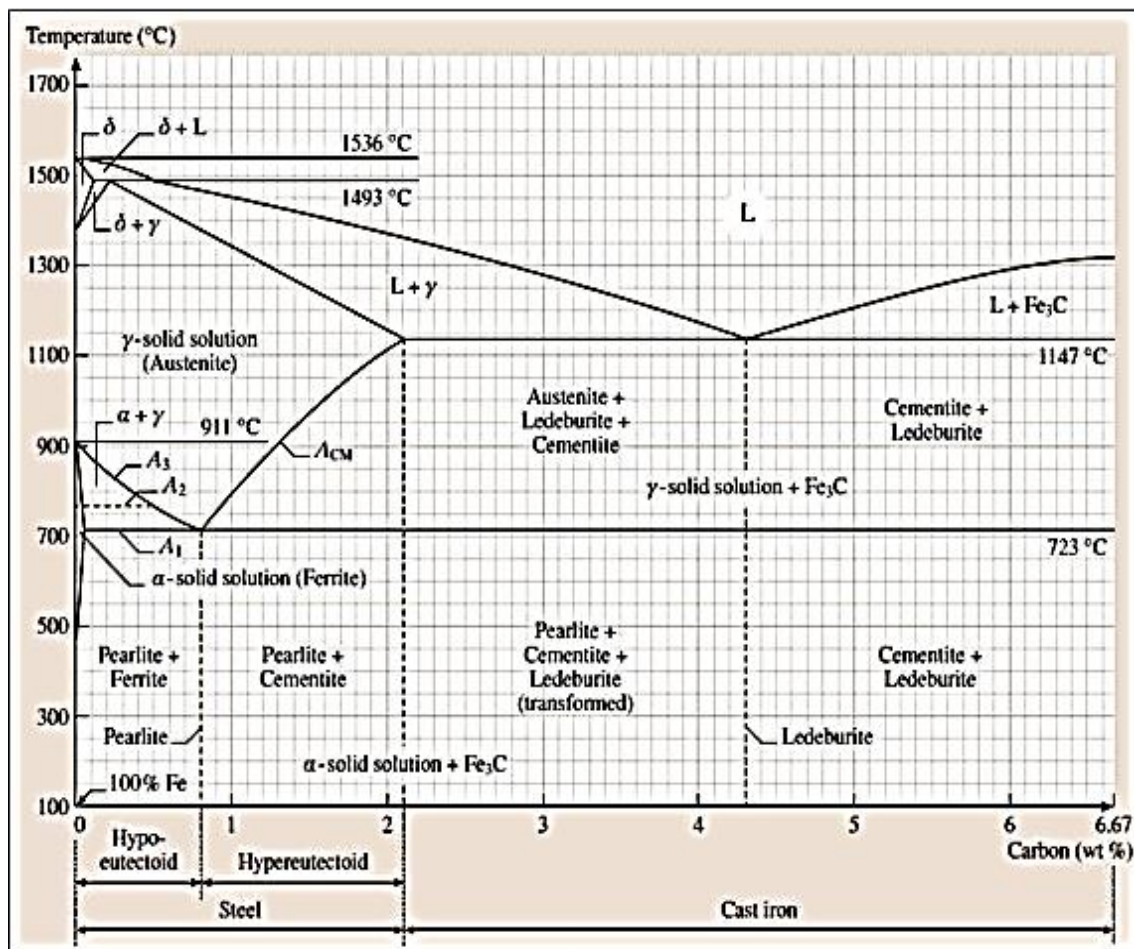


Figura N° 1: Diagrama Fe-Fe₃C (6.67 %C) meta estable

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

2.1.2. Fundiciones

Los hierros fundidos son aleaciones de hierro, carbono y silicio, en las que generalmente también están presentes otros elementos como el fósforo, azufre, manganeso, etc. Su contenido de carbono es normalmente superior al 2%, estando comprendido entre 2.5 y 4.5%. Se caracterizan por obtener su forma definitiva directamente por colada, no pudiéndose someter estas aleaciones a procesos de deformación plástica en frío ni caliente. No son dúctiles ni maleables y además tampoco son forjables ni laminables.

2.1.2.1 Clasificación de las fundiciones

Se puede clasificar las fundiciones desde dos puntos de vista. El primero es de acuerdo a su fractura y el segundo de acuerdo a su microestructura.

Según el aspecto de la fractura se pueden clasificar a las fundiciones en: Fundición gris (gris oscuro), fundición blanca (blanco brillante) y fundición atruchada (grisáceo) y de acuerdo a su microestructura se clasifican por la presencia de varias formas de grafito en una matriz que depende de la severidad del enfriamiento (ver figura 2).

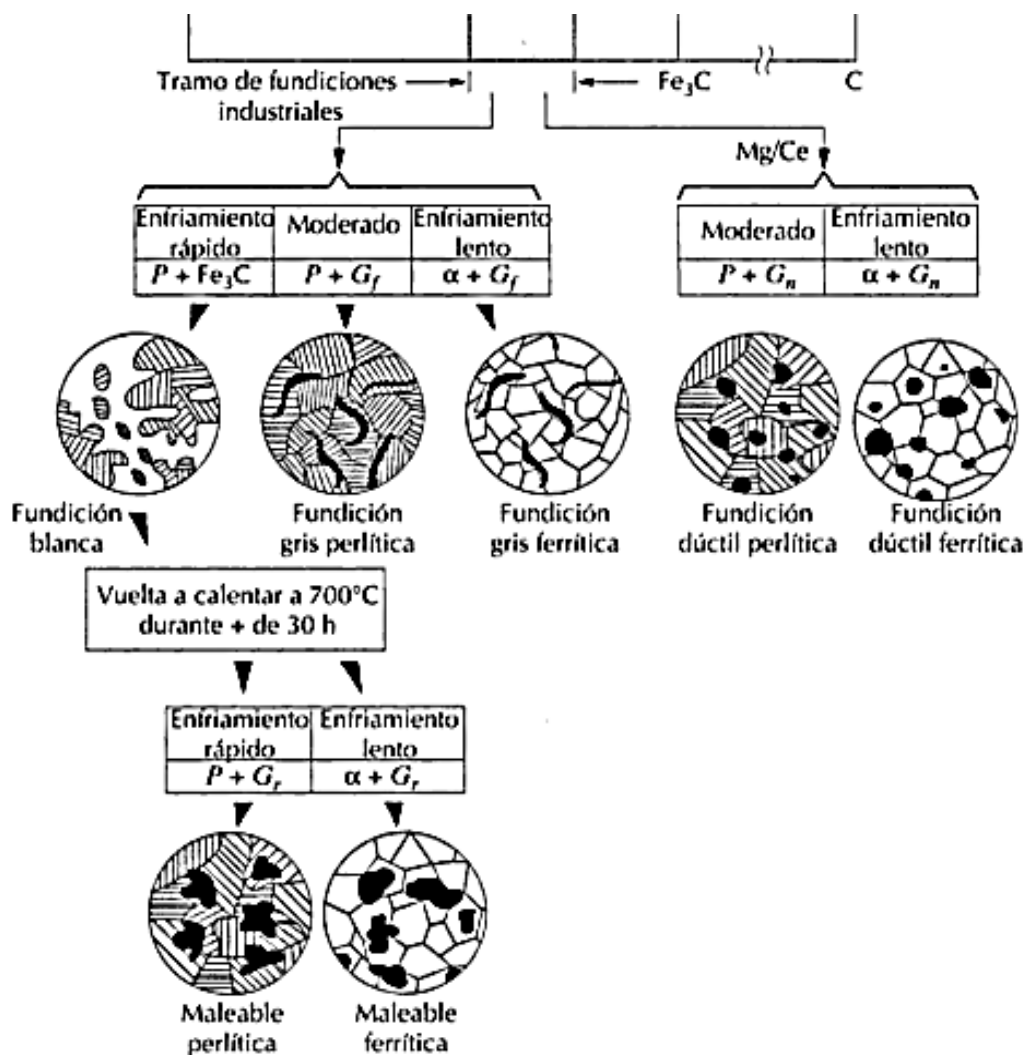


Figura N° 2: Tipos de fundiciones comerciales

Fuente: (Callister, 2007)

Hay que tener en cuenta que la velocidad de enfriamiento tiene gran influencia sobre la formación de una u otra fundición. Con enfriamiento lento se ve favorecida la formación de fundición gris con escamas de grafito en matriz perlítica o ferrítica; mientras que con enfriamiento muy rápido se produce fundición blanca con una matriz de perlita y cementita. Así también si a las fundiciones grises en estado líquido, se agregan elementos de aleación como el magnesio y/o cerio se produce una forma de grafito esferoidal y con un enfriamiento moderado se

tendrá una matriz perlítica, mientras que con enfriamiento lento la matriz será ferrítica. Y por último es posible obtener fundición maleable a partir de fundición blanca, calentándola durante tiempos prolongados a elevadas temperaturas (800 y 900°C), haciendo que la cementita (Fe_3C) se descomponga en grafito en forma de rosetas y la matriz generada puede ser perlítica o ferrítica dependiendo de la severidad del enfriamiento. (Callister, 2007)

2.1.2.2 Características de los Hierro Fundidos

La ductilidad de los hierros fundidos es muy baja comparada con la de los aceros con menor contenido de carbono y no puede laminarse, estirarse o trabajarse en frío o en caliente; llamados fundiciones, las cuales son ampliamente utilizadas en la industria para propósitos generales. Según Kiser (2005), contienen aproximadamente entre 2.0 a 4.5% de carbono, silicio de 1 a 3% y manganeso.

Pueden contener o añadirseles otros elementos para proporcionar propiedades deseadas tales como resistencia, dureza, templabilidad, o resistencia a la corrosión para aplicaciones específicas, los elementos comunes para dicho fin son el cromo, cobre, molibdeno y níquel.

2.1.2.3 Características de las fundiciones

Las fundiciones grises se utilizan para fabricar elementos de grandes dimensiones, debido a su fluidez. La mayor parte del contenido de carbono en el hierro gris se encuentra en forma de escamas o láminas de grafito, las cuales dan al hierro su color y propiedades deseables. La presencia de perlita y la

discontinuidad estructural producida por las hojuelas de grafito explica las propiedades características de esta clase de fundiciones:

Altos valores de resistencia a los esfuerzos de compresión y baja resistencia al esfuerzo de tensión, ductilidad muy baja lo cual hace muy quebradizo, buena maquinabilidad y excelente capacidad de amortiguamiento. Sin embargo, hay que hacer mención que las propiedades y la estructura dependen de la composición química y las características de solidificación y enfriamiento de la pieza.

2.1.2.4 Resistencia y dureza de la Fundición Gris

Esta fundición se utiliza en gran escala en aplicaciones como bases o pedestales para máquinas, herramientas, bastidores para maquinaria pesada, bloques de cilindros para motores de vehículos, discos de frenos y herramientas agrícolas. Sus propiedades se muestran en la tabla 1.

Tabla 1: Clasificación de las fundiciones grises según la norma ASTM A 48-41

CLASE	RESISTENCIA A LA TENSION (PSI)	DUREZA BRINELL	ESTRUCTURA
20	24,000	130-180	FERRITA, PERLITA
30	34,000	170-210	FERRITA, PERLITA Y GRAFITO
40	44,000	210-260	PERLITA, GRAFITO
50	54,000	240-280	PERLITA, GRAFITO
60	64,000	260-300	BAINITA, GRAFITO

La descripción de las propiedades mencionadas en la tabla anterior se basa, según la clasificación de la norma ASTM A 48; la fundición gris contiene generalmente entre 2.5 – 4.0 % de carbono; 2.4 a 2.5 % de silicio; 0.4 – 1.0 % de magnesio; 0.05 – 1.0 % de fósforo y 0.06 a 0.15 % de azufre.

2.1.3. Dureza

La dureza es “Una medida de la resistencia de un material a la deformación plástica localizada (por ejemplo, una pequeña abolladura o rayadura). Los primeros ensayos de dureza se basaban en el comportamiento de los minerales junto con una escala construida según la capacidad de un material para rayar a otro más blando. Un método cualitativo de ordenar de forma arbitraria la dureza es ampliamente conocido y se denomina escala de Mohs, la cual va desde 1 en el extremo blando para el talco hasta 10 para el diamante. A lo largo de los años se han ido desarrollando técnicas cuantitativas de dureza que se basan en un pequeño penetrador que es forzado sobre una superficie del material a ensayar en condiciones controladas de carga y velocidad de aplicación de la carga.

El penetrador tiene diferentes formas y de acuerdo a esta es la huella que queda impresa en el material. De acuerdo a la geometría de la huella y a la carga. Se utilizan diferentes fórmulas para determinar el valor de la dureza. Actualmente hay aparatos que leen la dureza de una forma digital. Es así como (Aguilar, 2012) puede establecerse la dureza Brinell, Vickers, Knoop, y Rockwell (Askeland, 1998)

Tabla 2: Técnicas de ensayo de dureza

Forma del Penetrador					
Ensayo	Penetrador	Vista lateral	Vista Superior	Carga	Fórmula para el número de dureza ^a
Brinell	Esfera de 10 mm de acero o de carburo de tungsteno			P	$HB = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$
<u>Microdureza</u> Vickers	Pirámide de diamante			P	$HV = 1,8544 * \frac{P}{d^2}$
<u>Microdureza</u> Knoop	Pirámide de diamante			P	$HK = 14,2 \frac{P}{l^2}$
Rockwell y Rockwell superficial	<ul style="list-style-type: none"> Cono de diamante Esferas de acero de 1/16, 1/8, 1/4, 1/2 pulgadas de diámetro 			<ul style="list-style-type: none"> Rockwell: 60 kg, 100 kg, 150 kg Rockwell superficial: 15 kg, 30 kg, 45 kg 	

2.1.3.1 Dureza Brinell

El indentador es una bola de carburo de tungsteno o de acero endurecido. Este indentador se presiona sobre la superficie del material a medir durante un tiempo standard bajo una carga standard. Después de remover la carga, la indentación circular se mide en dos direcciones mutuamente perpendiculares, sacando el promedio de las dos medidas. La dureza Brinell se calcula por.

Se fuerza un indentador de un diámetro adecuado a la dureza del material contra la probeta, con una fuerza adecuada para la dureza del material.

El tiempo de aplicación de la fuerza varía entre 10-30 s.

El diámetro del penetrador de acero endurecido (o bien de carburo de tungsteno) es de 10.00 mm (0.394pulg).

Las cargas normalizadas están comprendidas entre 500 y 3000 kg en incrementos de 500 kg; durante un ensayo, la carga se mantiene constante durante un tiempo especificado (entre 10 y 30 s).

Dependiendo de la aleación examinada; después se quita la carga y se mide el diámetro de la impresión en la probeta con un microscopio o lente especial.

Para materiales duros, es poco exacta pero fácil de aplicar. Poco precisa con chapas de menos de 6 mm de espesor. El valor así obtenido, se aplica a la fórmula Brinell. El número de dureza Brinell se define como la fuerza aplicada dividida por la superficie de contacto entre el indentador y la probeta después de haberse retirado el indentador (Askeland, 1998).

$$HB = \frac{2P}{\pi D [D - \sqrt{D^2 - d^2}]}$$

Dónde:

P : Carga.

D : Diámetro de la bola.

d : Promedio del diámetro de la indentación.

Si el material es suave y el indentador es duro, es posible que el valor d llegue a ser igual al valor de D. En este caso, este valor no sería certero.

Para serlo debe cumplirse que $d = 0.25D$ o $d = 0.5D$.

Por esta razón se debe regular la carga aplicada para cada material.

Para aceros, $P / D^2 = 30$

Para aleaciones de Cobre, $P / D^2 = 10$

Limitaciones.

a) La impresión es grande (2 – 4 mm de diámetro) y esto puede convertirse en un generador de esfuerzos en un componente. Además, desmejora la apariencia y esto puede ser inaceptable en algunas aplicaciones.

b) La profundidad de la impresión impide su uso en láminas o superficies endurecidas ya que la impresión podría también involucrar la estructura subyacente

c) Materiales muy duros deformaran el indentador de aquí que la prueba Brinell se limite para materiales con dureza no superior a 450 HBN para una bola de acero y a 600 HBN para bolas de carburo de tungsteno.

2.1.3.2 Dureza Rockwell

“El ensayo de dureza Rockwell utiliza una pequeña bola de acero para materiales blandos y un cono de diamante para materiales más duros. La profundidad de la penetración es medida automáticamente por el instrumento y se convierte a índice de dureza Rockwell (HR). Se utilizan diversas variantes del ensayo Rockwell, incluyendo las descritas en la tabla 3. La escala Rockwell C (HRC) se utiliza para aceros duros, en tanto que para medir la dureza del aluminio se selecciona la escala Rockwell F (HRF)”.

Tabla 3: Comparación de ensayos de dureza típicos

ENSAYO	PENETRADOR	CARGA	APLICACION
Brinell	Bola de 10 mm	3000 kg	Hierro y acero fundidos
Brinell	Bola de 10 mm	500 kg	Aleaciones no ferrosas
Rockwell A	Cono de diamante	60 kg	Materiales muy duros
Rockwell B	Bola de 1/16 plg	100 kg	Latón, acero de baja resistencia
Rockwell C	Cono de diamante	150 kg	Acero de alta resistencia
Rockwell D	Cono de diamante	100 kg	Acero de alta resistencia
Rockwell E	Bola de 1/8 plg	100 kg	Materiales muy suaves
Rockwell F	Bola de 1/16 plg	60 kg	Aluminio, materiales suaves
<u>Vickers</u>	Pirámide de diamante	10 kg	Materiales duros
<u>Knoop</u>	Pirámide de diamante	500 kg	Todo los materiales

Los ensayos Vickers (HV) y Knoop (HK) son pruebas de micro dureza, producen penetraciones tan pequeñas que se requiere de un microscopio para obtener su medición (Askeland, 1998).

2.1.3.3 Composición Química de la Fundición Gris

La descripción de las propiedades mencionadas en los siguientes párrafos se basa, según la clasificación de la norma ASTM A 48; la fundición gris contiene generalmente 2.5-4.0% de carbono; 1.4 a 2.5% de silicio; 0.4-1,0% de manganeso; 0.05-1.0% de fósforo y 0.06 a 0.15% de azufre.

2.1.3.4 Propiedades de la Fundición Gris

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

- **Nombre de la Pieza:** Monoblock - Metal Base, recuperar el material para el uso adecuado del monoblock mediante un proceso de soldadura (SMAW)
Resistencia a la tracción (Los esfuerzos de tracción que sufre el monoblock lo podemos observar en la culata durante la combustión y alojar a las camisas de cilindro por donde se deslizan los pistones.
- **Aspecto:** La superficie de la fundición es gris oscuro, mientras en la fractura es de color gris claro con asperezas, de allí su nombre característico. Es un material resistente a la corrosión, por lo tanto el proceso de oxidación se produce en forma lenta, cubriéndose la superficie

de herrumbre color rojo pardo y penetrando lentamente al interior de la estructura.

- **Dureza:** La dureza de la fundición gris es relativamente elevada, la cual varía en promedio entre 130 a 300 Brinell. Es de fácil maquinabilidad, debido a la disposición de las hojas de grafito, las cuales le brindan dureza, pero a la vez maquinabilidad por el lubricante sólido (grafito) en las virutas que se forman durante el corte del mismo.
- **Resistencia química:** Debido a su alta resistencia a los ácidos, oxidación y temperatura es ideal para la fabricación de elementos de máquina, instalaciones químicas y térmicas.
- **Resistencia a la tracción:** En la figura 3, se representan las curvas que muestran en escala las fundiciones, realizando la comparación entre tracción y la clase de las mismas, según la norma ASTM 48. Esta propiedad aumenta según disminuye el porcentaje de contenido de carbono y silicio en su estructura.

Esto se verifica al combinar los valores de la figura 3 con la tabla 4.

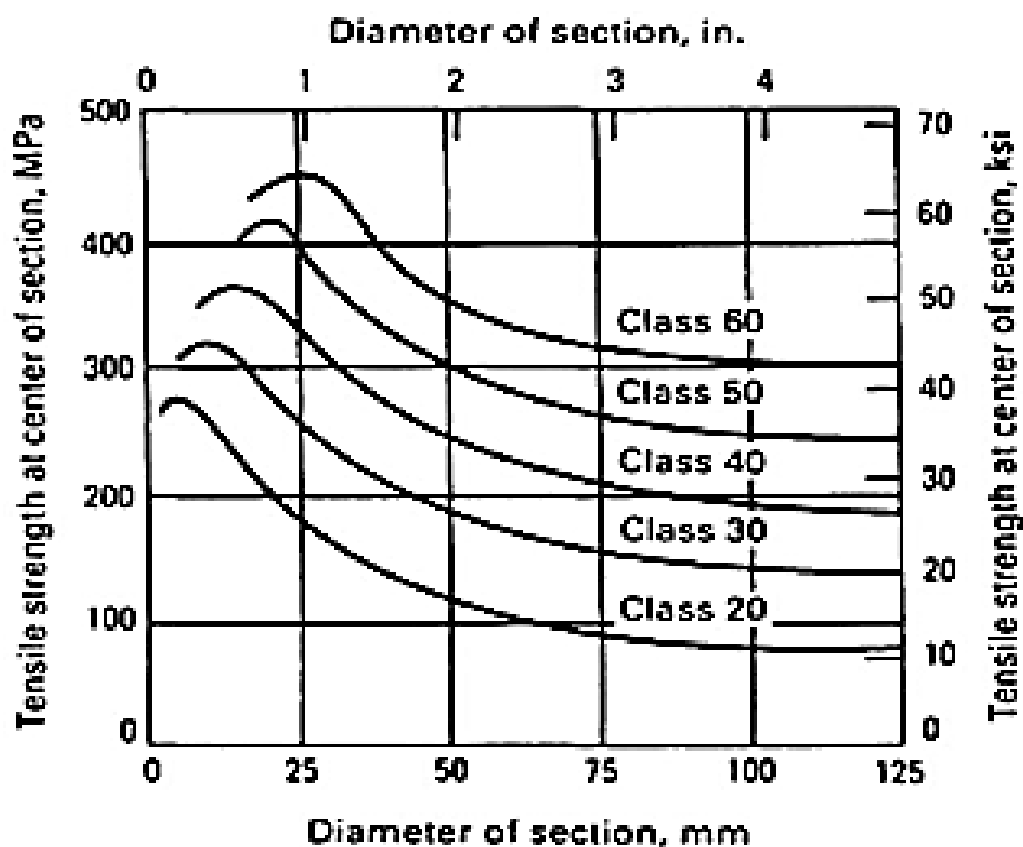


Figura N° 3: Diámetro vs. Resistencia a la tracción de grados de fundición gris

Los grados de fundición gris se clasifican según el contenido de carbono y silicio que estos posean en su estructura, según se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4: Clasificación de grados de fundición gris

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

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

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

2.1.3.5 Tipos de la Fundición Gris

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

- a) Fundición gris perlítica: La fundición gris perlítica, como su nombre lo dice, se caracteriza por contener una estructura perlítica, conteniendo un promedio de 0.8% de carbono, más incrustaciones de grafito en forma de vetas pequeñas.
- b) Fundición gris ferrítica: La fundición gris tiene una matriz de ferrita y el resto de la fundición gris se encuentra distribuido en forma de grafito.
- c) Fundición gris ferrito-perlítica: La fundición gris se encuentra en medio de los dos tipos citados de estructura; cuenta con parte de perlita, parte de ferrita y el carbono se encuentra como inclusiones de grafito.

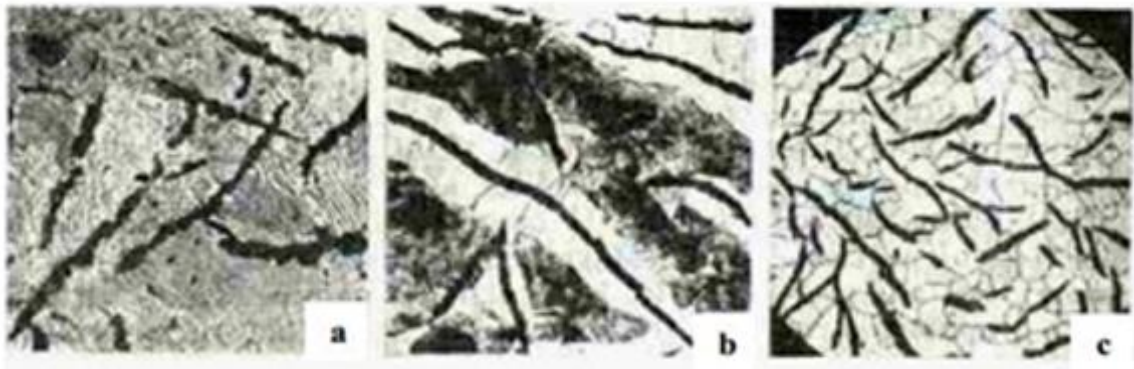


Figura N° 4: Tipos de fundición gris a) Fundición gris perlítica tomada a 200X b) Fundición ferrítico-perlítica a 100X c) fundición ferrítica a 100X

Fuente: (Bravo, 2005)

2.1.3.6 Soldabilidad de la Fundición Gris

En las fundiciones, la soldadura es metalúrgicamente más compleja que en los aceros. Durante la solidificación se pueden producir variaciones locales tanto de la composición química cuanto microestructural.

El concepto de soldabilidad, en general fue discutido por (Celada E & Aguilar R., 2013), siendo los fundamentos básicos expuestos en la publicación válidos en el caso del hierro fundido. Indican que “La soldabilidad de los metales no es más que la capacidad de los mismos de facilitar su unión o la reconstrucción de partes dañadas, por el proceso de soldadura, obteniéndose juntas sanas y totalmente homogéneas.

La soldabilidad de un material está regida por las características químicas y metalúrgicas del material base y el material de aporte, así como de la aplicación de los procesos termodinámicos adecuados para su realización”. Debe agregarse el concepto de la fluidez del metal de aporte y los parámetros que la gobiernan (Aguilar R. , 2011)

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

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

El tipo de carbono presente y su forma determinará el tipo y las propiedades del hierro fundido.

Las propiedades son de suma importancia cuando se considera el procedimiento de soldadura a ser utilizado.

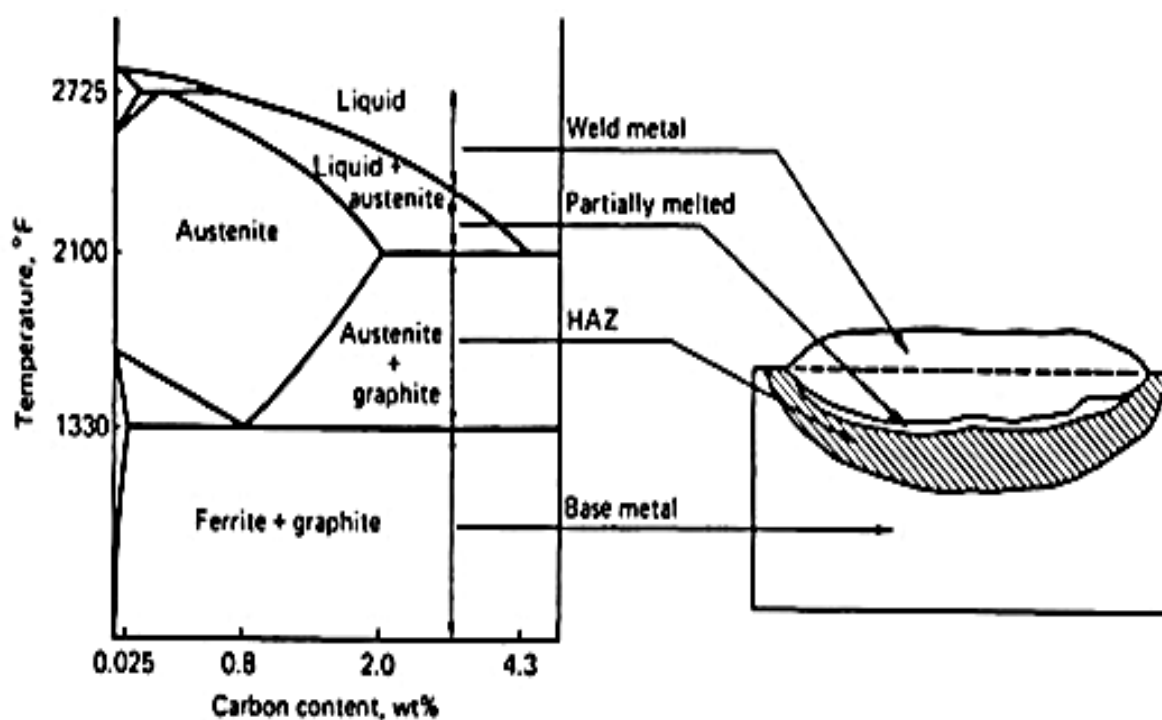


Figura N° 5: Esquema de temperaturas y zonas en fundición gris típica

Fuente: (ASM, Internacional, 2005)

2.1.3.7 Electrodo para proceso SMAW

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

Las especificaciones AWS 5.15 reconocen cuatro tipos de electrodos para la soldadura de hieros fundidos, según la Tabla 5.

Tabla 5: Electrodo para soldadura de hierros fundidos

TIPO	C %	Mn %	Si %	Fe %	Ni %	Cu %	Otros
<u>ENi-CI</u>	2.00 max	2.5 max	4.00	8.00 max	85.00 min	2.5 max	1.00 max
<u>ENiFe-CI</u>	2.00 max	2.5 max	4.00	9.5/45 max	45/60 min	2.5 max	1.00 max
<u>ENiCu-A</u>	0.35/0.55ma	2.55	0.75	3.0/6.0 max	50/60 min	35/45	1.00 max
<u>ENiCu-B</u>	0.35/0.55	2.55	0.75	3.0/6.0 max	60/7 min	25/35	1.00 max

Fuente: (Oxgasa, 2003)

Según AWS (2006), los electrodos recomendados para efectuar soldaduras en fundiciones de hierro en general, (fundición gris, fundición maleable, fundición dúctil) son los electrodos de níquel ENi-CI, (Kobe, 2011) este variará dependiendo de los niveles de dureza del elemento, tipo de elemento y función que éste desempeñe, ya que variará según el porcentaje de níquel y otros elementos agregados para cada caso en específico.

A continuación, se muestra en la figura 6, las diferentes durezas producidas por la utilización de diferentes tipos de electrodos aplicados en fundiciones, en la cual se visualiza que el material que muestra menores rangos de dureza posterior al proceso de soldadura en una fundición es el electrodo de níquel.

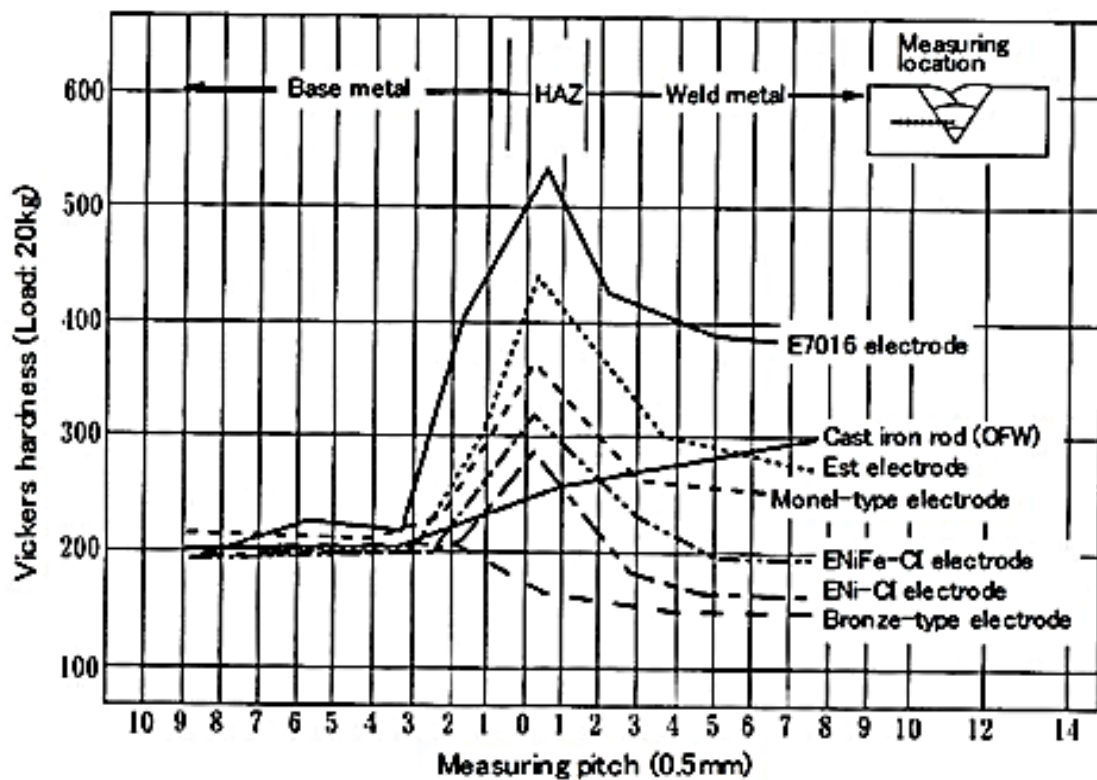


Figura N° 6: Dureza de materiales de aporte en soldadura de fundiciones

Fuente: (Kobe, 2011)

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

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

2.1.3.8 Temperaturas para el proceso de soldeo

Como se hizo referencia en incisos anteriores, la temperatura pre, durante y post soldadura es de vital importancia para un acabado, el cual cumpla con los requisitos mínimos de soldadura en una fundición, ya que es un factor del cual depende el comportamiento del material finalizado el proceso.

a) Temperatura de precalentamiento

Para determinar de una forma más certera la temperatura de precalentamiento, se debe tener principalmente el conocimiento de las características específicas del material, es necesario obtener el valor del carbono equivalente para determinar los niveles de temperatura y así evitar la aparición de fisuras en la soldadura por choques térmicos ocurridos en el proceso.

El carbono equivalente se determina, según la composición química del material base, y se obtiene generalmente por la aplicación de la siguiente fórmula (1), según el (ASM, Internacional, 2005).

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

CE : Carbono equivalente

Cr : Cromo

C : Carbono

Cu : Cobre

P : Fosforo

Mo : Molibdeno

Mn : Manganeso

Ni : Níquel

A continuación, se muestra en la figura 7 algunas fundiciones clasificadas por grados, la cual puede utilizarse como referencia al tener el conocimiento exacto del grado de fundición gris con la que se pretende trabajar.

Se pueden visualizar las temperaturas de precalentamiento para evitar fisuras en el material por medio del conocimiento del carbono equivalente:

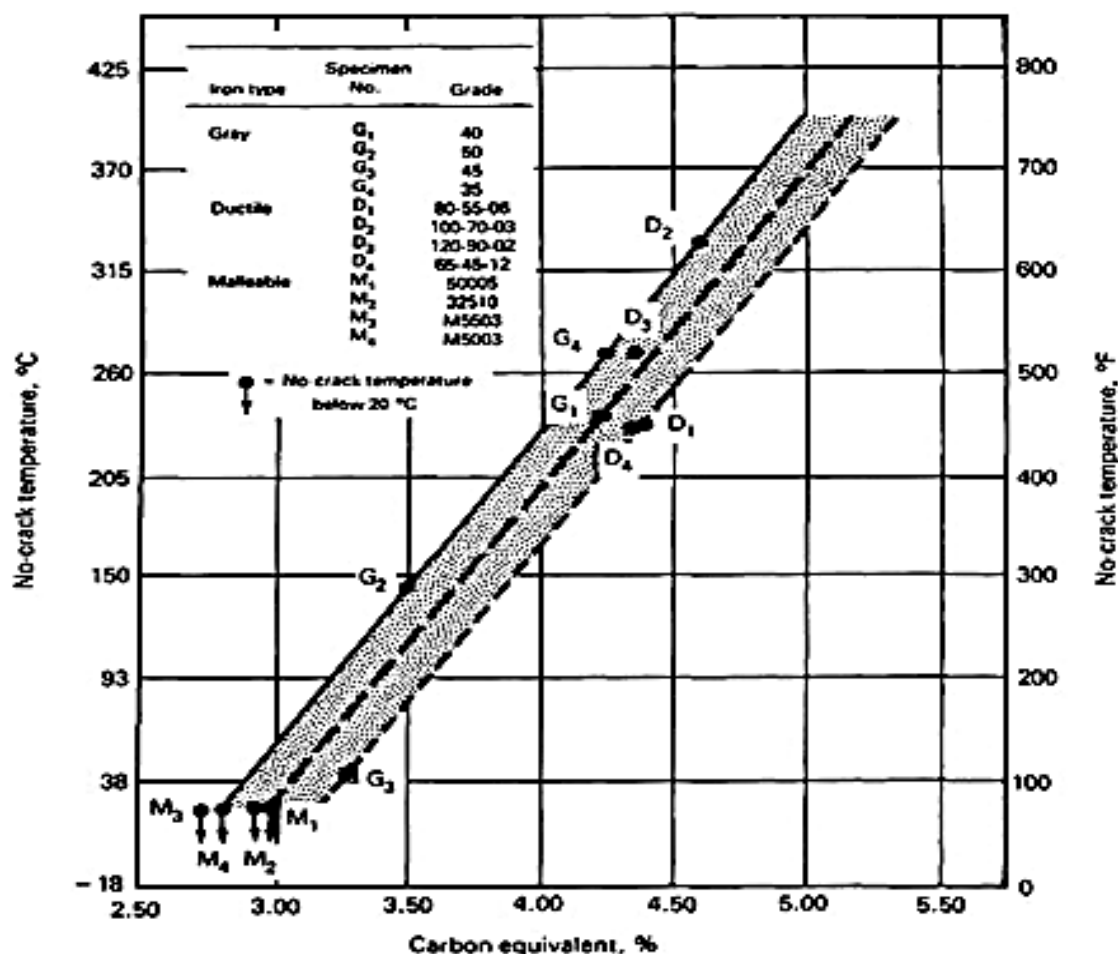


Figura N° 7: Efecto del carbono equivalente en temperatura de no fractura para grados distintos de fundiciones

Fuente: (ASM, Internacional, 2005).

En la figura 7 puede observarse que la mayor parte de fundiciones grises y fundiciones dúctiles evaluadas, que poseen un mayor contenido de carbono, se concentran en un rango de temperaturas entre los 230 °C y 330 °C aproximadamente, confirmando la necesidad del aumento de la temperatura en los procesos de soldadura.

Según la (ASM, Internacional, 2005), el precalentamiento a temperaturas superiores a 315 °C (600 °F) disminuye la velocidad de enfriamiento hasta el punto de que la formación de martensita se minimiza, reduciendo la tendencia del hierro fundido a agrietarse.

El enfriamiento lento también ayuda a minimizar las tensiones residuales.

El precalentamiento debe aplicarse de manera que la junta de soldadura esté en compresión, no en tensión; puede requerir precalentamiento de toda la estructura y la zona a soldar debe ser llevada a una temperatura aún mayor si es necesario, luego de la soldadura, toda la pieza debe enfriarse lenta y gradualmente.

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

2.1.3.9 Tratamiento térmico Post – Soldadura

“El nivel de estrés definitivo de una pieza de fundición soldada se ve afectada por la velocidad a la que la pieza fundida se enfría después de la soldadura” (Aguilar R. , 2012)

Las piezas deben dejarse enfriar lentamente para minimizar las tensiones residuales. Para regular la velocidad de enfriamiento de la pieza, pueden tomarse en consideración distintos métodos como los que se numeran a continuación:

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

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

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

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

2.2. ANTECEDENTES

(Asta, 2006) Analiza la soldabilidad con relación a la temperatura de precalentamiento de un acero de alta resistencia templado y revenido utilizado en aplicaciones estructurales. La soldadura se realiza mediante proceso FCAW automatizado utilizando un electrodo básico de bajo hidrógeno E110T-5-K4, con protección gaseosa, sobre un acero ASTM A514 Gr B de 25mm de espesor, del análisis surge cual es la temperatura más adecuada, bajo las condiciones planteadas, que permite realizar soldaduras de este acero con un bajo riesgo a la aparición de fisuras.”

Finalmente, la realización de los procedimientos de soldadura se basa en recomendaciones dadas por los códigos de fabricación, los cuales están bien desarrollados para aceros aleados con procesos de soldadura manual.

(Marulanda, 2007) manifiesta que en casi todas las industrias hay desgaste de piezas y maquinaria, por lo cual se requiere de minimizar este desgaste y recuperar estas piezas y que para hacer una buena selección del tipo de revestimiento protector y su aplicación, se necesita conocer los tipos de desgaste a los que puede estar sometido la pieza que se quiere proteger, además precisa que la soldabilidad de las fundiciones toma en cuenta la soldabilidad operativa, la soldabilidad estructural y la soldabilidad metalúrgica, siendo esta última la más importante y de mayor interés y que tiene lugar principalmente por pequeñas variaciones de composición química y cambio de las condiciones en determinadas zonas de la soldadura y como consecuencia se tienen cambios en las propiedades mecánicas y metalúrgicas del material base.

(Ramírez, M. & Enrique, Heriberto., 2009), Indican que al soldar hierro fundido la ductilidad de la soldadura es crítica por la fragilidad del hierro fundido en sí. El hierro fundido esencialmente no tiene ductilidad. Su fuerza de tracción puede ser tan baja como 1.406kg/cm² por eso es importante estar atentos a la formación de grietas originadas por la expansión y contracción durante el proceso de soldadura.

La soldadura con éxito del hierro fundido depende de las habilidades del operador. No se debe soldar el hierro fundido tan rápido como el hierro dulce, la soldadura terminada tiene que ser enfriada lentamente.

Es importante al soldar hierro fundido mantener la profundidad de la fusión o penetración al mínimo para evitar la transformación del metal en una estructura no deseada. El hierro fundido se puede soldar, utilizando el método de oxiacetilénico o el método de arco metálico protegido.

(Pouranvari, 2010) en la revista *Materials and Desing* sobre la soldabilidad de la fundición gris usando metal de aporte en base níquel, revela que existen serios problemas en la zona fundida (ZF), en la zona parcialmente fundida (ZPF) y en la zona afectada por el calor (ZAT) por la formación de productos duros y frágiles durante la solidificación, que pueden ser reducidos si se controla la velocidad de enfriamiento y la cantidad de calor aportada es baja, sin embargo para reducir aún más dichas microestructuras es recomendable hacer las soldaduras con precalentamiento previo o un tratamiento térmico post soldadura con el fin de descomponerlas y formar micro constituyentes más blandos, así como producir un alivio de tensiones internas residuales.

(Torres, 2010) manifiesta que en la soldadura de hierro fundido por experimentar temperaturas superiores a la de austenización, parte del carbono que se encuentra en forma de grafito se desprende en mayor cantidad mientras más cercano al baño de soldadura, esta migración de carbono se ve favorecida por el sobrecalentamiento que incrementa el coeficiente de difusión de los átomos de carbono a partir del grafito hacia los granos de austenita, que dependiendo del enfriamiento y si es rápido, reacciona con el hierro formando carburos y cementita (Fe_3C).

(Luna Tejada, 2015) En su trabajo evaluó la especificación de procedimiento de soldadura para la unión disímil entre una brida y una tubería de materiales API 5L X70 PSL1 y ASTM A707 L5 F65 (no homologado por ASME) respectivamente, ambas de 24 pulgadas de diámetro y 21.5 milímetros de espesor. Los procesos de soldadura empleados fueron GTAW y SMAW, el primero para el pase de raíz y el segundo para los pases de relleno. El objetivo general de la tesis es el de calificar el procedimiento de soldadura para la unión entre la brida y la tubería antes mencionadas, con la finalidad de asegurar su implementación en el sistema de transporte de gas natural por ductos. Sobre la base de los resultados obtenidos se concluyó que, según lo estipulado en el código ASME sección IX, el procedimiento de soldadura propuesto se encuentra calificado y, por consiguiente, la ejecución del cordón de soldadura entre la brida y la tubería mencionadas debe realizarse en función de dicho procedimiento.

(Ceredo Hernandez, E. & Olguin Montoya, J., 2016), en su tesis indican que el hierro gris es quizás el más común de los hierros colados y muchas piezas

industriales están fabricadas de este material. En el caso de fractura de una pieza colada de fundición, la fabricación de una pieza nueva puede ser un costo muy alto, ya que muchas piezas fundidas no son producidas en masa y esto provoca el paro total de una línea de producción, en ocasiones por días o hasta semanas mientras se obtienen la pieza nueva, por lo cual una buena opción es la reparación con soldadura. Sin embargo, el proceso de reparación puede ser difícil e inclusive conducir a una nueva fractura de la pieza, debido a la baja soldabilidad de la fundición, por lo cual es necesario contar con un procedimiento de soldadura de reparación detallado, de aplicación inmediata y probado experimentalmente.

CAPITULO III

MATERIALES Y METODOS

3.1. ENFOQUE

La ejecución de la investigación tiene un enfoque crítico positivo, ya que esta se orienta al análisis de evaluar los parámetros que permitan la reconstrucción de piezas de hierro fundido gris mediante soldadura SMAW, temperaturas de precalentamiento de la junta a soldar y tomando también en cuenta que se analizara las propiedades mecánicas de la junta soldada de la fundición gris clase ASTM A-48-03 con electrodo AWS E Ni-CI.

En cuanto a los indicadores se utilizaron tablas, graficas de barras, dispersión entre otros para detallar los resultados obtenidos en el estudio realizado.

3.2. MODALIDAD Y TIPO DE INVESTIGACIÓN

El proyecto de investigación resulta factible ya que se podrá demostrar la hipótesis, al realizar una investigación bibliográfica y experimental.

3.2.1. Investigación Bibliográfica

Esta nos ayuda en gran manera ya que el estudiante que se encuentra realizando el estudio puede apoyarse en fuentes como: libros, revistas técnicas, normas, etc., y así lograr una correcta recolección de información para abordar de una buena manera técnica y científica la investigación a realizar.

3.2.2. Investigación Experimental

La presente investigación es de tipo experimental ya que se realizaron probetas para el ensayo a realizarse como la dureza Rockwell, los mismos que se realizaron en la empresa JMC soluciones de la ciudad de Arequipa.

3.3. NIVEL Y TIPOS DE INVESTIGACIÓN

La presente investigación tiene los siguientes tipos: Exploratorio, Descriptivo, Predictivo y Explicativo.

3.3.1. Exploratorio

Este tipo de investigación se realizó debido a que el tema no ha sido estudiado antes, o ha sido muy poco estudiado.

La investigación es exploratoria con el fin de estudiar con más énfasis la evaluación de los parámetros que permitan la reconstrucción de piezas de hierro fundido mediante soldadura SMAW, temperaturas de precalentamiento en la junta de soldadura de hierro gris con electrodo AWS ENi- CI, la misma que no ha sido estudiada en detalle en nuestra Región de Puno.

3.3.2. Descriptivo

El estudio se basó en la modalidad de investigación descriptiva, ya que su fin es la descripción de fenómenos que se pueden dar al realizar un precalentamiento en la junta de soldadura, en este caso las propiedades mecánicas de la junta soldada de hierro gris con electrodo ENi – Cl.

3.3.3. Correlacional

Tiene como propósito medir la relación que existe en las variables tanto independiente como dependiente en el tema de estudio que es de gran importancia, para poder indicar el grado de dependencia de los distintos parámetros en la investigación.

3.3.4. Explicativo

Se explicarán detalladamente todos los resultados obtenidos en el estudio para conocer los aspectos que intervienen en el mismo.

3.4. POBLACIÓN Y MUESTRA

Con la determinación del tamaño adecuado de muestra se pudo conocer la proporción de la población que tiene las características de este estudio, a partir de un solo grupo de ellas. Los datos estadísticos sirven para conocer los parámetros de población, es por eso, se habla de conocer el tamaño de muestra necesaria, puesto que no se debe actuar con ligereza, si tomamos una muestra muy grande de lo necesario es un desperdicio de recursos, y una muestra muy pequeña a menudo nos lleva a tener resultados sin uso práctico, nada confiables, (Herrera, Medina, Naranjo, 2004, p. 98)

El universo sobre el cual trata la investigación está constituido por el volumen de producción mundial de hierro, para esta investigación la producción de hierro gris, dicha producción es indeterminada por lo que resulta muy necesaria la determinación de un tamaño adecuado de muestra la misma que se determinó por la siguiente ecuación.

$$n = \frac{Z\alpha^2 \cdot p_0 \cdot q_0}{d^2}$$

Con esta ecuación se determinó el tamaño de muestra adecuado para esta investigación partiendo de tres factores de gran importancia.

Se consideró un número de 8 muestras es decir se trabajó con ocho temperaturas y ocho especímenes para el ensayo de la presente investigación, con el fin de obtener una respuesta adecuada y en un tiempo prudencial, según las siguientes normas.

Tipo de Junta: Junta en V de 70°.

Tipo de ensayo y Norma utilizada: Dureza Norma ASTM E 10 – 01.

Número de probetas: 1

Temperatura (°C): 21, 100, 200, 370, 400, 500 y 600.

Material base: Dureza Norma ASTM E 10 – 01 sin precalentamiento

3.5. RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN

La información de temperatura de precalentamiento, así como los distintos ensayos a realizar se recolecto de la probeta de hierro fundido gris soldadas con electrodo ENi- Cl.

De ser necesario se repetirá el proceso de recolección de la información y así asegurar su veracidad.

3.6. PROCESAMIENTO Y ANALISIS

- Los datos fueron recogidos y analizados de una manera crítica debido a que muchos podrían no ser los correctos, razón por la cual tienen que ser separados.
- Se utilizó varias fuentes para verificar la veracidad de la recolección de datos ya que estos tienen una gran incidencia en el desarrollo del estudio.
- Tabulación de los datos de acuerdo a los parámetros y a la relación que tengan con la demostración de la hipótesis.
- Analizar e interpretar los resultados obtenidos relacionándolos con las diferentes partes de la investigación, especialmente con los objetivos y la hipótesis.

3.7. PROCESO DE EJECUCIÓN

La mayor parte de la soldadura del hierro fundido gris es de reparación; la soldadura SMAW aplicando precalentamiento es uno de los procedimientos menos utilizados, el alto porcentaje de carbono que se encuentra en el hierro fundido gris lo hace diferente del acero por lo que su soldabilidad dependerá éste

y debido a la estructura cristalina del grafito presente en la fundición hace que ésta no se doble ni se estire y termine por romperse; el factor de las formas en las que puede presentarse el carbono en el hierro fundido gris requiere de una atención especial a la hora de realizar la soldadura, las grietas resultantes o la introducción de estructuras no deseables son las principales preocupaciones cuando se suelda. La aplicación de la temperatura de no-agrietamiento correlaciona el carbono equivalente de la fundición a soldar, reduciendo así principalmente la velocidad de enfriamiento de las piezas dependiendo de su espesor, preparando así al metal para que sea más receptivo a la soldadura y brindando mejores condiciones en sus propiedades mecánicas.

3.8. PROCESO DE SOLDABILIDAD

El proceso para realizar la soldadura SMAW en el hierro fundido gris clase 30 comprende los siguientes pasos:

- Caracterización del material.
- Preparación de la junta a soldar.
- Selección del electrodo.
- Aplicación de la temperatura de precalentamiento.
- Operación de la soldadura.

3.8.1. Características del material

La determinación de la clase del hierro fundido gris que se va a soldar es muy importante, debido a las diferentes características y propiedades que puedan presentar las clases de hierros grises como especifica la Norma ASTM A-48

(Anexo C1). Cuando se posee hierro fundido gris y se desconoce su clase o grado y no se tiene una ficha técnica proporcionada por el fabricante, es posible determinar su grado mediante un análisis de sus propiedades mecánicas mediante ensayo; para el presente procedimiento se realizó el ensayo de dureza Rockwell B y C y se convirtió a dureza Brinell utilizando la tabla de ASTM E140.

3.8.2. Ensayo de dureza

Medir la resistencia del material a la penetración del indentador sobre la superficie del material es el objetivo de este ensayo. Para medir la dureza se realizó mediante el método de Dureza Rockwell B siguiendo en la empresa JMC soluciones de la ciudad de Arequipa, consistente en el siguiente proceso.

- Preparación de la probeta.
- Calibración de la máquina (Durómetro).
- Ejecución del ensayo de dureza.
- Evaluación de resultados.

a) Preparación de la probeta

Se corta y se obtiene un pedazo a analizar, posteriormente la superficie a ser analizada es pulida, eliminando así defectos de la superficie

b) Calibración de la máquina (Durómetro)

La calibración del durómetro se realizó en función al material que se analizó, identificando así la carga, el indentador y la escala asignada. La carga asignada para hierro fundido fue de 100 Kg. y se utilizó el penetrador de 1/16" (in).

c) Ejecución del ensayo de dureza

Colocamos la probeta sobre la superficie de ensayo del durómetro, ajustamos la máquina hasta que haga contacto, seguidamente aplicamos la precarga, una vez estabilizada aplicamos la carga de 100 Kg. y observamos la medición que indica el durómetro.

d) Evaluación de resultados

Los resultados obtenidos de las durezas en diferentes puntos de la probeta se los registró para obtener una dureza promedio y evaluar la probeta previa conversión a dureza Brinell para lo que se utilizó la tabla de la ASTM E140.

3.8.3. Preparación de la junta a soldar

La preparación de la junta influye directamente en las propiedades mecánicas de la pieza a soldar; por lo tanto, para la elaboración de la junta soldada se siguió minuciosamente los siguientes pasos:

- Se diseñó la junta en base a su espesor, basándose en las dimensiones establecidas por la norma AWS D11.2-89 para hierros fundidos (ver figura 9)
- La junta deberá ser basada según su espesor en los diseños homologados por la norma AWS D11.2 – 89.
- Maquinar las probetas, es importante tener cuidado de no calentar la superficie del material para no alterar sus propiedades microestructurales.
- Inspeccionar que no existan grietas ni porosidades en la junta a soldar.
- Eliminar las aristas vivas (bordes afilados) o superficies irregulares que puedan derretirse y provocar puntos duros durante la soldadura.

- Limpiar de grasas, aceites, agua, humedad, oxido, corrosión, arena, pintura u otros materiales extraños que interfieran en el proceso de soldadura u originen combustión inflamable.
- Verificar los puntos mencionados previo a la soldadura

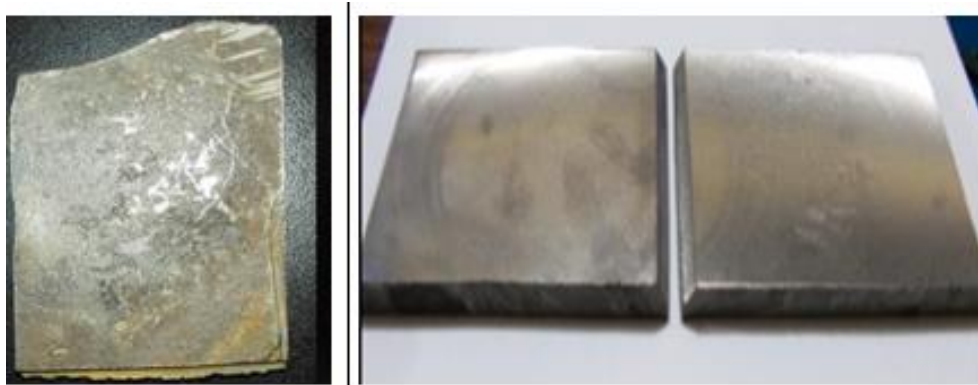
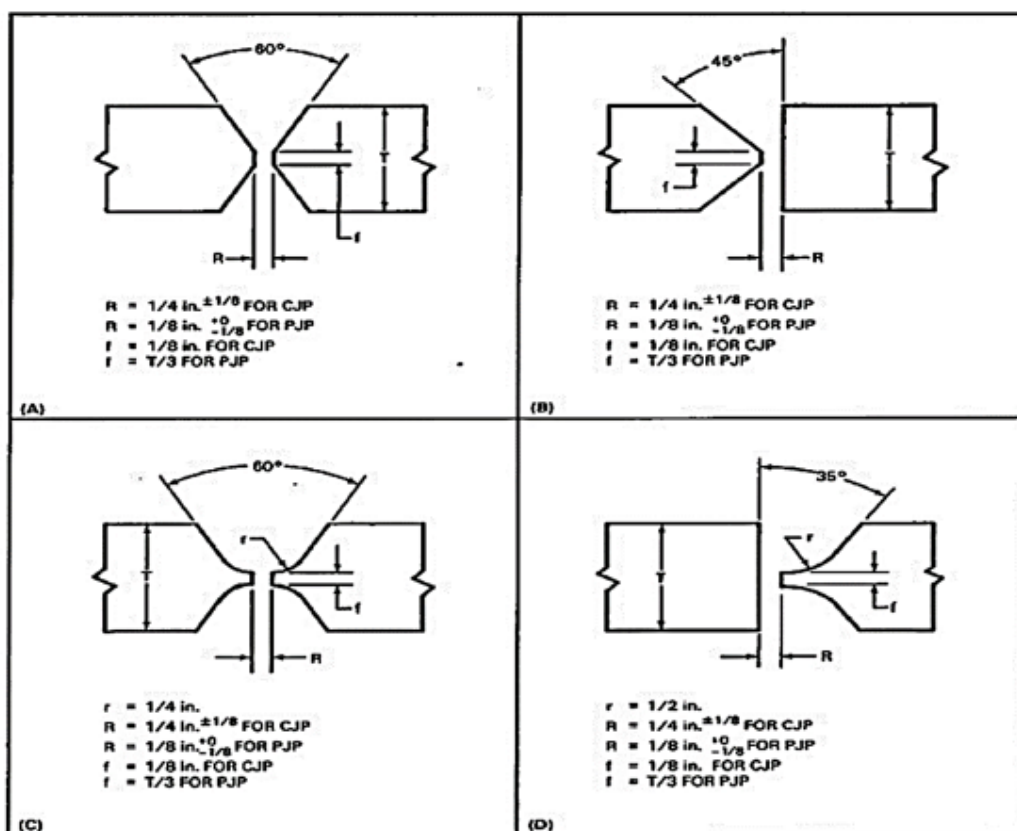


Figura N° 8: a) probeta seccionada: block de motor b) probeta preparada para ser soldada



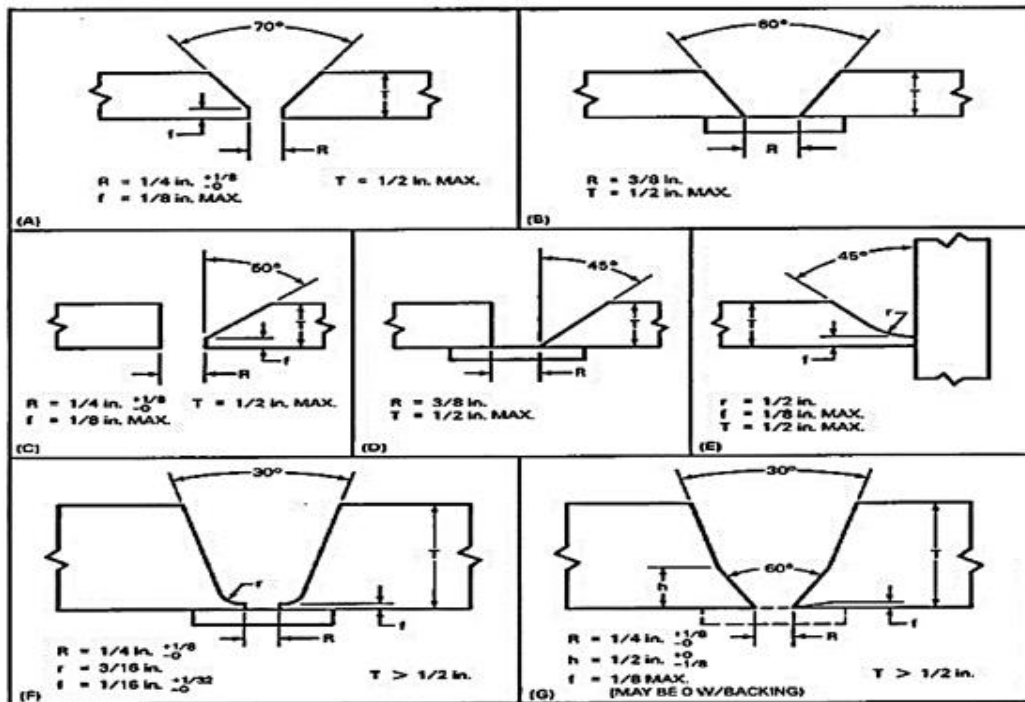


Figura N° 9: Juntas sugeridas con penetración completa y parcial para hierros fundidos

Fuente: (ANSI/AWS, 1997)

3.8.4. Selección del electrodo

El electrodo recomendado y utilizado en este estudio para soldar el hierro fundido gris clase 30 es un AWS ENi-CI.



Figura N° 10: Juntas sugeridas con penetración completa y parcial para hierros fundidos

Fuente: (Riesco, 2006)

El proceso de selección del electrodo está fundamentado bajo los siguientes parámetros:

- a) Los electrodos de hierro fundido gris deben cumplir con los requerimientos de la norma AWS A5.15
- b) Las propiedades mecánicas del electrodo.
 - La resistencia a la tracción del electrodo deberá ser mayor a la resistencia que tiene el material base.
 - El porcentaje de elongación que estará directamente relacionado con la resistencia a la tracción.
 - La dureza del electrodo que se obtendrá en el depósito cuidando de que no se pueda obtener zonas duras en la soldadura.
 - La composición química del electrodo que influirá en las zonas aledañas al cordón de soldadura.
 - Dimensiones del electrodo (\varnothing diámetro)
- c) Costo económico (que sea de menor costo y ofrezca buenas propiedades mecánicas)
- d) Disponibilidad de existencia en el mercado peruano.

3.8.5. Aplicación y control de la temperatura de precalentamiento

La temperatura de precalentamiento deberá ser de 370°C y se lo realizará mediante un horno de mufla y su control se lo realiza mediante el display digital incorporado en el horno en la siguiente secuencia:

- Preparamos el horno y sus instalaciones eléctricas.
- Colocamos las probetas dentro del horno de manera ordenada.
- Precalentamos hasta una temperatura de precalentamiento de 370°C.

3.8.6. Operación de soldadura

El procedimiento de soldadura será realizado correlacionando los parámetros anteriores y tomando en cuenta las siguientes observaciones:

a) Calibración de la máquina, procedemos a ubicar los parámetros en la máquina de soldar:

- Se utilizó una máquina de soldar con corriente continua; la máquina que se utilizo es marca Hobart R330 AC/DC
- Utilizamos una polaridad invertida o indirecta (Cable porta electrodo) conectado al polo (+) y el cable de tierra al polo (-)
- La selección de amperaje estará relacionada con el espesor, la geometría del material a soldar, el diámetro del electrodo, y el número de pasadas en la junta; según la practica en la investigación es recomendable soldar en un amperaje: 55 – 90 Amperios en electrodos de 1/8” in y 70 – 110 Amperios en electrodos de 5/32” in. Para la presente investigación se utilizaron electrodos de marca West Arco.

b) Cumplir con los parámetros de seguridad en proceso.

Tomar las precauciones necesarias para resguardar la integridad del soldador y personal involucrado:

- Retirar todo material que tenga peligro de combustión a una distancia prudente.
- Utilizar los elementos de seguridad: guantes, mandil, casco, mangas, zapatos de seguridad
- Revisar las instalaciones eléctricas
- Aislar la humedad o agua del lugar donde se va soldar
- Aislar el lugar donde se va soldar con elementos protectores que impidan la salida de chispas o rayos del arco que puedan afectar al personal que se encuentre cerca de la soldadura.
- Utilizar pinzas para manipular las piezas precalentadas
- Siempre procure tener equipo extinguidor de fuego al fácil alcance en todo momento.

c) Proceso de la soldadura:

Al momento de realizar la soldadura del hierro fundido gris se debe tener en cuenta las siguientes observaciones:

- Controlar la temperatura de precalentamiento; puede utilizarse un pirómetro.
- Los cordones longitudinales sin oscilación transversal son preferidos; depositar cordones angostos en vez de anchos

- Realizar cordones cortos de 5 a 8 cm, intermitentes para evitar excesivo calor localizado, se puede partir del centro hacia los extremos.
- Realizar la limpieza entre pasadas.
- Martillar el cordón después de apagarse el arco, esto ayudar a eliminar los esfuerzos de contracción de la soldadura y las zonas afectadas por el calor.
- Aislar la soldadura de corrientes de aire frío para evitar cambios bruscos de temperaturas.
- Terminado el proceso de soldadura introducir la pieza en arena seca para inducir a un enfriamiento lento y homogéneo.

3.8.7. Análisis estadístico

La estadística que se utilizó fue el MICRO SOFT EXCEL, el cual permitió conocer los parámetros de la presente investigación como son la temperatura de soldeo y dureza del proceso de soldadura y en cuanto a los indicadores se utilizaron tablas, graficas de barras, dispersión entre otros para detallar los resultados obtenidos. En la presente investigación se consideró para la muestra las probetas soldadas de hierro fundido a diferentes temperaturas de precalentamiento (100, 200, 300, 400, 500, 600) °C y a temperatura ambiente (sin precalentamiento).

3.8.8. Operacionalidad de variables

- Variable independiente “X”: Estudio de parámetros de soldabilidad
- Variable dependiente “Y”: Reconstrucción de piezas de hierro fundido.

CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. IDENTIFICACIÓN DEL MATERIAL BASE

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

Para analizar el material base, se utilizó el ensayo de dureza Rockwell B y C para distinguir el tipo de material seleccionado para los ensayos.

Para la presente investigación, se inició con la recopilación de muestras de hierro fundido gris, donde se seccionó el block de un motor de combustión interna para la elaboración de probetas.

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

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

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

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

Por consiguiente, basado en las características físicas presentadas en los materiales utilizados para análisis (materiales base), de las cuales se fabricaron las probetas para la presente investigación, los motores de combustión interna generalmente son fabricados de fundición gris, motivo de selección.

4.2. COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL MATERIAL BASE

La composición química del material base es esencial y parte fundamental de esta investigación para la determinación de los parámetros de soldadura que más adelante lo calcularemos.

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



Cabe mencionar que se tomó estos valores en razón a que no se pudo obtener valores de empresas peruanas, sin embargo, se toma en consideración estos valores en vista que la fundición gris es única nivel mundial.

4.3. PROPIEDADES DE LA FUNDICIÓN SEGÚN EL DIAGRAMA DE MAURER

El diagrama siguiente llamado, diagrama de MAURER que fue uno de los primeros que señalaron una forma clara de relación entre los % de carbono y % de silicio clasificando los diferentes tipos de estructuras de las fundiciones es utilizado para comprobar la matriz.

El diagrama de MAURER constituye las siguientes zonas:

- Zona I : Fundiciones blancas
- Zona II a : Fundiciones Atruchadas (Con perlita y cementita)
- Zona II : Fundiciones Perlíticas
- Zona II b : Fundiciones Con ferrito-perlítica
- Zona III : Fundiciones Ferrítica

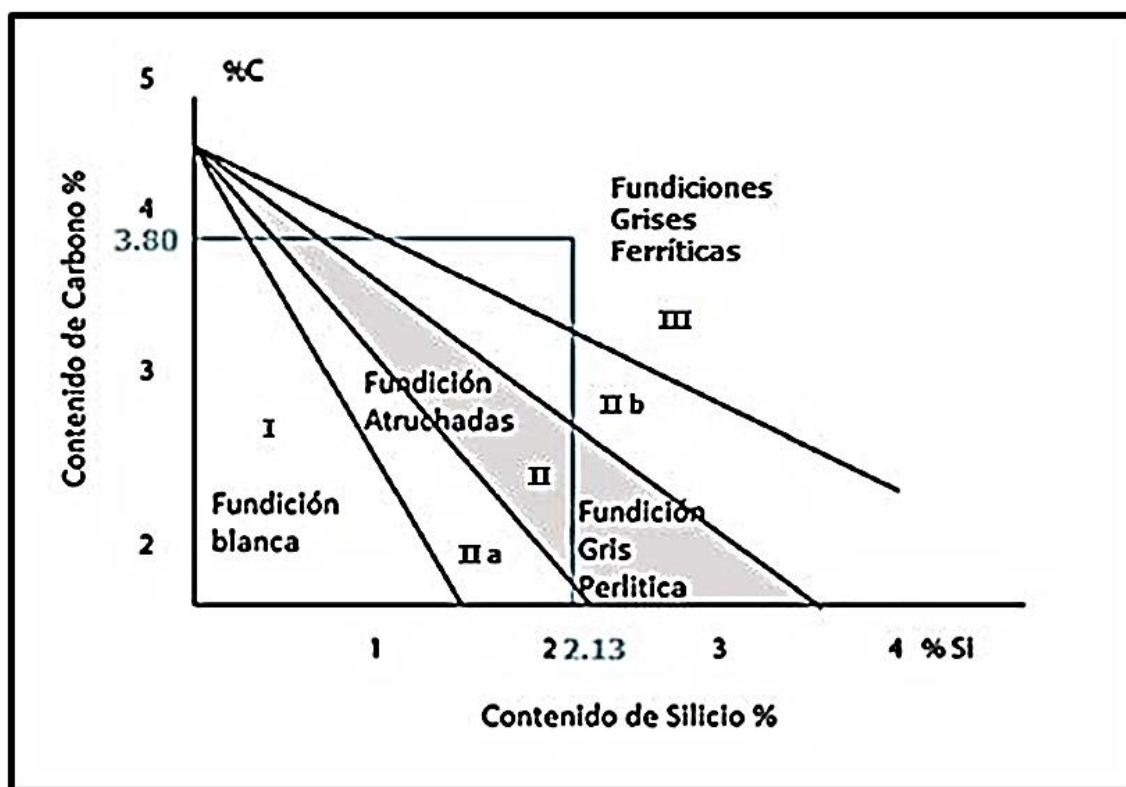


Figura N° 11: Diagrama de Maurer para fundiciones de hierro

Referencia: (Pastor, 2008)

De acuerdo a los porcentajes Silicio (2.13%) y de carbono (3.80%) que contiene el material base, en el diagrama de Maurer esta fundición se la identifica como una fundición gris con matriz ferrítica.

4.4. PROPIEDADES DE LA FUNDICIÓN SEGÚN EL DIAGRAMA DE NORBURY

El diagrama de Maurer ha sido modificado y perfeccionado por otros investigadores, siendo en la actualidad el de NORBURY uno de los más aceptados. El diagrama de Norbury será utilizado para comprobar la matriz del material base a ser soldado.

El diagrama de Norbury constituye tres zonas:

- Fundiciones Blancas
- Fundiciones Perlíticas
- Fundición gris perlíticas

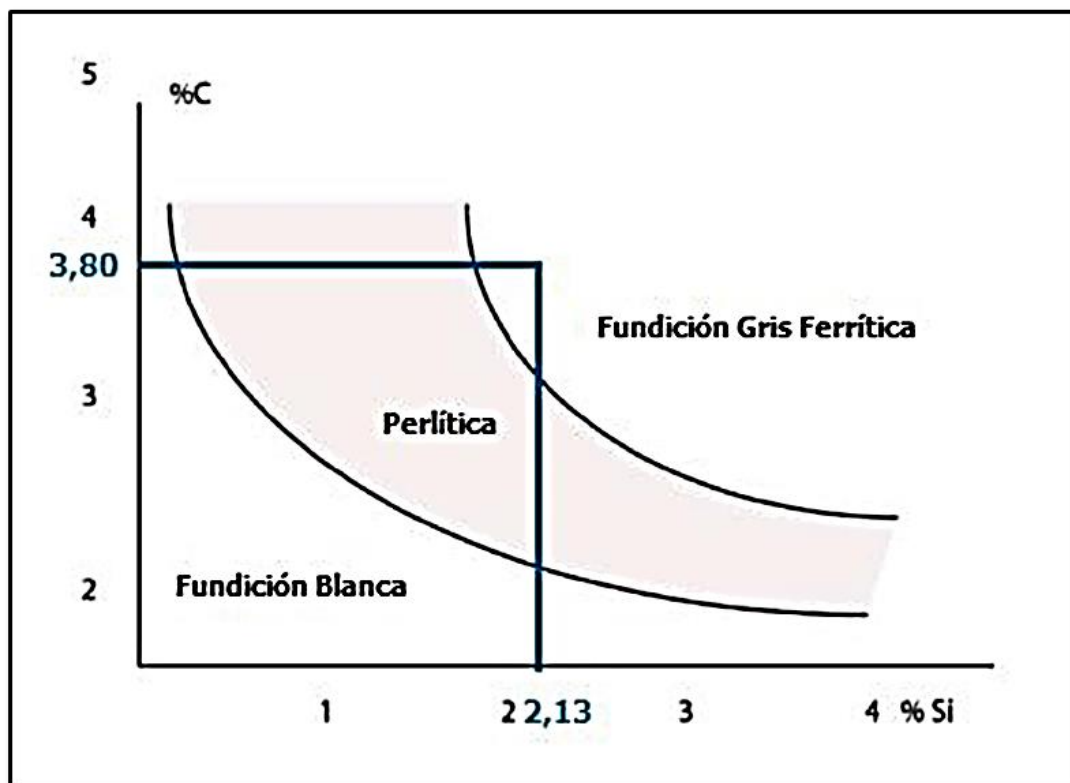


Figura N° 12: Diagrama de Norbury para fundiciones de hierro

Fuente: (Barreiro, 1963)

El elemento que rompe la matriz de la cementita es el silicio y debido al alto porcentaje de carbono que contiene el material base en el diagrama de NORBURY podemos observar que este diagrama señala a esta fundición como una fundición gris ferrítica.

4.5. CONTRASTACIÓN DE LA DUREZA EN EL MATERIAL BASE

A continuación, se presenta los resultados de los ensayos realizados con el material base (Hierro fundido gris) antes de la aplicación de soldadura SMAW para determinación de su propiedad de dureza.

ENSAYO DE DUREZA			
DATOS INFORMATIVOS DEL ESPECIMEN A ENSAYAR			
Material	Motor de combustión interna	Identificación del espécimen de ensayo	MA: 01
Tipo de estudio:	De laboratorio	Fecha:	03/08/2017
Lugar de análisis:	Arequipa - Perú	JMC Soluciones	
Realizado por:	Milton A. Mamani Alanoca	Supervisado por:	Julcar Melo Cari
PARAMETROS DE ENSAYO DE DUREZA			
Método:	Rockwell	Normas de referencias	ASTM E 18 Y ASTM E 140
Penetrador:	Esfera de acero de 1/6 pulgadas		
Carga aplicada:	100 Kg	Tiempo de ensayo:	28 min
RESULTADOS			
	Nº	DUREZA ROCWELL B	
	1	73.5	
	2	80.2	
	3	83.3	
	4	85.9	
	5	89	
	6	98.9	
	7	90	
	8	85.5	
	9	98.2	
	10	86	
	11	87	
	PROMEDIO	87.04 = 172.00 HRB	
<p>La dureza promedio obtenida del ensayo de dureza Rockwell B es de 87.00 HRB que es equivalente a 172 HB (dureza Brinell), este resultado es aceptable ya que cuando se seleccionó el material base se tenía que contrastar con las normas correspondientes: por lo tanto, estaría catalogado como un material de fundición gris clase 30 según la norma ASTM A 48-41.</p> <p>Así mismo para la conversión de HRB a HB se utilizó la norma ASTM E-140 (tabla de anexo)</p>			

4.6. SELECCIÓN DEL MATERIAL BASE

Se seleccionó como metal base una fundición gris cuya microestructura predominante es una matriz Ferrito – Perlítica con grafito laminar en forma de hojuelas tipo A y B según la especificación de la norma ASTM A 247 y una comparación visual con las fotografías de microestructuras presentadas en libro del (ASM, Internacional, 2005).

El metal base presenta una dureza 172.00 HBS. Con un carbono equivalente de 4.77% y con una resistencia a la tracción de 27.30 Ksi, que comparada con la norma ASTM A48, se puede clasificar a esta fundición como clase 30.

A continuación, la tabla 6 ilustra las principales características y propiedades mecánicas de interés del material base que se utilizó para la presente investigación.

Tabla 6: Características y propiedades del material base

PRINCIPALES PROPIEDADES Y CARACTERISITCAS DEL MATERIAL BASE	
Propiedad o Característica	Resultado
Carbono Equivalente:	4.77 %
Carbono total:	3.80 %
Dureza Brinell	172.00 HB
Distribución del grafito:	Tipo A - B
Matriz predominante:	Ferrito - Perlítica

4.7. CONSIDERACIONES PARA LA SOLDADURA DEL HIERRO FUNDIDO GRIS

4.7.1. Placas de ensayo para el estudio de la soldadura del Hierro Fundido Gris con Pre-calentamiento

La preparación de las placas a soldar fue parte fundamental para el presente estudio ya que es un factor importante que puede influir directamente en las propiedades mecánicas de la junta soldada y finalmente en su rendimiento para el servicio.

El diseño y selección de la probeta de ensayo para el presente estudio está dirigida hacia el objetivo mismo de la investigación. Existen diversas formas geométricas para el diseño de la junta a ser soldada, fundamentadas en normas de soldadura, para las fundiciones de hierro los diseños más importantes están concentrados en los modelos de: restricción para la solidificación del cordón, el modelo homologado por la AWS y los de selección libre.

Este estudio para el diseño de la junta a ser soldada tomó en cuenta los parámetros homologados por la AWS D11.2 y AWS B4.0 de donde se acondicionará un modelo conservativo en que las dimensiones impuestas permita extraer una probeta para realizar la soldadura y para realizar el ensayo de dureza.

4.7.2. Dimensionamiento de la junta a ser soldada

La norma AWS D11.2 en el literal 3.2 establece que el diseño de la junta puede influir en las propiedades de la soldadura para lo cual sugiere el diseño en base al espesor del metal (T), la figura a continuación muestra los parámetros que se debe tomar en cuenta dentro de la geometría de la junta para hierros fundidos.

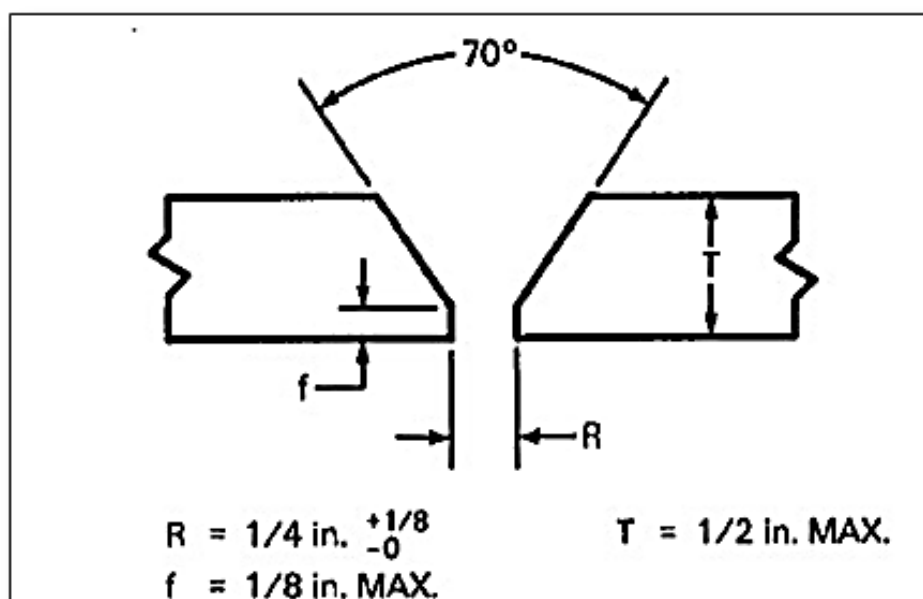


Figura N° 13: Junta recomendada por la norma AWS D11.2

Fuente: ANSI/AWS D11.2, 1989

Tomando como referencia estas consideraciones las medidas serán para la geometría de la junta para el presente estudio son las siguientes:

$$T = 8 \text{ mm}$$

$$R = 6.35 \text{ mm}$$

$$f = 2 \text{ mm}$$

$$\text{Angulo} = 70^\circ$$

4.7.3. Material de aporte utilizado

A continuación, se presenta un resumen de las propiedades del material de aporte utilizado en la investigación la cual se encuentra clasificada dentro de la especificación AWS A5.15, que para la investigación es E-Ni-CI.

Tabla 7: Propiedades del material depositado según el fabricante

Denominación:	WEST ARCO: Níquel 100	AWS A5.15: ENi-CI
Composición química del material depositado:	Carbono 2.00% máx	Manganeso 1.00% máx
	Azufre 0.03% máx	Silicio 4.00% máx
	Cobre 2.5% máx	Níquel 85.00% min
	Hierro 8.00% máx	Aluminio 1.00% máx
Resistencia máxima a tracción:	24 - 32 g/mm ² 35 - 45 ksi	Dureza del depósito: 1ra capa 190 - 230 HB 2da capa 155 - 195 HB
Límite de fluencia:	22 - 30 kg/mm ² 32 - 42 ksi	Elongación: 3 - 6 %
Propiedades de maquinado:	Excelente maquinabilidad	Longitud del electrodo: 300 mm
		350 mm
		350 mm
Diámetro del electrodo	2.4 x 300 mm (3/32) pulg	Intervalo de amperajes recomendados: 40 - 80 A
	3.2 x 350 mm (1/8) pulg	55 - 100 A
	4.0 x 350 mm (5/32) pulg	90 - 150 A
Tipo de aplicación	CA, CC, Electrodo negativo	Pre calentamiento recomendado: Ninguna especificación

Fuente: Catalogo de electrodos WEST ARCO

Las especificaciones del electrodo indican que se puede utilizar el electrodo con cualquier corriente continua directa en cualquier polaridad y con corriente alterna. En la norma las especificaciones del electrodo recomiendan realizar cordones cortos de no más de 5 a 8 cm de longitud, martillar el cordón inmediatamente después de apagar el arco para ayudar a eliminar los esfuerzos de contracción de la soldadura y la zona térmicamente afectada.

4.7.4. Determinación de la temperatura de precalentamiento para soldar Hierro Fundido Gris.

La determinación de la temperatura de precalentamiento interviene directamente al momento de investigar los siguientes parámetros:

- Prevención de grietas causadas por los gradientes de temperatura y tensiones térmicas.
- Reducción de las tensiones residuales en la fundición.
- Comportamiento de las deformaciones (expansiones y contracciones térmicas).
- El comportamiento de las zonas de la soldadura.
- Reducción los contaminantes de hidrocarburos en piezas fundidas de que han sido en servicio.

Existen muchos métodos de determinación de temperatura de precalentamiento pero están dirigidos hacia el estudio del aceros los cuales no son aplicables para los hierros fundidos, en la norma AWS D11.2 y METAL HANDBOOK 2003, establece un procedimiento para determinar la temperatura de precalentamiento llamado “temperatura de no agrietamiento”, previo a una soldadura de hierro

fundido, este procedimiento está basado en el cálculo del carbono equivalente, a continuación en la presente investigación desarrollamos el procedimiento.

4.8. DETERMINACIÓN DEL CARBONO EQUIVALENTE

La determinación del carbono equivalente se lo realiza mediante la siguiente ecuación descrita en el Metal Handbook 2006:

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

$$CE = (3.80) + 0.31 (2.13) + 0.33 (0.224) + 0.45 (0.0780) - 0.028 (0.468) + (0.0250) + (0.204) - 0.02 (0.123) - 0.01 (0.427)$$

$$CE = 4.777 \%$$

Diferentes estudios, así como la norma AWS D11.2 y Metal Handbook señalan que, a mayor carbono equivalente, mayor será la temperatura de precalentamiento que necesite el material base para ser precalentado.

Si el tipo de fundición es conocido, pero su composición química no lo es, este método para determinar la temperatura de precalentamiento no es aplicable, entonces el precalentamiento debe estar basada en la microestructura y la resistencia a la tracción de la fundición.

Con el porcentaje de carbono equivalente ingresamos en la gráfica y determinamos la temperatura de precalentamiento.

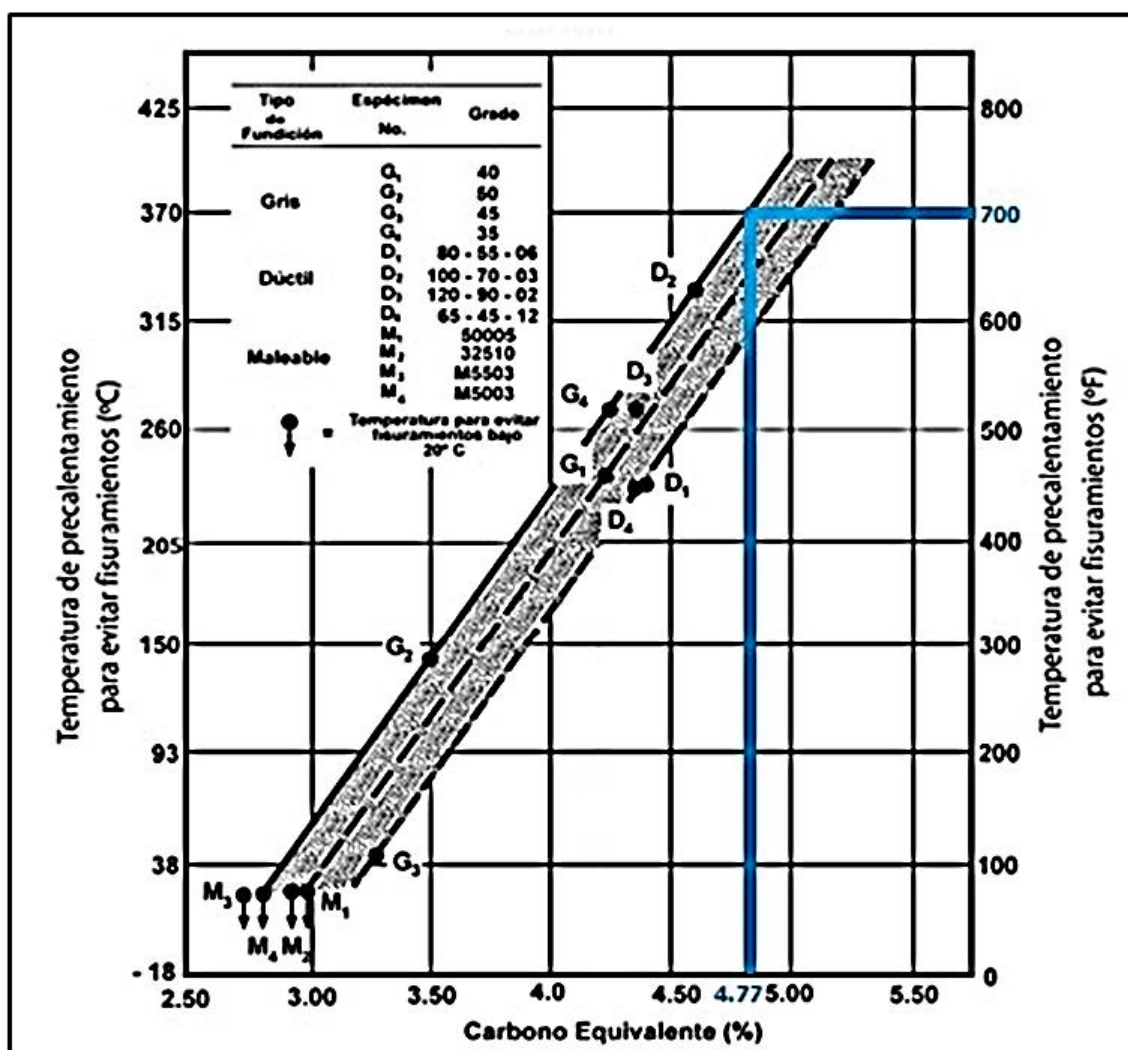


Figura N° 14: Procedimiento: Efecto del carbono equivalente en la temperatura de precalentamiento para el no agrietamiento para fundiciones de hierro

Mediante el cálculo del carbono equivalente y la gráfica 4.7 establecida en la norma AWS D11.2 se establece una temperatura de precalentamiento de: 700°F = 370°C

La temperatura obtenida será sujeto de investigación, así como otras temperaturas que nos sirvan como indicadores de comparación para determinar las propiedades de la junta soldada.

4.9. EVALUACIÓN TÉCNICA DE LAS PROBETAS SOLDADAS DE HIERRO FUNDIDO GRIS UTILIZANDO DIFERENTES TEMPERATURAS DE PRECALENTAMIENTO

ESPÉCIMEN DE SOLDADURA			
DATOS INFORMATIVOS			
Material base:	Hierro fundido gris	Grado:	30 ASTM - A - 48
Material de aporte:	AWS A5.15 - ENi-CI	Denominación	Níquel 100
Tipo de soldadura:	SMAW	Temperatura de ensayo	21 - 600 °C
N° de Probetas:	8 un espécimen por cada temperatura	Medio de precalentamiento:	Ambiente
Tipo de estudio:	De laboratorio	Fecha:	03/08/2017
Centro de estudios y análisis		JMC Soluciones	
Realizado por:	Milton A. Mamani Alanoca	Supervisado por:	Julcar Melo Cari
DETALLES			
Espesor:	8	PROBETA HIERRO FUNDIDO GRIS	
Longitud:	130 mm		
Ancho:	110 mm		
Preparación de:	Esmerilado		
Dureza:	172.00 HB		
N° DE PROBETAS	MATERIAL DE APORTE	TEMPERATURA DE PRECALENTAMIENTO	ENFRIAMIENTO
1	E-Ni-CI	Sin precalentamiento	Enfriamiento en arena
1	E-Ni-CI	100 °C	Enfriamiento en arena
1	E-Ni-CI	200 °C	Enfriamiento en arena
1	E-Ni-CI	300 °C	Enfriamiento en arena
1	E-Ni-CI	370 °C	Enfriamiento en arena
1	E-Ni-CI	400 °C	Enfriamiento en arena
1	E-Ni-CI	500 °C	Enfriamiento en arena
1	E-Ni-CI	600 °C	Enfriamiento en arena

4.10. ENSAYO DE DUREZA DE LA JUNTA SOLDADA DEL HIERRO FUNDIDO GRIS SIN PRECALENTAMIENTO

ENSAYO DE DUREZA				
DATOS INFORMATIVOS DEL ESPECIMEN A ENSAYAR				
Material base:	Hierro fundido gris	Grado:	30 ASTM - A - 48	
Material de aporte:	AWS A5.15 - ENi-CI	T° de precalentamiento:	500 °C	
Tipo de soldadura:	SMAW	Medio de precalentamiento:	Horno	
Tipo de estudio:	De laboratorio	Fecha:	03/08/2017	
Lugar de análisis:	Arequipa - Perú	JMC Soluciones		
Realizado por:	Milton A. Mamani Alanoca	Supervisado por:	Julcar Melo Cari	
PARAMETROS DE ENSAYO DE DUREZA				
Método:	Rockwell	Normas de referencias	AWS B4.0, ASTM E 18 Y ASTM E 140	
Penetrador:	Esfera de acero de 1/6 pulgadas			
Carga aplicada:	100 Kg	Tiempo de ensayo:	28 min	
RESULTADOS				
Huella N°	Zona de ensayo	Dureza		DETALLE DE ESPECIMEN (mm)
		HRB	Brinell HB	
1	MF	81.50 HRB	155.04	
2	MF	83.00 HRB	159.00	
3	Intercara	99.50 HRB	238.80	
4	ZAT	98.00 HRB	228.00	
5	MB	98.20 HRB	232.10	
6	MB	98.00 HRB	228.00	
7	MB	98.50 HRB	232.80	
8	MB	97.00 HRB	222.00	
INTERPRETACION DE RESULTADOS				
<p>Los resultados obtenidos en este ensayo se muestran en la figura a través de un gráfico HB vs Distancia, donde se muestran los resultados de una probeta soldada con precalentamiento a 500 °C, la misma que alcanza una dureza máxima de 238.80 HB en la zona de la intercara de la soldadura y una mínima de 155.04 HB en la zona del metal fundido.</p>				

4.11. ENSAYO DE DUREZA DE LA JUNTA SOLDADA DEL HIERRO FUNDIDO GRIS CON PRECALENTAMIENTO A 100 °C

ENSAYO DE DUREZA				
DATOS INFORMATIVOS DEL ESPECIMEN A ENSAYAR				
Material base:	Hierro fundido gris	Grado:	30 ASTM - A - 48	
Material de aporte:	AWS A5.15 - ENi-CI	T° de precalentamiento:	100 °C	
Tipo de soldadura:	SMAW	Medio de precalentamiento:	Horno	
Tipo de estudio:	De laboratorio	Fecha:	03/08/2017	
Lugar e análisis:	Arequipa - Perú	JMC Soluciones		
Realizado por:	Milton A. Mamani Alanoca	Supervisado por:	Julcar Melo Cari	
PARAMETROS DE ENSAYO DE DUREZA				
Método:	Rockwell	Normas de referencias	AWS B4.0, ASTM E 18 Y ASTM E 140	
Penetrador:	Esfera de acero de 1/6 pulgadas			
Carga aplicada:	100 Kg	Tiempo de ensayo:	28 min	
RESULTADOS				
Huella N°	Zona de ensayo	Dureza		DETALLE DE ESPECIMEN (mm)
		HRB	Brinell HB	
1	MF	79.80 HRB	149.62	
2	MF	82.50 HRB	158.04	
3	Intercara	34.50 HRB	319.00	
4	ZAT	99.20 HRB	238.08	
5	MB	99.50 HRB	238.00	
6	MB	95.40 HRB	213.00	
7	MB	99.00 HRB	234.00	
8	MB	97.00 HRB	222.00	
INTERPRETACION DE RESULTADOS				
<p>Los resultados obtenidos en este ensayo se muestran en la figura a través de un gráfico HB vs Distancia, donde se muestran los resultados de una probeta soldada con precalentamiento a 100 °C, la misma que alcanza una dureza máxima de 319.00 HB en la zona de la intercara de la soldadura y una mínima de 149.62 HB en la zona del metal fundido.</p>				

4.12. ENSAYO DE DUREZA DE LA JUNTA SOLDADA DEL HIERRO FUNDIDO GRIS CON PRECALENTAMIENTO A 200 °C

ENSAYO DE DUREZA				
DATOS INFORMATIVOS DEL ESPECIMEN A ENSAYAR				
Material base:	Hierro fundido gris	Grado:	30 ASTM - A - 48	
Material de aporte:	AWS A5.15 - ENi-CI	T° de precalentamiento:	200 °C	
Tipo de soldadura:	SMAW	Medio de precalentamiento:	Horno	
Tipo de estudio:	De laboratorio	Fecha:	03/08/2017	
Lugar de análisis:	Arequipa - Perú	JMC Soluciones		
Realizado por:	Milton A. Mamani Alanoca	Supervisado por:	Julcar Melo Cari	
PARAMETROS DE ENSAYO DE DUREZA				
Método:	Rockwell	Normas de referencias	AWS B4.0, ASTM E 18 Y ASTM E 140	
Penetrador:	Esfera de acero de 1/6 pulgadas			
Carga aplicada:	100 Kg	Tiempo de ensayo:	28 min	
RESULTADOS				
Huella N°	Zona de ensayo	Dureza		DETALLE DE ESPECIMEN (mm)
		HRB	Brinell HB	
1	MF	79.10 HRB	147.18	
2	MF	80.00 HRB	150.00	
3	Intercara	37.00 HRB	344.00	
4	ZAT	100.00 HRB	240.00	
5	MB	98.00 HRB	228.00	
6	MB	98.80 HRB	233.52	
7	MB	98.00 HRB	228.00	
8	MB	96.00 HRB	216.00	
INTERPRETACION DE RESULTADOS				
<p>Los resultados obtenidos en este ensayo se muestran en la figura a través de un gráfico HB vs Distancia, donde se muestran los resultados de una probeta soldada con precalentamiento a 200 °C, la misma que alcanza una dureza máxima de 344.00 HB en la zona de la intercara de la soldadura y una mínima de 147.18 HB en la zona del metal fundido.</p>				

4.13. ENSAYO DE DUREZA DE LA JUNTA SOLDADA DEL HIERRO FUNDIDO GRIS CON PRECALENTAMIENTO A 300 °C

ENSAYO DE DUREZA				
DATOS INFORMATIVOS DEL ESPECIMEN A ENSAYAR				
Material base:	Hierro fundido gris	Grado:	30 ASTM - A - 48	
Material de aporte:	AWS A5.15 - ENi-CI	T° de precalentamiento:	300 °C	
Tipo de soldadura:	SMAW	Medio de precalentamiento:	Horno	
Tipo de estudio:	De laboratorio	Fecha:	03/08/2017	
Lugar de análisis:	Arequipa - Perú	JMC Soluciones		
Realizado por:	Milton A. Mamani Alanoca	Supervisado por:	Julcar Melo Cari	
PARAMETROS DE ENSAYO DE DUREZA				
Método:	Rockwell	Normas de referencias	AWS B4.0, ASTM E 18 Y ASTM E 140	
Penetrador:	Esfera de acero de 1/6 pulgadas			
Carga aplicada:	100 Kg	Tiempo de ensayo:	28 min	
RESULTADOS				
Huella N°	Zona de ensayo	Dureza		DETALLE DE ESPECIMEN (mm)
		HRB	Brinell HB	
1	MF	77.50 HRB	143.00	
2	MF	76.50 HRB	140.08	
3	Intercara	100.00 HRB	240.00	
4	ZAT	99.80 HRB	239.50	
5	MB	99.00 HRB	234.00	
6	MB	97.00 HRB	222.00	
7	MB	98.00 HRB	228.00	
8	MB	98.00 HRB	228.00	
INTERPRETACION DE RESULTADOS				
Los resultados obtenidos en este ensayo se muestran en la figura a través de un gráfico HB vs Distancia, donde se muestran los resultados de una probeta soldada con precalentamiento a 300 °C, la misma que alcanza una dureza máxima de 240.00 HB en la zona de la intercara de la soldadura y una mínima de 143.00 HB en la zona del metal fundido.				

4.14. ENSAYO DE DUREZA DE LA JUNTA SOLDADA DEL HIERRO FUNDIDO GRIS CON PRECALENTAMIENTO A 370 °C

ENSAYO DE DUREZA				
DATOS INFORMATIVOS DEL ESPECIMEN A ENSAYAR				
Material base:	Hierro fundido gris	Grado:	30 ASTM - A - 48	
Material de aporte:	AWS A5.15 - ENi-CI	T° de precalentamiento:	370 °C	
Tipo de soldadura:	SMAW	Medio de precalentamiento:	Horno	
Tipo de estudio:	De laboratorio	Fecha:	03/08/2017	
Lugar de análisis:	Arequipa - Perú	JMC Soluciones		
Realizado por:	Milton A. Mamani Alanoca	Supervisado por:	Julcar Melo Cari	
PARAMETROS DE ENSAYO DE DUREZA				
Método:	Rockwell	Normas de referencias	AWS B4.0, ASTM E 18 Y ASTM E 140	
Penetrador:	Esfera de acero de 1/6 pulgadas			
Carga aplicada:	100 Kg	Tiempo de ensayo:	28 min	
RESULTADOS				
Huella N°	Zona de ensayo	Dureza		DETALLE DE ESPECIMEN (mm)
		HRB	Brinell HB	
1	MF	82.00 HRB	156.00	
2	MF	82.50 HRB	158.04	
3	Intercara	26.00 HRB	258.00	
4	ZAT	99.80 HRB	239.50	
5	MB	98.00 HRB	228.00	
6	MB	98.00 HRB	228.00	
7	MB	98.00 HRB	228.00	
8	MB	97.80 HRB	227.53	
INTERPRETACION DE RESULTADOS				
<p>Los resultados obtenidos en este ensayo se muestran en la figura a través de un gráfico HB vs Distancia, donde se muestran los resultados de una probeta soldada con precalentamiento a 370 °C, la misma que alcanza una dureza máxima de 258.00 HB en la zona de la intercara de la soldadura y una mínima de 156.00 HB en la zona del metal fundido.</p>				

4.15. ENSAYO DE DUREZA DE LA JUNTA SOLDADA DEL HIERRO FUNDIDO GRIS CON PRECALENTAMIENTO A 400 °C

ENSAYO DE DUREZA				
DATOS INFORMATIVOS DEL ESPECIMEN A ENSAYAR				
Material base:	Hierro fundido gris	Grado:	30 ASTM - A - 48	
Material de aporte:	AWS A5.15 - ENi-CI	T° de precalentamiento:	400 °C	
Tipo de soldadura:	SMAW	Medio de precalentamiento:	Horno	
Tipo de estudio:	De laboratorio	Fecha:	03/08/2017	
Lugar de análisis:	Arequipa - Perú	JMC Soluciones		
Realizado por:	Milton A. Mamani Alanoca	Supervisado por:	Julcar Melo Cari	
PARAMETROS DE ENSAYO DE DUREZA				
Método:	Rockwell	Normas de referencias	AWS B4.0, ASTM E 18 Y ASTM E 140	
Penetrador:	Esfera de acero de 1/6 pulgadas			
Carga aplicada:	100 Kg	Tiempo de ensayo:	28 min	
RESULTADOS				
Huella N°	Zona de ensayo	Dureza		DETALLE DE ESPECIMEN (mm)
		HRB	Brinell HB	
1	MF	81.50 HRB	155.04	
2	MF	77.00 HRB	141.00	
3	Intercara	94.50 HRB	208.80	
4	ZAT	84.00 HRB	162.00	
5	MB	85.00 HRB	165.00	
6	MB	82.70 HRB	158.40	
7	MB	84.00 HRB	162.00	
8	MB	81.40 HRB	154.85	
INTERPRETACION DE RESULTADOS				
<p>Los resultados obtenidos en este ensayo se muestran en la figura a través de un gráfico HB vs Distancia, donde se muestran los resultados de una probeta soldada con precalentamiento a 400 °C, la misma que alcanza una dureza máxima de 208.80 HB en la zona de la intercara de la soldadura y una mínima de 141.00 HB en la zona del metal fundido.</p>				

4.16. ENSAYO DE DUREZA DE LA JUNTA SOLDADA DEL HIERRO FUNDIDO GRIS CON PRECALENTAMIENTO A 500 °C

ENSAYO DE DUREZA				
DATOS INFORMATIVOS DEL ESPECIMEN A ENSAYAR				
Material base:	Hierro fundido gris	Grado:	30 ASTM - A - 48	
Material de aporte:	AWS A5.15 - ENi-CI	T° de precalentamiento:	500 °C	
Tipo de soldadura:	SMAW	Medio de precalentamiento:	Horno	
Tipo de estudio:	De laboratorio	Fecha:	03/08/2017	
Lugar de análisis:	Arequipa - Perú	JMC Soluciones		
Realizado por:	Milton A. Mamani Alanoca	Supervisado por:	Julcar Melo Cari	
PARAMETROS DE ENSAYO DE DUREZA				
Método:	Rockwell	Normas de referencias	AWS B4.0, ASTM E 18 Y ASTM E 140	
Penetrador:	Esfera de acero de 1/6 pulgadas			
Carga aplicada:	100 Kg	Tiempo de ensayo:	28 min	
RESULTADOS				
Huella N°	Zona de ensayo	Dureza		DETALLE DE ESPECIMEN (mm)
		HRB	Brinell HB	
1	MF	81.50 HRB	155.04	
2	MF	83.00 HRB	159.00	
3	Intercara	99.50 HRB	238.80	
4	ZAT	98.00 HRB	228.00	
5	MB	98.20 HRB	232.10	
6	MB	98.00 HRB	228.00	
7	MB	98.50 HRB	232.80	
8	MB	97.00 HRB	222.00	
INTERPRETACION DE RESULTADOS				
<p>Los resultados obtenidos en este ensayo se muestran en la figura a través de un gráfico HB vs Distancia, donde se muestran los resultados de una probeta soldada con precalentamiento a 500 °C, la misma que alcanza una dureza máxima de 238.80 HB en la zona de la intercara de la soldadura y una mínima de 155.04 HB en la zona del metal fundido.</p>				

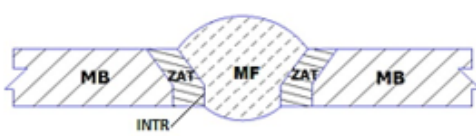
4.17. ENSAYO DE DUREZA DE LA JUNTA SOLDADA DEL HIERRO FUNDIDO GRIS CON PRECALENTAMIENTO A 600 °C

ENSAYO DE DUREZA				
DATOS INFORMATIVOS DEL ESPECIMEN A ENSAYAR				
Material base:	Hierro fundido gris	Grado:	30 ASTM - A - 48	
Material de aporte:	AWS A5.15 - ENi-CI	T° de precalentamiento:	600 °C	
Tipo de soldadura:	SMAW	Medio de precalentamiento:	Horno	
Tipo de estudio:	De laboratorio	Fecha:	03/08/2017	
Lugar de análisis:	Arequipa - Perú	JMC Soluciones		
Realizado por:	Milton A. Mamani Alanoca	Supervisado por:	Julcar Melo Cari	
PARAMETROS DE ENSAYO DE DUREZA				
Método:	Rockwell	Normas de referencias	AWS B4.0, ASTM E 18 Y ASTM E 140	
Penetrador:	Esfera de acero de 1/6 pulgadas			
Carga aplicada:	100 Kg	Tiempo de ensayo:	28 min	
RESULTADOS				
Huella N°	Zona de ensayo	Dureza		DETALLE DE ESPECIMEN (mm)
		HRB	Brinell HB	
1	MF	83.50 HRB	161.00	
2	MF	83.90 HRB	161.80	
3	Intercara	99.80 HRB	239.50	
4	ZAT	99.00 HRB	234.00	
5	MB	99.50 HRB	238.80	
6	MB	99.20 HRB	238.00	
7	MB	99.00 HRB	228.00	
8	MB	97.00 HRB	222.00	
INTERPRETACION DE RESULTADOS				
<p>Los resultados obtenidos en este ensayo se muestran en la figura a través de un gráfico HB vs Distancia, donde se muestran los resultados de una probeta soldada con precalentamiento a 600 °C, la misma que alcanza una dureza máxima de 239.50 HB en la zona de la intercara de la soldadura y una mínima de 161.00 HB en la zona del metal fundido.</p>				

4.18. INTERPRETACION DE RESULTADOS

El ensayo de dureza se realizó para conocer la resistencia que opone a la penetración de un cuerpo más duro en las zonas de la junta soldada, la dureza fue medida desde el centro con un espacio de 3 mm bajo la norma ASTM E18-08 y los valores tabulados fueron de en las zonas del Material Base, Intercara, Zona Térmicamente Afectada y Metal Fundido, para la interpretación de datos se tomaron los valores promedios de los resultados en las zonas del Material Base y Metal Fundido.

Tabla 8: Resultados de Dureza [HB] en la junta soldada

DETALLE		NOMENCLATURA			
		MA: Metal fundido INTR: Intercara ZAT: Zona Térmicamente Afectada MB: metal base			
		temperaturas de precalentamiento (°C)	DUREZA DE JUNTA SOLDADA (HB)		
	Metal fundido	Intercara	ZAT	Metal base	
21	160.98	234.00	172.00	169.79	
100	153.83	319.00	238.08	226.75	
200	148.59	344.00	240.00	226.38	
300	141.54	240.00	239.50	228.00	
370	157.02	258.00	239.50	227.88	
400	148.02	208.80	162.00	160.06	
500	157.02	238.80	228.00	228.73	
600	161.40	239.50	234.00	231.72	

En la tabla 8 se observa que la dureza máxima obtenida en la presente investigación es de 344.00 HB en zona de la intercara de junta soldada las probetas soldadas con la temperatura de precalentamiento de 200 ° C.

Así mismo de los resultados tabulados se realizaron gráficos de columna para analizar la dureza en las diferentes zonas de la junta soldada.

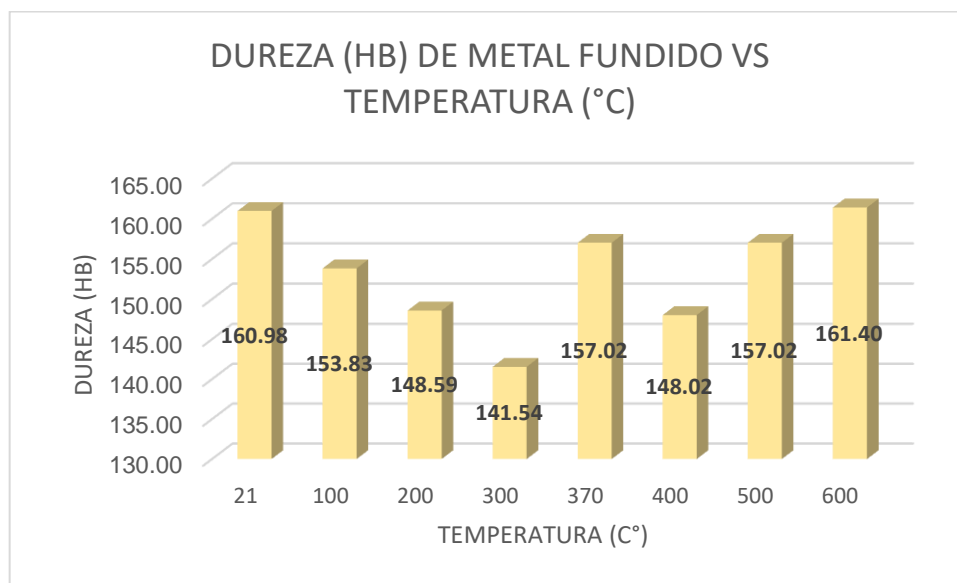


Figura N° 15: Metal Fundido: Dureza HB vs Temperaturas de precalentamiento

Elaborado por: Milton A. Mamani Alanoca

La figura que antecede muestra la dureza más alta registrada en la zona de Metal Fundido de la probeta precalentada a 600 °C que es de 161.40 HB, en relación con la probeta que fue soldada sin precalentamiento a 21°C que es 0.30 % mayor, ya que su dureza es de 160.98 HB. La figura también muestra el valor menor de 141.54 HB que pertenece a la probeta precalentada a 300 °C previo a la soldadura.

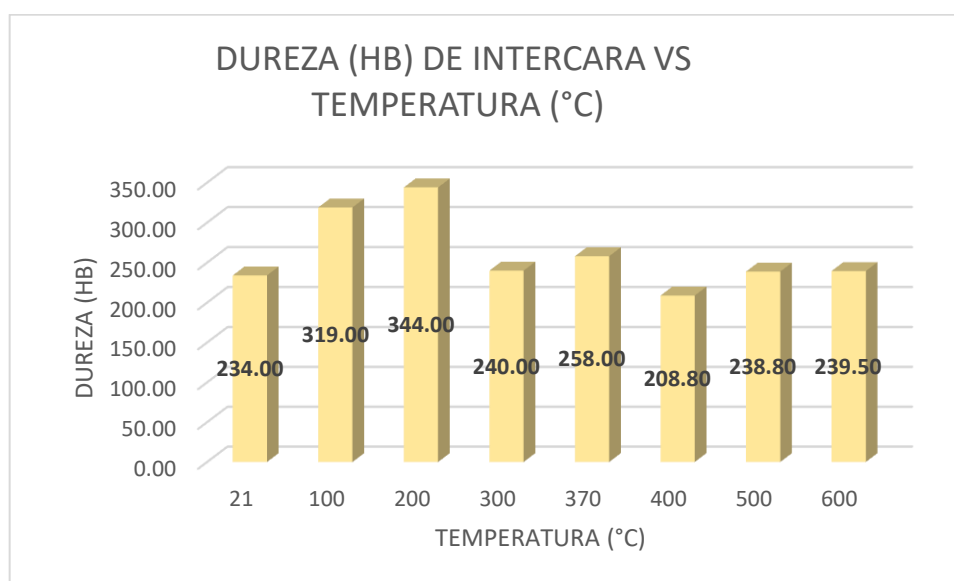


Figura N° 16: Intercara: Dureza HB vs Temperaturas de precalentamiento

Elaborado por: Milton A. Mamani Alanoca

El gráfico que se analiza muestra los resultados de las durezas más elevadas que se registraron en la investigación estos en la zona de la intercara, la dureza más elevada se obtuvo en las probetas soldada con precalentamiento a 200 °C siendo de 344 HB, en comparación con la probeta en frío, la probeta con precalentamiento a 200°C tiene 110 HB mayor de dureza, ya que su dureza es de 234 HB.

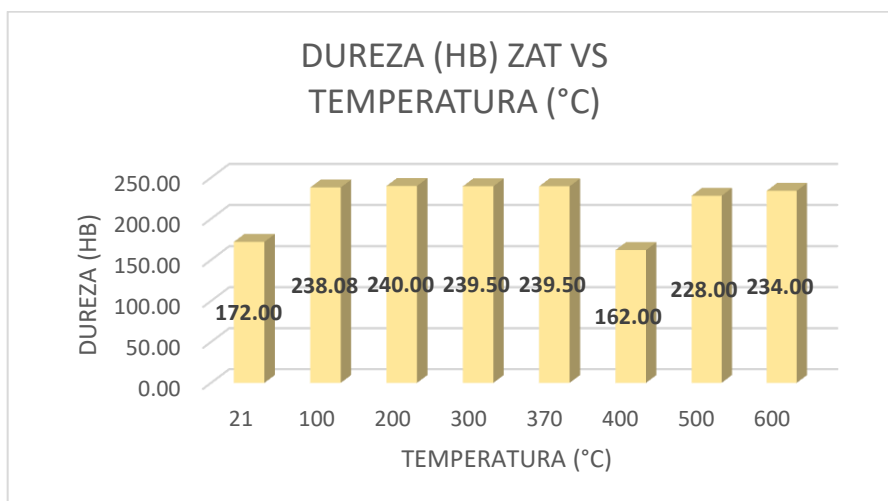


Figura N° 17: ZAT: Dureza HB vs Temperaturas de precalentamiento

Elaborado por: Milton A. Mamani Alanoca

En la figura 17 se puede observar que la soldadura con temperatura de precalentamiento a 200 ° C en la zona de la ZAT tiene una dureza de 240.00 HB es mucho mayor que las probetas soldadas sin precalentamiento a 21 ° C ya que su dureza es de 172 HB. La dureza aumenta con la temperatura de precalentamiento en la ZAT.

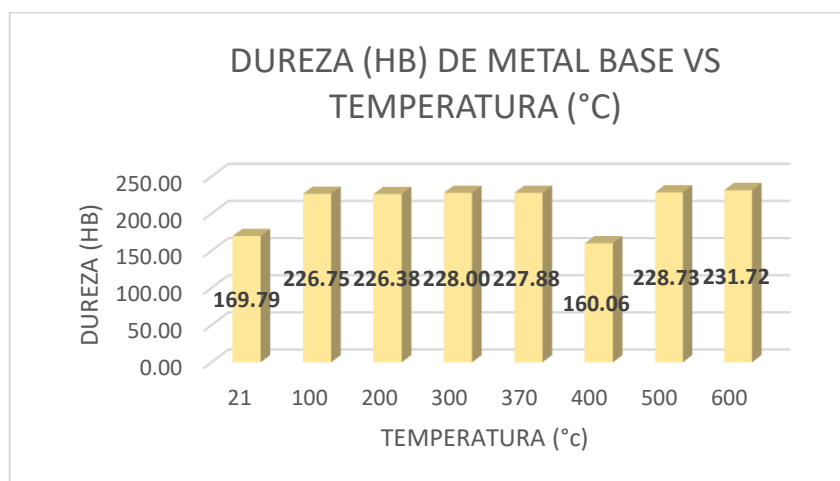


Figura N° 18: Material Base: Dureza HB vs Temperaturas de precalentamiento

Elaborado por: Milton A. Mamani Alanoca

En la figura 18 se muestra que la dureza más alta obtenida en la zona del material base entre todas las probetas es de 231.72 HB que pertenece a la probeta soldada con precalentamiento a 600 °C, la dureza es mayor en relación a la probeta soldada sin precalentamiento, la dureza aumenta con el precalentamiento; solo la probeta precalentada a 500°C presenta durezas menores entre 157.02 – 228.78 HB en todas las zonas.

4.19. INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA DE PRECALENTAMIENTO EN LA DUREZA DE LA JUNTA SOLDADA

La dureza que se registrada nos muestra cómo se comporta la junta soldada ante la aplicación de la temperatura de precalentamiento y como se observa en la tabla 8 la dureza aumenta con la aplicación de la temperatura de precalentamiento siendo 344.00 HB la máxima dureza registrada en la probeta precalentada a 200°C, la dureza máxima que presenta la temperatura de precalentamiento de 370°C es de 258 HB en la zona de la intercara y una mínima de 157.02 HB en la zona del metal fundido, la dureza varía según la aplicación del precalentamiento esto debido a la velocidad de enfriamiento que tuvo la junta soldada.

Con la culminación de este proyecto de investigación, se cuenta con datos exactos de parámetros de precalentamiento para la unión de juntas soldadas de fundición de hierro gris con electrodo revestido AWS ENiFe - Cl, lo cual conlleva a realizar uniones soldadas de elementos mecánicos con buenas propiedades mecánicas; razón por la cual este proyecto de investigación resulta ser de gran importancia como ayuda en el campo industrial, finalizado este proyecto de investigación se cuenta con datos técnicos y exactos para la realización de la soldadura en hierro

gis clase 30 y tener un mayor control de temperaturas de precalentamiento antes, durante, y después de realizar el proceso soldadura en la junta.

4.20. INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA DE PRECALENTAMIENTO EN EL ALIVIO DE TENSIONES DE PIEZAS FUNDIDAS

En los procesos de soldadura el aporte de energía está focalizado en una zona concreta, lo que provoca una transferencia o disipación de calor. Esta variación de temperatura es el origen de los posibles cambios micro estructurales produciendo tensiones y deformaciones internas que pueden afectar al servicio de la soldadura.

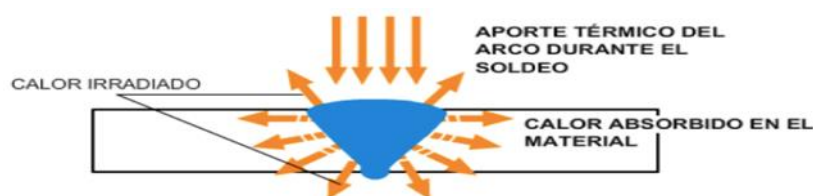


Figura N° 19: Reparto de calor existente en una soldadura

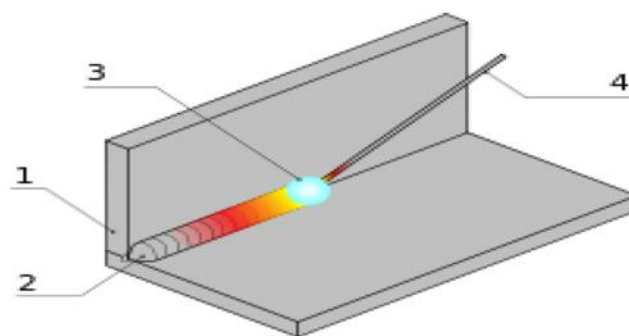


Figura N° 20: Elementos básicos en la soldadura

Otro factor clave en la influencia de la creación de tensiones residuales es la manera de soldar, ya que la velocidad de soldeo en el cordón también es un factor clave para procurar la mayor homogeneidad en el cordón y minimizar las tensiones residuales.

En la figura N° 20 se destacan todas las variables existentes en la operación de soldeo. La forma de la soldadura en el metal base, la velocidad o tipo del cordón, así como el tipo de aporte de energía y como el tipo del metal de aportación son variables que, en cierta medida, pueden ocasionar tensiones residuales.

En función de cómo se ha realizado la soldadura, la defectología puede acarrear macro tensiones residuales o micro tensiones residuales, manifestándose de la siguiente forma como puede comprobarse en las siguientes figuras:

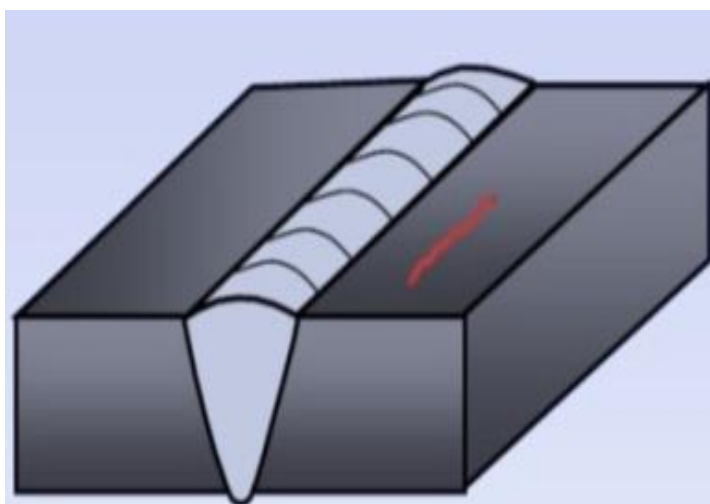


Figura N° 21: agrietamiento en el haz

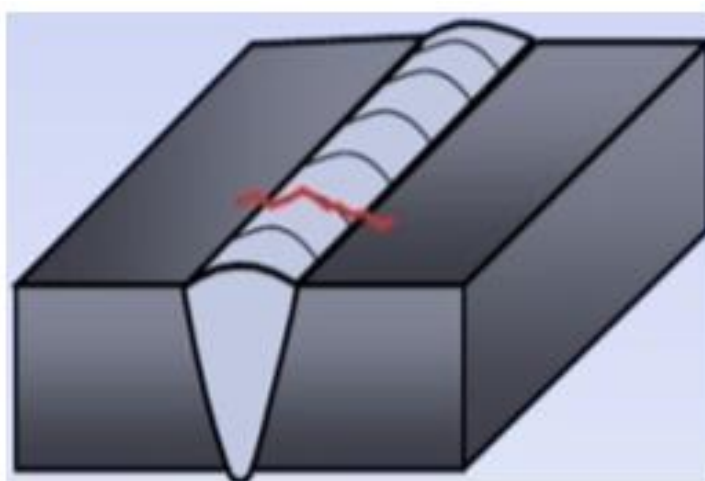


Figura N° 22: agrietamiento transversal

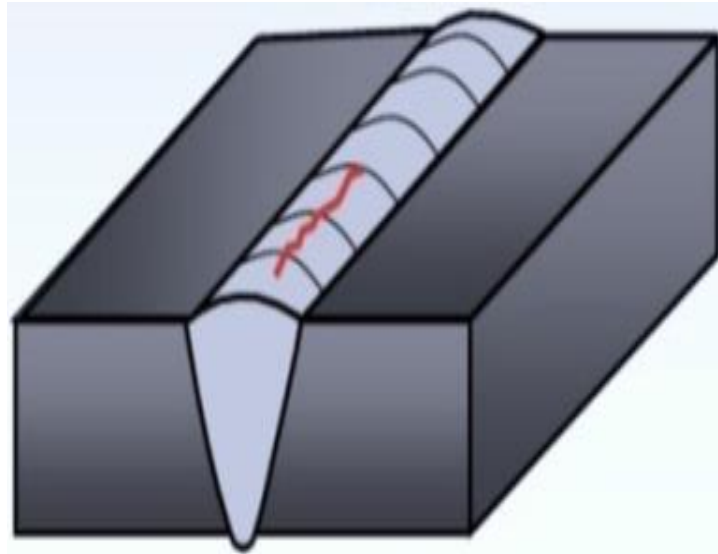


Figura N° 23: agrietamiento longitudinal

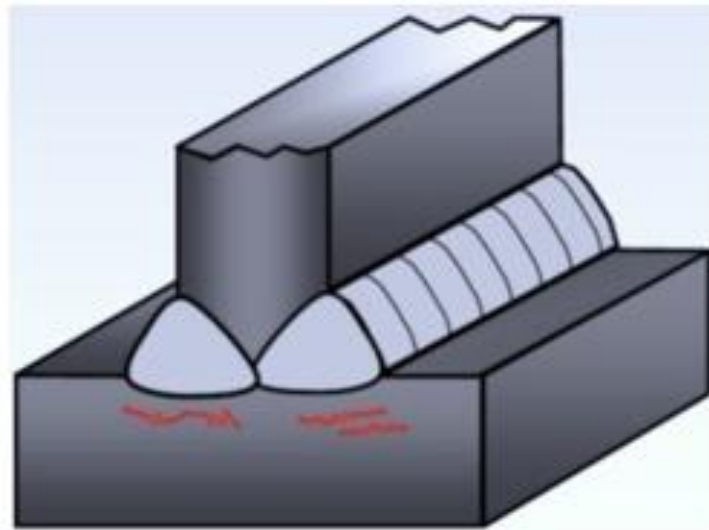


Figura N° 24: agrietamiento en el haz

4.21. SOLDADURA DE RECUPERACIÓN DE UNA FUNDICIÓN GRIS

A la hora de reparar una pieza o componente de fundición o hierro fundido, podemos encontrarnos los mismos tipos de roturas o fisuras y las consideraciones dadas los refuerzos, serán igualmente aplicables en las reparaciones de este tipo de piezas; en donde deben de seguirse las siguientes recomendaciones:

- La pieza debe precalentarse a una temperatura próxima a los 350 a 370 °C y mantenerse a dicha temperatura durante todo el proceso de reparación, procurando un enfriamiento lento una vez concluida la soldadura. Una temperatura inferior daría como resultado un temple brusco de las zonas afectadas térmicamente por el cordón de soldadura, y, por lo tanto, una capa gruesa de fundición blanca en estas zonas, y una gran tendencia al agrietamiento y desprendimiento del cordón de reparación. Y una temperatura superior dará como resultado mayor porosidad debido a una ebullición mayor de todas las impurezas contenidas en los poros de la estructura del hierro fundido.
- Si la pieza se ha preparado convenientemente ver Figura 25, tal como se indica al final del anteriormente punto, es preferible realizar cordones de soldadura que hagan contacto sólo con un lado del chaflán o del metal base; esto evitará acumulación de tensiones que tenderían a arrancar dichos cordones debido a la facilidad de fisuración del material transformado a fundición blanca (como ya se mencionó, por el efecto del calor).

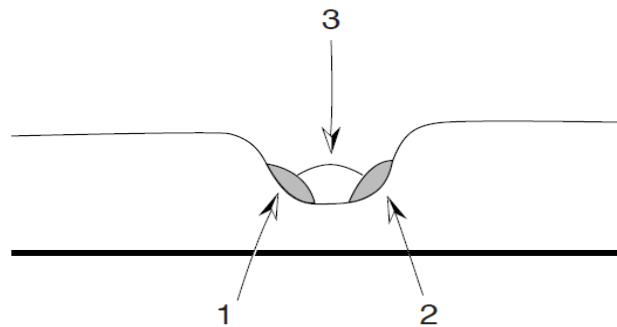


Figura N° 25: Formas de cordones que se aplican en la recuperación

- Para evitar una dilución excesiva con el metal base, es necesario realizar cordones muy cortos (máximo 3-5 cm):

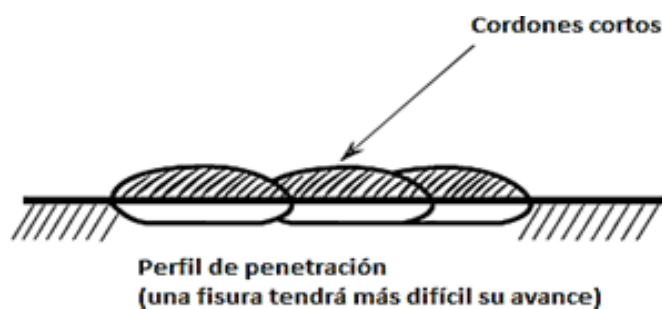


Figura N° 26: Perfil de penetración en la aplicación de la soldadura

- Al acabar cada uno de estos cordones, deben martillearse con una piqueta de punta redondeada. Esto por un lado hará que el material enfríe antes de realizar el siguiente cordón y aún más importante eliminará las tensiones que tienden a arrancar el cordón del material base al oponer por martilleo tensiones en sentido contrario.

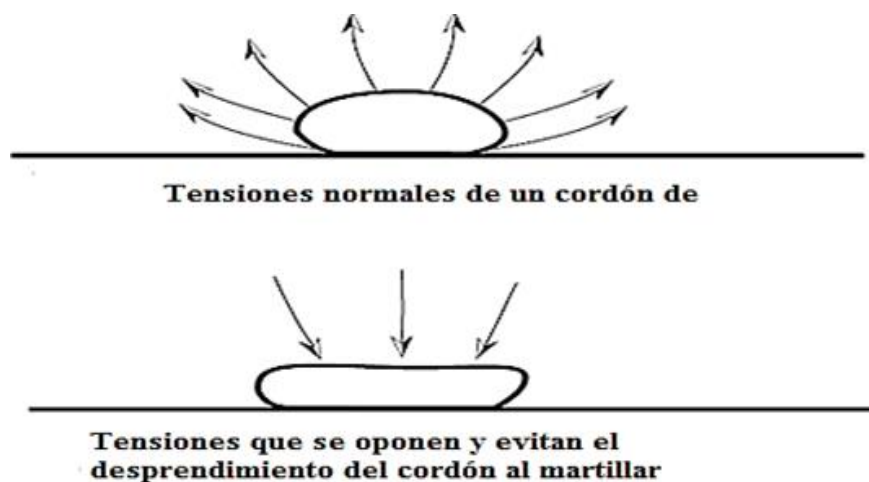


Figura N° 27: Tensiones generadas por la soldadura

- Preferentemente, soldar con c.c.+; este tipo de corriente aporta menos calor al metal base, lo cual contribuye a obtener una dilución mínima.

4.22. PLANTEAMIENTO DE EXPERIMENTOS DE RECUPERACION DE PIEZAS DE FUNDICIÓN GRIS

Generalmente en la pieza de hierro fundido se precalienta para mejorar el proceso de recuperación por soldadura. Primero hay que analizar si se soldará con o sin precalentamiento. Si se decide precalentar, hay que analizar si se hará local o totalmente. En general, sólo se debe precalentar cuando se considere indispensable y aun así, el precalentamiento no debe exceder la temperatura necesaria.

Para analizar la necesidad del precalentamiento del hierro fundido, se considera primero la baja plasticidad del material y segundo la tendencia a la formación de la cementita (Fe_3C). Para decidir si precalentar en una forma local o total, será necesario analizar si durante el calentamiento se da la libre dilatación, es decir la no aparición de las tensiones de compresión y de tracción. Si se da la libre

dilatación, no será necesario el precalentamiento de las piezas; sin embargo, se aplica un ligero precalentamiento local, con el fin de evitar la formación de cementita.

En la recuperación de piezas grandes, por lo general se aplica sólo precalentamiento local, el cual se mantiene durante todo el proceso de soldadura, tratando de obtener la libre dilatación. Este precalentamiento debe tomar en consideración la forma geométrica de la pieza y la ubicación de la rotura. En la figura 28, se ilustra una pieza con una rotura en el brazo central. El precalentamiento se aplica en los brazos adyacentes

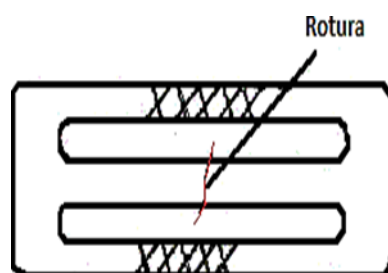


Figura N° 28: Precalentamiento en puntos necesarios

Antes de aplicar la soldadura es necesario preparar la pieza de fundición, la cual consiste en elaborar un bisel, los cuales nos servirán para depositar la soldadura y que esta penetre como se requiere en la reparación.

La grieta se bisela, empleando de preferencia un disco abrasivo de corte y desbaste (se evita el empleo de alguno de los métodos que realizan el corte a partir de la acción de una fuente de calor sobre la tapa), de este modo se evita que el calor provoque más tensiones en la tapa. El bisel no debe tener cantos agudos (todos los cantos deben estar redondeados de modo que no actúen como

concentradores de tensiones). Durante el biselado se debe eliminar todo el material depositado en la reparación ejecutada anteriormente y también el metal base afectado térmicamente.

- **Selección del metal de aporte:** Para este tipo de reparaciones se puede seleccionar y utilizar un electrodo de hierro-níquel (E NiFe-CI, FERRONILOX 60) UTP 84 FN de diámetro 3.2 mm. Recomendado según catálogo de fabricante para soldar todos los tipos de hierro fundido.
- **Descripción de electrodo Ni-Fe:** Electrodo de níquel-ferro para soldadura de hierros colados o fundiciones (Ni = Níquel, Fe = Hierro, CI = Cast Iron) diseñado para soldar en toda posición. Trabaja con CD PI (electrodo +) y CA.
- **Características sobresalientes de aleación Ni-Fe:** Esta es una aleación de níquel-ferro de alta resistencia y gran facilidad para depositarse aún en piezas muy impregnadas de aceite o grasa, con muy bajo amperaje, los depósitos de este electrodo son totalmente maquinables, no deja puntos duros y se pueden usar en forma combinada con NILOX y ARC WELD 127, en casos difíciles. Da buenos resultados como revestimiento antifriccional por su alto grado de pulido.
- **Áreas de aplicación típicas:** Electrodo para reparación de piezas de hierro colado gris y maleable como: base de maquinaria, motores, cuerpos o impulsores de bombas, cajas de engranes, coronas, levas, formación de dientes gastados en engranes, mazas cañeras, válvulas, carcazas, poleas, etc. la Figura 29, muestran diferentes piezas que han sido recuperados (reparados) por soldadura



Figura N° 29: Piezas recuperadas de fundición gris poleas y múltiples

- Técnica para la soldadura de reparación:** Se elabora un bisel con electrodo (CUT-WELD) o esmeril para evitar ángulo y rellenar mejor, limpie cuidadosamente el área por unir o revestir, conecte la máquina en polaridad invertida (positivo a porta electrodo) y deposite cordones cortos y rectos, martille rápidamente cada depósito mientras está caliente, use la técnica de cordones alternados para no recalentar la zona. Cuando termine de soldar tape las piezas con asbesto o cal seca, para lograr un enfriamiento lo más lento posible, evite corrientes de aire durante el proceso de soldadura.

Al término del depósito de soldadura. En ambas caras o una cara de la pieza de fundición gris, se realiza una limpieza del cordón de soldadura, lo cual se hace con la ayuda de una pulidora manual y una carda de disco, este proceso de limpieza se realiza con el fin de llevar a cabo una inspección visual y con líquidos penetrantes del cordón de soldadura.



Figura N° 30: Cordón de soldadura depositado por el proceso SMAW

4.23. PLANTEAMIENTO DE RECUPERACIÓN DE MONOBLOCK DE MOTOR DE COMBUSTIÓN

- Nombre de la Pieza: Monoblock
- Metal Base: Hierro Fundido gris
- Reparación: Recuperar el material para el uso adecuado del monoblock mediante un proceso de soldadura (SMAW).
- Resistencia a la tracción (Los esfuerzos de tracción que sufre el monoblock lo podemos observar en la culata durante la combustión y alojar a las camisas de cilindro por donde se deslizan los pistones.



Figura N° 31: monoblock de motor de combustión

4.24. PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA Y MATERIAL DE APORTE

Proceso de Soldadura: SMAW

Material de Aporte Utilizado: Ni-Fe /CITOFONTE Electrodo de alto contenido de níquel para la soldadura de unión y recargue de hierro fundido. Su depósito es maquinable, libre de poros y fisuras. Posee alta ductilidad (mayor a la de los hierros fundidos). Para obtener soldaduras de óptima calidad es necesario que la superficie a soldar, quede exenta de pintura, grasa, aceite, etc. Electrodo diseñado para trabajar con bajos amperajes. El alto contenido de níquel inhibe la formación de la cementita al soldar hierros fundidos. Posee revestimiento conductor que le confiere excelentes propiedades mecánicas y excelentes características de soldabilidad no comparable con ningún producto equivalente.

¿Cómo soldar un bloque de motor de hierro fundido?

- Se recomienda que antes de la aplicación del proceso de soldadura para la reparación del monoblock, deberá estar libre de aceites, grasas y otros contaminantes. Las grietas y otras imperfecciones deben limpiarse con disco abrasivo.
- El proceso de recuperación debe de incluir una temperatura de precalentamiento, cuyo precalentamiento se recomienda de 350 a 370°C y una preparación de la junta o pieza en “V”, en el caso de preparación de la junta en “V” simple, se recomienda no tener variación en la temperatura de precalentamiento y un enfriamiento lento para evitar cualquier defecto de soldadura. Precaliente el bloque del motor dañado antes de soldar. Si es posible, calentar todo el bloque del motor, ajuste el bloque del motor en un área que es cerrada y sin corrientes de aire fuertes para evitar que el bloque del motor sufra enfriamiento demasiado rápido. Si no es posible calentar la totalidad del bloque del motor, calentar el área alrededor de la reparación.
- Ajuste el soplete de soldadura a una corriente baja. Esto reducirá al mínimo la creación de tensiones adicionales causadas al bloque del motor de hierro fundido durante la reparación.
- Aplique el electrodo de níquel y comenzar a rellenar la grieta en el bloque del motor con un regreso movimiento de vaivén a través de la grieta. Tenga cuidado para asegurarse de que el níquel fluye en la fundición a cada lado de la grieta.

- Deje que el bloque de hierro fundido se enfríe lentamente, una vez finalizada la reparación. Si es necesario, envolver el bloque del motor en mantas aislantes para ralentizar la velocidad de enfriamiento. Cuanto más lento el bloque del motor de hierro fundido se enfría más bajo es el riesgo de la reparación de grietas y separarse del bloque del motor de hierro fundido.
- Empezar a aplicar el electrodo de níquel en la parte inferior de la grieta y el trabajo en una dirección hacia arriba de la grieta. Mueva el electrodo de níquel de manera que cada cordón de soldadura se mueve en la misma dirección de la anterior.
- Permitir que la soldadura se enfríe lentamente una vez que la grieta se ha llenado y la reparación completa. No acelerar el proceso de enfriamiento con agua o aire a presión, ya que podría provocar la nueva soldadura a agrietarse y separarse del bloque de hierro fundido.



Figura N° 32: Monoblock Fisurado



Figura N° 33: Soldeo de monoblock



Figura N° 34: Cordón de soldadura sin efecto



Figura N° 35: Cordón de soldadura con defecto

El calentamiento heterogéneo causa contracción expansión heterogénea, lo que puede causar distorsiones y tensiones internas en la pieza soldada. Dependiendo de la composición y aplicación, el metal puede a veces no ser capaz de resistir tales distorsiones y agrietarse, o puede ocurrir falla prematura de la pieza. Una manera de minimizar esas tensiones o de aliviarlas es a través de un calentamiento uniforme de la estructura después que la soldadura ha sido realizada. El metal es calentado a temperaturas un poco por debajo del punto donde pueda ocurrir alguna alteración microestructural y luego enfriado lentamente. El objetivo del alivio de tensiones es reducir esas tensiones. Ese tratamiento lleva a la unión soldada a una condición más duradera, donde la ductilidad aumentada considerablemente, sin embargo, la resistencia mecánica disminuye ligeramente. Cabe indicar al mismo tiempo que el procedimiento de soldadura para cualquier tipo de pieza fundida gris es el mismo.

CONCLUSIONES

- Se evaluaron las probetas soldadas con electrodos ENi-CI en un procedimiento de soldadura SMAW realizando ensayos de dureza en la zona del material base, zona térmicamente afectada y el material fundido para poder determinar la variación en sus propiedades mecánicas influenciadas por la temperatura de precalentamiento posteriormente los resultados fueron tabulados y analizados, obteniendo como conclusión que 370°C es la temperatura que mejores propiedades presentó sobre el metal base.
- Los electrodos a ser utilizados en la soldadura del hierro fundido gris deben considerarse en base a los requisitos de soldadura apropiados para el material base, que ofrezcan una composición y propiedades mecánicas óptimas, estos están especificados en la norma AWS A5.15 diseñados específicamente para soldaduras de hierro fundido y siendo una de las principales propiedades de la junta soldada la dureza, con el presente estudio se logró determinar que las probetas soldadas con una temperatura de precalentamiento de 370 °C presenta un mejoramiento en sus propiedades mecánicas de la resistencia a la dureza.
- Para la determinación de la temperatura adecuada de obtención de juntas soldadas con buenas propiedades mecánicas se realizó varias pruebas con la variación en la temperatura de precalentamiento y después de un riguroso análisis se llega a la conclusión de que la mejor temperatura de precalentamiento es de 370°C la misma que ofrece una junta muy idónea.

RECOMENDACIONES

- Antes de realizar un proceso de soldadura se debe identificar el tipo de hierro gris que es, esto nos indicara cual es la temperatura de precalentamiento que se le debe realizar. De no contar con ninguna información sobre el material a ser soldado se debería tomar una pequeña muestra y observar en el microscopio el cual nos indicara el tipo de estructura con que cuenta dicho material brindándonos así mayor información sobre dicho material.
- La identificación del grado o tipo de material base es de muchísimo interés antes de ser soldado, ya que estos tienen varias designaciones y cada una sus propiedades y características diferentes que influyen directamente en el momento de realizar un proceso de soldadura.
- Antes de la aplicación de la soldadura es esencial preparar la junta especialmente el biselado, se recomienda utilizar las recomendaciones que hace la norma AWS D11.2 para el diseño de la junta para hierros fundidos según su espesor.
- Para la aplicación del método se requiere ambientes secos, sin humedad ni ráfagas de viento (protección de la pieza), considerar la rapidez de avance (por el comportamiento del electrodo al fundirse), cordones de soldadura entre 5 a 8 cm y el orden de realización de los cordones de soldadura, según morfología de la pieza.
- Con el fin de conseguir una correcta aplicación de la soldadura y evitar picos altos de temperatura es recomendable soldar en tramos cortos de 50 a 100 mm en forma alternada también con el fin de no retener demasiado tiempo

en el punto de fusión de la soldadura, consiguiendo así que se enfríe después de cada cordón hasta que la operación quede concluida correctamente.

- Los electrodos deben estar completamente libres de humedad cuando sean utilizados, la aparición de poros en la soldadura se origina debido a la humedad presente en los electrodos, si los electrodos no tuvieron un correcto almacenamiento estos deben ser recocidos en un horno a 120°C por una hora.
- Asegurar un enfriamiento lento con uniformidad de toda la pieza posterior a la soldadura reduce la formación de martensita, cementita, tensiones internas y fisuras que pueden producirse por choque térmico de las corrientes de aire o un ambiente frío, la forma de asegurar un enfriamiento lento es con el uso de polvo de asbesto, cal en polvo, arena, cenizas calientes, o en un horno caliente.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Aguilar, R. (2011). Solidificación de Metales y Aleaciones y el Mecanismo de Cierre de la Ventana Fluida Durante los Ensayos de Fluidez (Ensayo Metodológico). Proyecto de investigaciones metalúrgicas. EMI, FIUSAC. Guatemala.72 p.
- Aguilar, R. (2012). Introducción a la Metalurgia, Curso Básico para Ingenieros. Proyecto de investigaciones metalúrgicas. EMI, FIUSAC. Guatemala.192 p.
- ANSI/AWS. (1997). Guide for Welding Iron Casting. ANSI/AWS D11.2-89. Miami American Welding Society.
- Askeland, D. R. (1998). Ciencia e Ingeniería de Materiales - p. 133-135.
- ASM International. . (2005). Failure analysis and Prevention. Metals Handbook, vol 11. Metals Park. ASM International. Ohio. 2909 p.
- ASM, Internacional. (2005). Welding Brazing and soldering. Metals Handbook, vol. 6. Metals Park. ASM International. Ohio.2873 p.
- Asta, E. (2006). Fundamentos de la soldadura por arco eléctrico. Fundación Latinoamericana de Soldadura. Buenos Aires Argentina. 32 p.
- Barreiro, A. (1963). Fundiciones, Madrid, Editorial Dossat,.
- Bravo, F. (2005). Tratamientos Térmicos a Fundiciones Grises de la Región Grau Fabricadas en Horno de cubilote. Facultad de Ingeniería, Universidad de Piura. Perú. 137 p.
- Callister, W. (1995). Introducción a la Ciencia e Ingeniería de Materiales.
- Callister, W. D. (2007). Introducción a la Ciencia e Ingeniería de Materiales.
- Celada E., A. (2013). Soldabilidad del acero AISI 1045 con electrodos E8018B2 y E9018B3. Proyecto de Investigaciones Metalúrgicas, EIM, FIUSAC. Guatemala. 7 p. (Presentado a la revista Científica del CII).

- Ceredo Hernandez, E. y Olguin Montoya, J. (2016). Recuperación de piezas de hierro colado por soldadura. Tesis de la Escuela superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica. Unidad Azcapotzalco. Ciudad de México.
- Handbook, M. (2005). Versión 15. Welding, Brazing and Soldering. USA. 31.
- Kobe, S. (2011). Arc Welding of Specific Steel and Cast Irons. Fourth Edition. Kitahara Shinagawa, Shinagawa-Ku, Tokyo. Japan. 169 p.
- Luna Tejada, R. (2015). Evaluación del procedimiento de soldadura de la unión disímil entre aceros API 5L x70 PSL1 y ASTM A707 L5 F65. Tesis Pontificia Universidad Católica del Perú Facultad de Ciencias e Ingeniería. Lima Perú.
- Marulanda, J. (2007). Recuperación y soldabilidad de piezas de fundición de hierro. Pereira: S.N., Scientia et Technica,.
- Oxgasa. (2003). Manual del soldador, INFRA. El Salvador. pág 28. Sin fecha especificada. Consulta: mayo de 2017.
- Pastor, M. (2008). Introducción a la metalurgia de la soldadura, S.F. Editorial, Pág 50.
- Pouranvari. (2010). On the weldability of grey cast iron using nickel based filler metal. Dezful, Iran : Elsevier. Vol. 31.
- Ramírez, M. & Enrique, Heriberto. (2009). Diseño para la fabricación y ensamble de productos soldados. Editorial: Universidad del Norte (Biblioteca virtual UTA Ebrary).
- Riesco, G. H. (2006). Manual del Soldador.
- Torres, E. (2010). Soldabilidad de los hierros fundidos recomendaciones para su soldadura. Cuba.

ANEXOS

TABLE 1 Approximate Hardness Conversion Numbers for Non-Austenitic Steels (Rockwell C Hardness Range)^{A, B}

Rockwell C Hardness Number 150 kgf (HRC)	Vickers Hardness Number (HV)	Brinell Hardness Number ^C		Knoop Hardness, Number 500-gf and Over (HK)	Rockwell Hardness Number		Rockwell Superficial Hardness Number			Scleroscope Hardness Number ^D	Rockwell C Hardness Number 150 kgf (HRC)
		10-mm Standard Ball, 3000-kgf (HBS)	10-mm Carbide Ball, 3000-kgf (HBW)		A Scale, 60-kgf (HRA)	D Scale, 100-kgf (HRD)	15-N Scale, 15-kgf (HR 15-N)	30-N Scale, 30-kgf (HR 30-N)	45-N Scale, 45-kgf (HR 45-N)		
68	940	...	...	920	85.6	76.9	93.2	84.4	75.4	97.3	68
67	900	...	...	895	85.0	76.1	92.9	83.6	74.2	95.0	67
66	865	...	...	870	84.5	75.4	92.5	82.8	73.3	92.7	66
65	832	...	(739)	846	83.9	74.5	92.2	81.9	72.0	90.6	65
64	800	...	(722)	822	83.4	73.8	91.8	81.1	71.0	88.5	64
63	772	...	(705)	799	82.8	73.0	91.4	80.1	69.9	86.5	63
62	746	...	(688)	776	82.3	72.2	91.1	79.3	68.8	84.5	62
61	720	...	(670)	754	81.8	71.5	90.7	78.4	67.7	82.6	61
60	697	...	(654)	732	81.2	70.7	90.2	77.5	66.6	80.8	60
59	674	...	634	710	80.7	69.9	89.8	76.6	65.5	79.0	59
58	653	...	615	690	80.1	69.2	89.3	75.7	64.3	77.3	58
57	633	...	595	670	79.6	68.5	88.9	74.8	63.2	75.6	57
56	613	...	577	650	79.0	67.7	88.3	73.9	62.0	74.0	56
55	595	...	560	630	78.5	66.9	87.9	73.0	60.9	72.4	55
54	577	...	543	612	78.0	66.1	87.4	72.0	59.8	70.9	54
53	560	...	525	594	77.4	65.4	86.9	71.2	58.6	69.4	53
52	544	(500)	512	576	76.8	64.6	86.4	70.2	57.4	67.9	52
51	528	(487)	496	558	76.3	63.8	85.9	69.4	56.1	66.5	51
50	513	(475)	481	542	75.9	63.1	85.5	68.5	55.0	65.1	50
49	498	(464)	469	526	75.2	62.1	85.0	67.6	53.8	63.7	49
48	484	451	455	510	74.7	61.4	84.5	66.7	52.5	62.4	48
47	471	442	443	495	74.1	60.8	83.9	65.8	51.4	61.1	47
46	458	432	432	480	73.6	60.0	83.5	64.8	50.3	59.8	46
45	446	421	421	466	73.1	59.2	83.0	64.0	49.0	58.5	45
44	434	409	409	452	72.5	58.5	82.5	63.1	47.8	57.3	44
43	423	400	400	438	72.0	57.7	82.0	62.2	46.7	56.1	43
42	412	390	390	426	71.5	56.9	81.5	61.3	45.5	54.9	42
41	402	381	381	414	70.9	56.2	80.9	60.4	44.3	53.7	41
40	392	371	371	402	70.4	55.4	80.4	59.5	43.1	52.6	40
39	382	362	362	391	69.9	54.6	79.9	58.6	41.9	51.5	39
38	372	353	353	380	69.4	53.8	79.4	57.7	40.8	50.4	38
37	363	344	344	370	68.9	53.1	78.8	56.8	39.6	49.3	37
36	354	336	336	360	68.4	52.3	78.3	55.9	38.4	48.2	36
35	345	327	327	351	67.9	51.5	77.7	55.0	37.2	47.1	35
34	336	319	319	342	67.4	50.8	77.2	54.2	36.1	46.1	34
33	327	311	311	334	66.8	50.0	76.6	53.3	34.9	45.1	33
32	318	301	301	326	66.3	49.2	76.1	52.1	33.7	44.1	32
31	310	294	294	318	65.8	48.4	75.6	51.3	32.5	43.1	31
30	302	286	286	311	65.3	47.7	75.0	50.4	31.3	42.2	30
29	294	279	279	304	64.8	47.0	74.5	49.5	30.1	41.3	29
28	286	271	271	297	64.3	46.1	73.9	48.6	28.9	40.4	28
27	279	264	264	290	63.8	45.2	73.3	47.7	27.8	39.5	27
26	272	258	258	284	63.3	44.6	72.8	46.8	26.7	38.7	26
25	266	253	253	278	62.8	43.8	72.2	45.9	25.5	37.8	25
24	260	247	247	272	62.4	43.1	71.6	45.0	24.3	37.0	24
23	254	243	243	266	62.0	42.1	71.0	44.0	23.1	36.3	23
22	248	237	237	261	61.5	41.6	70.5	43.2	22.0	35.5	22
21	243	231	231	256	61.0	40.9	69.9	42.3	20.7	34.8	21
20	238	226	226	251	60.5	40.1	69.4	41.5	19.6	34.2	20

ASIM E140 - 12b^{e1}

TABLE 2 Approximate Hardness Conversion Numbers for Non-Austenitic Steels (Rockwell B Hardness Range)^{A, B}

Rockwell B Hardness Number, 100-kgf (HRB)	Vickers Hardness Number (HV)	Brinell Hardness Number, 3000-kgf, (HBS)	Knoop Hardness Number, 500-gf, and Over (HK)	Rockwell A Hardness Number, 60-kgf. (HRA)	Rockwell F Hardness Number, 60-kgf. (HRF)	Rockwell Superficial Hardness Number			Rockwell B Hardness Number, 100-kgf, (HRB)
						15-T Scale, 15-kgf. (HR 15-T)	30-T Scale, 30-kgf. (HR 30-T)	45-T Scale, 45-kgf. (HR 45-T)	
100	240	240	251	61.5	...	93.1	83.1	72.9	100
99	234	234	246	60.9	...	92.8	82.5	71.9	99
98	228	228	241	60.2	...	92.5	81.8	70.9	98
97	222	222	236	59.5	...	92.1	81.1	69.9	97
96	216	216	231	58.9	...	91.8	80.4	68.9	96
95	210	210	226	58.3	...	91.5	79.8	67.9	95
94	205	205	221	57.6	...	91.2	79.1	66.9	94
93	200	200	216	57.0	...	90.8	78.4	65.9	93
92	195	195	211	56.4	...	90.5	77.8	64.8	92
91	190	190	206	55.8	...	90.2	77.1	63.8	91
90	185	185	201	55.2	...	89.9	76.4	62.8	90
89	180	180	196	54.6	...	89.5	75.8	61.8	89
88	176	176	192	54.0	...	89.2	75.1	60.8	88
87	172	172	188	53.4	...	88.9	74.4	59.8	87
86	169	169	184	52.8	...	88.6	73.8	58.8	86
85	165	165	180	52.3	...	88.2	73.1	57.8	85
84	162	162	176	51.7	...	87.9	72.4	56.8	84
83	159	159	173	51.1	...	87.6	71.8	55.8	83
82	156	156	170	50.6	...	87.3	71.1	54.8	82
81	153	153	167	50.0	...	86.9	70.4	53.8	81
80	150	150	164	49.5	...	86.6	69.7	52.8	80
79	147	147	161	48.9	...	86.3	69.1	51.8	79
78	144	144	158	48.4	...	86.0	68.4	50.8	78
77	141	141	155	47.9	...	85.6	67.7	49.8	77
76	139	139	152	47.3	...	85.3	67.1	48.8	76
75	137	137	150	46.8	99.6	85.0	66.4	47.8	75
74	135	135	147	46.3	99.1	84.7	65.7	46.8	74
73	132	132	145	45.8	98.5	84.3	65.1	45.8	73
72	130	130	143	45.3	98.0	84.0	64.4	44.8	72
71	127	127	141	44.8	97.4	83.7	63.7	43.8	71
70	125	125	139	44.3	96.8	83.4	63.1	42.8	70
69	123	123	137	43.8	96.2	83.0	62.4	41.8	69
68	121	121	135	43.3	95.6	82.7	61.7	40.8	68
67	119	119	133	42.8	95.1	82.4	61.0	39.8	67
66	117	117	131	42.3	94.5	82.1	60.4	38.7	66
65	116	116	129	41.8	93.9	81.8	59.7	37.7	65
64	114	114	127	41.4	93.4	81.4	59.0	36.7	64
63	112	112	125	40.9	92.8	81.1	58.4	35.7	63
62	110	110	124	40.4	92.2	80.8	57.7	34.7	62
61	108	108	122	40.0	91.7	80.5	57.0	33.7	61
60	107	107	120	39.5	91.1	80.1	56.4	32.7	60

E140 - 12b^{E1}

TABLE 2 (continued)

Rockwell B Hardness Number, 100-kgf, (HRB)	Vickers Hardness Number (HV)	Brinell Hardness Number, 3000-kgf, 10-mm Ball	Knoop Hardness Number, 500-gf and Over	Rockwell A Hardness Number, 60-kgf, Diamond Penetrator	Rockwell F Hardness Number, 60-kgf, 1/16-in. (1.588-mm) Ball	Rockwell Superficial Hardness Number			Rockwell B Hardness Number, 100-kgf, 1/16-in. (1.588-mm) Ball
						15-T Scale, 15-kgf, 1/16-in. (1.588-mm) Ball	30-T Scale, 30-kgf, 1/16-in. (1.588-mm) Ball	45-T Scale, 45-kgf, 1/16-in. (1.588-mm) Ball	
59	106	106	118	39.0	90.5	79.8	55.7	31.7	59
58	104	104	117	38.6	90.0	79.5	55.0	30.7	58
57	103	103	115	38.1	89.4	79.2	54.4	29.7	57
56	101	101	114	37.7	88.8	78.8	53.7	28.7	56
55	100	100	112	37.2	88.2	78.5	53.0	27.7	55
54	111	36.8	87.7	78.2	52.4	26.7	54
53	110	36.3	87.1	77.9	51.7	25.7	53
52	109	35.9	86.5	77.5	51.0	24.7	52
51	108	35.5	86.0	77.2	50.3	23.7	51
50	107	35.0	85.4	76.9	49.7	22.7	50
49	106	34.6	84.8	76.6	49.0	21.7	49
48	105	34.1	84.3	76.2	48.3	20.7	48
47	104	33.7	83.7	75.9	47.7	19.7	47
46	103	33.3	83.1	75.6	47.0	18.7	46
45	102	32.9	82.6	75.3	46.3	17.7	45
44	101	32.4	82.0	74.9	45.7	16.7	44
43	100	32.0	81.4	74.6	45.0	15.7	43
42	99	31.6	80.8	74.3	44.3	14.7	42
41	98	31.2	80.3	74.0	43.7	13.6	41
40	97	30.7	79.7	73.6	43.0	12.6	40
39	96	30.3	79.1	73.3	42.3	11.6	39
38	95	29.9	78.6	73.0	41.6	10.6	38
37	94	29.5	78.0	72.7	41.0	9.6	37
36	93	29.1	77.4	72.3	40.3	8.6	36
35	92	28.7	76.9	72.0	39.6	7.6	35
34	91	28.2	76.3	71.7	39.0	6.6	34
33	90	27.8	75.7	71.4	38.3	5.6	33
32	89	27.4	75.2	71.0	37.6	4.6	32
31	88	27.0	74.6	70.7	37.0	3.6	31
30	87	26.6	74.0	70.4	36.3	2.6	30

Clasificación									
AMS A5.15 / ASME SFA-5.15	ENICJ								
Análisis Químico de Metal Depositado (valores típicos) (%)									
C	Mn	Si	P	S	Mo	Ni	Cr	Cu	Otros
0,03	0,10	0,15	-	-	-	Resto	-	-	-
Propiedades Mecánicas del Metal Depositado									
Tratamiento Térmico	Resistencia a la tracción [Mpa (psi)]	Límite de Fluencia [(Mpa (psi))]	Elongación en 2" [%]	Dureza					
Sin tratamiento	> 350 (50 800)	>270 (39 100)	4	> 140 HB					
Conservación de Producto									
<ul style="list-style-type: none"> Mantener en un lugar seco y evitar humedad. Almacenamiento bajo horno: 50 °C. Resecado de 80 °C por 1hora. 									
Posiciones de Soldadura									
P, H, Va, Sc 									
Parámetros de Soldeo Recomendados									
Para corriente alterna (AC) o continua (DC): Electrodo al polo positivo DCEP									
Diámetro	[mm] [pulgadas]	1,6 1/6	2,00 5/64	3,25 1/8	4,00 5/32	5,00 3/16	6,30 1/4		
Amperaje mínimo		-	-	50	80	110	-		
Amperaje máximo		-	-	80	120	150	-		